

아라미드섬유와 PET섬유시트로 보강한 철근콘크리트 기둥의 구조성능평가

김동환¹, 조민수², 최진형³, 조우래⁴, 김길희^{5*}

Structural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Column Reinforced with Aramid Fibers and PET Fibers

Dong-Hwan Kim¹, Min-Su Jo², Jin-Hyeung Choi³, Woo-Rae Cho⁴, Kil-Hee Kim^{5*}

Abstract: This study evaluates the performance of reinforced concrete columns using hybrid fiber sheets for structural behavior. The purpose of this method is to improve the load-bearing capacity of the reinforced structure by impregnating a hybrid fiber sheet, which is woven by arranging aramid and glass fibers uniaxially and attached to an aged concrete structure requiring reinforcement with epoxy. In particular, not only the weight reduction of the material obtained by using a fiber lighter than the steel material, but also the low-strength, high-toughness fiber element among the fibers used delays the brittle fracture of the high-strength, low-toughness fiber element. The low-strength, high-toughness fiber element among the fibers used delays the brittle fracture of the high-strength, low-toughness fiber element, resulting in weight reduction compared to steel. The study conducted structural tests on four specimens, with the hybrid reinforcement method and failure mode as main variables. Specimen size and loading conditions were chosen to be comparable with previous studies. The structural performance of the specimen was evaluated using energy dissipation capacity and ductility. Analysis shows that excellent results can be obtained with the hybrid fiber sheet reinforcement.

Keywords: Reinforced concrete column, Aramid, PET fibers, Hybrid sheets, Flexural behaviors, Shear behaviors, Reinforcement

1. 서론

건축구조물의 변화에 따라 요구되는 하중 및 부재의 내력 등에 따른 철근콘크리트 구조물의 유지 보수에 대한 관심이 높아지게 되면서 다양한 보수보강방법에 대한 연구가 증가하고 있다. 보수 및 보강을 위한 철근콘크리트 부재의 기존의 다양한 공법 가운데 섬유보강 폴리머(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP) 복합재를 사용한 FRP 시스템은 90년대부터 활발하게 연구되고 있다. FRP 시스템은 외부 부착을 통하여 보강하고 있으며 현재 국내외 현장에서 다양하게 적용되고 있다 (Chang, 2012; Choi, 2011; Kim, 2019; Cho, 2020).

철근 콘크리트에 적용되는 FRP 보강에 대한 기준은 현재 미국 콘크리트 학회 기준인 ACI 440.2R과 이탈리아 가이드라

인인 CNR-DT 200 R1을 통하여 확산되어 왔으며 현재 KDS 14 20 00: 2021 콘크리트 구조 설계기준 해설에서 제시하고 있는 방법에 따라 검토하여 제반 조치를 강구하고 있다.

FRP 복합재를 구성하고 있는 매트릭스는 유기계인 폴리머를 사용하기 때문에 습윤표면 상태 및 저온에 적용하기는 어려운 실정이다. 또한 투과성 부족 등에 대한 문제점이 보고되어 왔지만 FRP 복합재는 중량대비 높은 강도 및 고강도, 피로 및 부식에 대한 저항성능 그리고 시공의 편의성 등 다양한 이점을 가지고 있다(AI-Salloum, 2012).

고연성 하이브리드 섬유시트 보강 공법은 보강이 필요한 노후 콘크리트 구조물에 아라미드섬유와 Polyethylene terephthalate (이하, PET)섬유를 일축으로 배열하여 제작한 하이브리드 섬유시트와 에폭시를 이용하여 구조물에 부착하여 구조물의 내력 향상을 가능하게 한다. 특히, 철근보다 가벼운 섬유를 사용하여 경량화를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 두 가지 이상의 섬유를 적절한 비율로 제조함으로써 선형거동으로 인한 급격한 취성과파괴를 방지하여 연성을 증대시킬 수 있어 다른 보강방법에 비하여 안전성이 우수한 장점이 있다. 따라서 이 연구에서는 아라미드 섬유와 PET 섬유로 보강에 따른 구조적 성능을 평가하기 위하여 철근콘크리트 기둥 부재 실험을 수행하였다.

¹정희원, 공주대학교 스마트자연공간연구센터 박사후 연구원

²정희원, 공주대학교 스마트자연공간연구센터 박사후 연구원

³정희원, 공주대학교 그린스마트 건축공학과 & 도시융합시스템공학과 석사과정

⁴정희원, 공주대학교 그린스마트 건축공학과 & 도시융합시스템공학과 박사과정

⁵정희원, 공주대학교 그린스마트 건축공학과 & 도시융합시스템공학과 교수

*Corresponding author: kimkh@kongju.ac.kr

Dept. of Architectural Engineering & Urban Systems Engineering, Kongju National University Cheonan, 31080, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 실험계획

2.1 하이브리드 섬유시트의 구성 및 물리적 특성

이 연구에서 사용한 하이브리드 섬유 시트는 아라미드섬유와 PET섬유로 구성되어 일축으로 배열한 것이다. PET섬유의 특징은 원료가 폴리에틸렌 테레프탈레이트이며 에틸렌그리클과 테레프탈산 또는 디메틸테레프탈레이트를 중합시켜서 제작한다. 강도와 강성은 일반플라스틱 중에서 가장 크며 내열성이 양호하다. 아라미드 섬유의 특징은 고분자 폴리아미드를 형성하고 있어서 인장변형에 매우 효율적인 성능을 발휘하는 것으로 나타나 있다.

인장력을 받는 하이브리드 시트는 구성하고 있는 섬유의 극한변형률이 낮은 순서로 파괴되며, 이후 극한변형률이 상대적으로 높은 섬유에서 인장강도가 결정되게 된다. 따라서 하이브리드 시트를 철근콘크리트 부재에 보강하게 되면, 시트가 인장철근이 항복하게 되는 것과 같은 연성거동을 나타내게 되어 구조물의 취성파괴를 방지할 수 있다.

Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 이 연구에서 사용한 하이브리드 FRP 시트는 Roll 형태로 아라미드섬유와 PET섬유를 체적비율 1:9(아라미드:PET)로 혼합하여 일축으로 배열한 것으로 물성치는 Table 1에 나타낸 바와 같다. 하이브리드 FRP 시트의 중량은 단위제곱미터당 640g으로 나타났으며, 단면적은 아라미드 섬유의 경우 5.450mm², PET섬유의 경우 4.025mm²

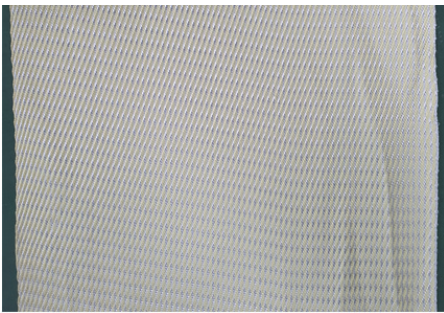


Fig. 1 Hybrid FRP sheet

Table 1 Properties of FRP sheet

Sheets	Weight [g/m ²]	Tensile Load [N]	Area [mm ²]	Standard Test Method
Hybrid FRP	640	1	9,915	Aramid: 5.450 PET: 4.025 ASTMD3039/D 3039M-17
		2	12,225	
		3	11,015	
		Avg	11,052	

* The cross-sectional area is calculated as the product of the cross-sectional area of the rovings and the number of rovings arranged within 25mm of fiber width.

로 하이브리드 FRP 시트의 총 단면적은 9.475mm²이다. 섬유의 단면적은 하이브리드 FRP 시트의 폭 25mm 안에 배열된 섬유로빙의 단면적으로 산정하였다. 아라미드섬유의 1로빙의 단면적은 0.109mm²이며, PET섬유의 1로빙의 단면적은 0.87mm²이다. 하이브리드 FRP 시트의 기계적 특성을 알아보기 위하여ASTMD 3039M-17(2017)의 시험방법을 이용한 인장시험결과 하이브리드 FRP 시트의 인장하중은 평균 11,052N으로 나타났으며, 인장응력은 1,166MPa, 탄성계수는 29,150MPa로 나타났다.

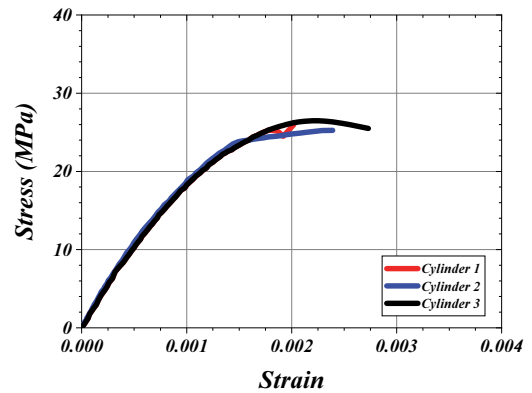


Fig. 2 Stress-strain relationship concrete

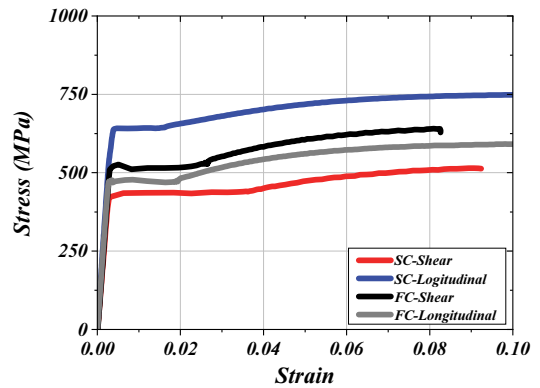


Fig. 3 Stress-Strain relationship reinforcement

Table 2 Properties of specimens

Specimens	f_{ck} (MPa)	Size (mm)		Reinforcement				
				Longitudinal		Shear		
				b	D	d_b	f_y	d_b
FC-N	30	400	400	2,100	12-D19	450 MPa	D10@125	550 MPa
FC-FRP								
SC-N					12-D25	651 MPa	D10@200	450 MPa
SC-FRP								

2.2 사용재료

실험체 제작에는 배합강도 30MPa의 콘크리트를 사용하였다. 콘크리트의 압축강도 시험을 위하여 실험체와 동일한 조건에서 양생하였다. 콘크리트 압축강도 시험은 KS F 2405에 기초하여 수행하였으며 콘크리트 압축강도는 평균 25.25MPa으로 Fig. 2에 나타내었다. 실험체에 배근된 철근은 Table 2에 나타내었으며 사용된 철근의 기계적 특성을 알아보기 위하여 KS B 0802의 금속재료 인장시험방법에 따라 인장시험을 실시하였다. 인장시험으로 나타난 철근의 물리적 특성을 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 실험체 계획

하이브리드 FRP 시트로 보강된 철근콘크리트 기둥의 구조 성능을 평가하기 위한 실험체는 총 4체를 제작하였다. 실험체(N)는 보강하지 않은 기준 실험체이고, 실험체(FRP)는 아라미드섬유(AF)와 PET섬유로 구성된 고연성 하이브리드 섬유시트(FRP)로 보강한 실험체이다. 실험체의 고연성 하이브리드 섬유시트 보강은 휨과 전단 실험체가 각각 상이하게 휨 실험체의 경우, 보강범위는 상부 및 하부 스테브 상단으로부터 약 1.5d(d=341mm)높이까지 소성힌지 구간을 1겹 보강하였다. 전단 실험체의 경우, 기둥의 전단면을 보강하여 무보강

실험체와 보강한 기둥을 실험적으로 평가하였다.

실험체의 형상은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 실험체는 상하부 스테브를 강체로하고 중앙부 실험구간으로 계획하였다. 실험체 중앙부의 실험구간은 400 (b)× 400(D)mm의 사각형의 단면으로 계획 하였으며, 실험구간은 2,100(H)mm이다.

실험체 상·하부에 위치한 스테브는 500(b)×1200(D)×450(H)mm로 제작하여 실험체를 가력프레임에 연결하였다.

2.4 가력 및 실험체 계측

Fig. 5는 RC 기둥의 휨 과 전단성능을 평가를 위한 대형구조물피로시험기(공주대학교 스마트자연공간연구센터)의 세팅현황을 나타낸다. 실험체는 10%의 축하중(243kN)과 역대칭 휨모멘트와 실험구간 내 일정한 전단력이 작용하도록 계획하였다. 실험체의 가력에 사용된 액추에이터의 용량은 축력과 전단력 모두 1,000kN 용량이며, 실험체의 상·하단 스테브에 300mm의 LVDT를 설치하여 수평변위를 측정하였다.

또한 가력프레임 양쪽 옆에 설치된 수평유지장치를 이용하여 기둥에 작용하는 축력에 의한 변위증분효과(P-Δ 효과)를 최소화 하도록 하였다. 횡하중은 Fig. 6에 나타난 가력 프로그램에 따라 Drift ratio 0.25%부터 0.5%, 1.0%, 1.3%, 2.0%, 4.0% 순으로 계획한 입력변위에 대하여 2사이클씩 반복가력

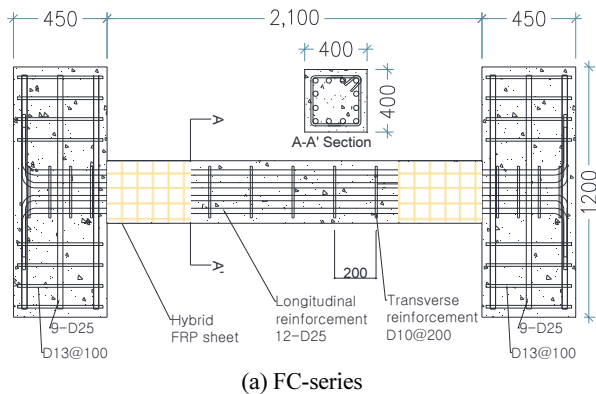


Fig. 4 Details of specimens (Unit : mm)

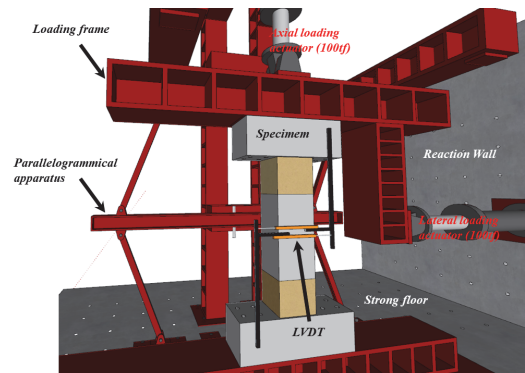


Fig. 5 Test setup of specimens

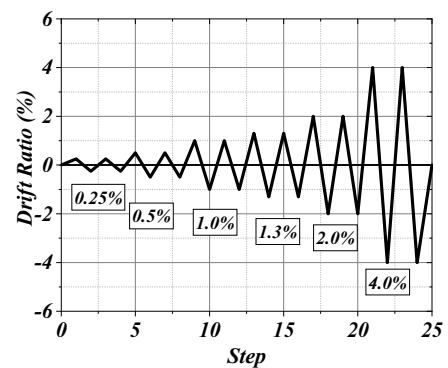


Fig. 6 Loading protocol

하였으며, 가력은 하중이 실험체의 최대강도의 85% 이하로 감소될 때까지 지속하였다.

3. 실험결과

3.1 하중-Drift ratio 관계

실험결과를 하중-Drift ratio 관계로 Fig. 7과 Table 3에 각각 나타내었다. 계측된 하중은 엑추에이터의 로드셀의 출력값을 사용하였으며, 변위는 Fig. 5에서 나타낸 상하단 스티브의 LVDT로부터 계측된 횡방향 변위의 평균값을 사용하였다.

Fig. 7(a)에 나타낸 바와 같이 실험체에 하이브리드 섬유시트를 보강하지 않은 FC-N(무보강) 실험체는 정방향의 245.83kN에서 소성힌지구간에 부착된 주철근의 변형률이 0.0025를 상회하여 휨 항복을 나타내었다. 이 연구에서는 주철근 항복하중 시의 항복변위 Δy 를 FC-N 실험체를 기준으로 21.0mm로 정하였으며, 그 시점의 Drift ratio를 $1\Delta y$ 로 실험을 수행하였다. 실험체의 최대 하중은 정방향의 Drift ratio 1.42%에서 251.89kN을 나타내었으며, 부방향의 Drift ratio 1.44%에서 -232.96kN을 나타내었다. 최대하중 이후 가력 사이클이 증가됨에 따라 실험체의 부착내력이 크게 저하되어 Drift ratio -3%에서 최대내력의 80%이하인 -186.37kN으로 저하되어 가력을 종료되었다.

실험체에 하이브리드 섬유시트(FRP)를 보강한 FC-FRP 실험체는 Fig. 7(b)에 나타낸 바와 같이 부방향의 Drift ratio -0.43%에서 -161.77kN 소성힌지구간에 부착된 주철근의 변형률이 0.0025를 상회하여 휨 항복을 나타내었다. 실험체의 최대 하중은 정방향의 Drift ratio 2.75%에서 266.05kN을 나타내었으며, 부방향의 Drift ratio -1.52%에서 -247.64kN을 나타내었다. 실험체의 내력은 최대하중 이후 가력 사이클이 증가됨에 따라 최대내력의 80%이하로 저하되어 가력이 종료되었다. 또한 SC-FRP 실험체는 SC-N 실험체에 비하여 최대하중 이후 하중저하가 두드러지지 않아 연성적인 거동을 나타내고 있음을 확인하였다.

Fig. 7(c)에 나타낸 바와 같이 실험체에 하이브리드 섬유시트를 보강하지 않은 FS-N(무보강) 전단 실험체는 정방향의 Drift ratio 1%에서 최대내력은 263.69kN으로 나타났다. 또한

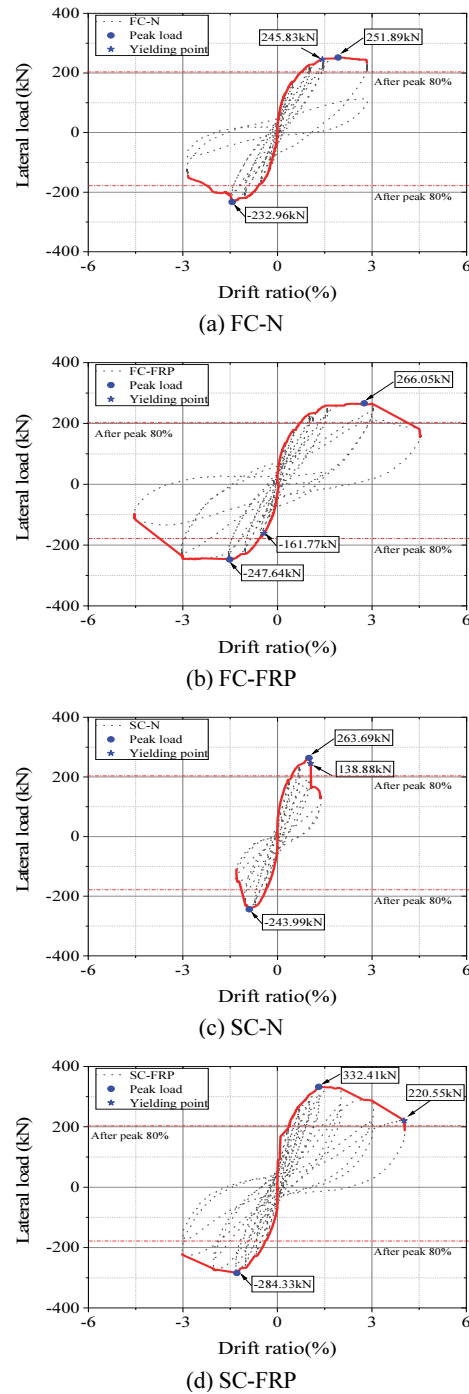


Fig. 7 Lateral load - drift ratio relationship

Table 3 Test result

Specimens	Yielding Load(kN)	Yielding Drift ratio	Maximum Load(kN)	Maximum Drift ratio	After Peak 80% Load(kN)	After Peak 80% Drift ratio	Failure modes	Yielding
FC-N	245.83	1.42	251.89	1.92	201.51	2.80	Flexural	Logitudinal
FC-FRP	-161.77	-0.43	266.05	2.75	210.85	3.11	Flexural	Logitudinal
SC-N	133.88	0.65	263.69	1.00	166.57	1.12	Shear	Shear
SC-FRP	220.55	4.02	332.41	1.31	-224.03	-3.02	Shear	Shear

부방향의 Drift ratio -0.89%인 -243.99kN일 때 최대내력을 확인하였다. 이후 중앙부의 경사균열로 인하여 내력이 급격하게 저하되어 실험체가 전단파괴 한 것을 확인하였다.

실험체에 하이브리드 섬유시트(FRP)를 보강한 SC-FRP 실험체는 Fig. 7(d)에 나타난 바와 같이 정방향의 Drift ratio 1.31% 인 332.41kN의 최대내력을 확인하였으며 부방향일 경우 Drift ratio -1.29%에서 -284.33kN일 때 최대 내력을 확인하였다. 실험체의 보강효과로 SC-FRP 실험체는 SC-N 실험체에 비하여 최대하중 이후 하중저하가 두드러지지 않아 연성적인 거동을 보임을 확인하였다.

3.2 균열양상

각 변수에 따른 실험체의 균열양상을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 무보강 FC-N 실험체의 균열은 주로 양단부 소성힌지 구간에 발생하였다. 이후 균열은 양단부 소성힌지 구간에 콘크리트 크러싱에 의해 전형적인 휨 파괴 양상을 나타 낸 것을 확인하였다. Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 하이브리드 시트로 보강된 FC-FRP 실험체는 시트 보강 구간 이외의 구간에서 균열이 두드러지게 나타났으며, FC-N 실험체와는 다르게 소성힌지구간의 하이브리드 시트 박락,

콘크리트의 박리가 나타나지 않았다. 이를 통하여 FC-FRP 실험체는 하이브리드 시트로 인하여 소성힌지구간이 효과적으로 형구속 되었음을 확인하였다.

전단실험체인 SC시리즈는 초기 휨 균열 이후 하중이 증가함에 따라 실험체 단부로부터 휨균열과 연결된 전단균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 전단균열의 폭은 점차 증가하였으며, 최대내력에서 전단균열 폭이 증가하며 파괴하였다. FRP를 보강한 실험체는 시트로 인해 균열양상을 정확하게 확인할 수 없으나 FRP를 보강하였을 때 전단저항과 균열 폭 제어에 충분히 기여하였으며 이는 Fig. 5(d)의 횡하중-Drift 관계로부터 확인 할 수 있다.

3.3 보강효과에 의한 영향

Fig. 9에는 기둥실험체의 하이브리드 섬유시트 보강효과를 확인하기 위한 포락곡선을 나타내었다. Fig. 9(a)에서 휨파괴 하는 기둥 실험체의 최대내력은 보강유무에 따라서 큰 내력 상승은 나타나지 않았지만 최대내력이 이후 FRP 하이브리드 섬유시트로 보강한 실험체가 최대내력 이후 80% 시점 내력저하의 시점이 Drift angle 4.5%에서 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 소성힌지 구간에 FRP 보강을 하였을 때 효과적으로

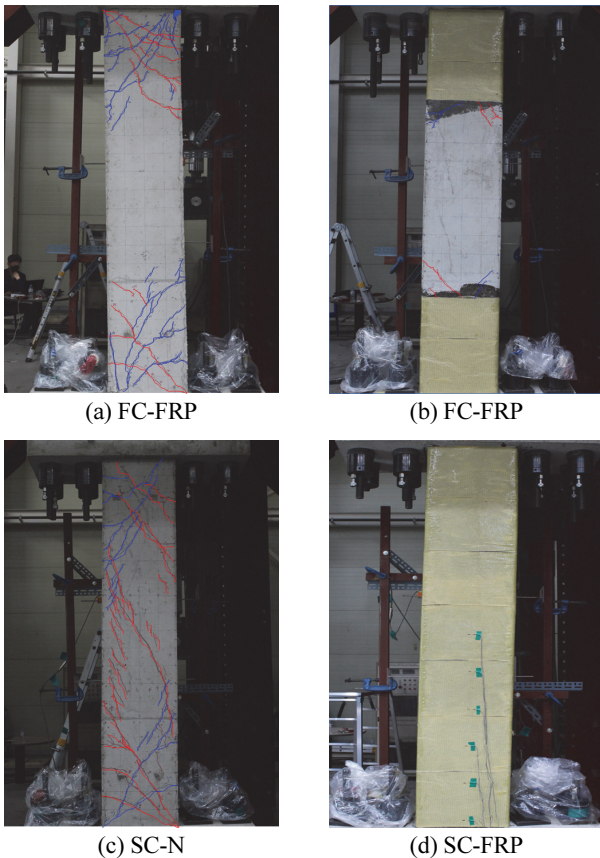


Fig. 8 Crack pattern of specimens

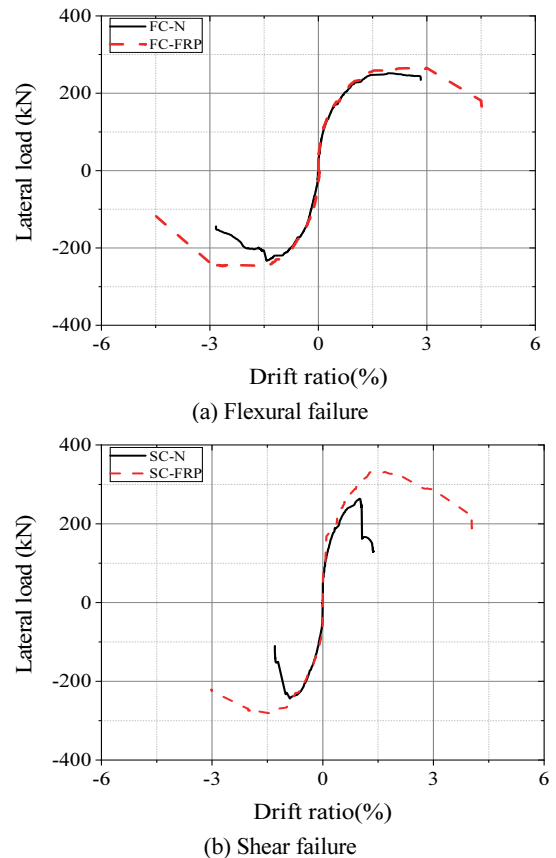


Fig. 9 Lateral load - drift ratio relationship

횡구속 능력을 발휘하여 연성능력이 개선되었다.

Fig. 9(b)에서 전단파괴 하는 기둥 실험체의 최대내력 및 보강 유무에 효과를 두드러지게 확인할 수 있다. 최대내력은 보강한 SC-FRP 실험체는 21%최대내력이 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 FRP 보강을 실험기간 전체 면적에 보강한 결과 최대내력과 연성 모두 또한 증가한 것을 실험결과로부터 확인할 수 있었다. 이는 FRP보강이 실험체의 전단균열에 효과적으로 저항하여 실험체의 내력과 연성이 상승하였기 때문이라고 판단된다.

4. 실험결과 분석

4.1 초기강성 및 2차 강성

철근콘크리트부재에서의 강성은 Priestley et al.(1996)이 제안한 변위 연성지수(μ_{Δ})평가방법을 이용하여 실험체의 초기 강성 및 2차 강성을 평가하여 Table 4에 나타내었다.

실험체의 초기 강성은 하중이 원점에서 직선으로 변화하는 기울기에서 주철근이 항복하는 시점의 하중-변위로 정의하였다. 또한 전단실험체의 초기강성은 하중-변위가 원점에서 직선으로 변화하는 기울기에서 최대내력의 75%에 대응하는 하중-변위로 정의하였다. 실험체의 2차 강성은 주철근의 항복 이후 그래프의 기울기가 저하하는 시점부터 최대하중의 하중-변위로 정의하여 2차 강성을 계산하였다. 또한 전단실험체인 경우 콘크리트 부재의 항복시 변위로 최대하중의 75%까지의 접선과 최대하중이 교차하는 시점의 변위이다.

실험체의 초기강성은 FC-N 실험체에서 8.24kN/mm, FC-FRP 실험체에서 17.91kN/mm로 소성힌지 구간에 FRP 시트를 보강한 실험체가 약 2.17배 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한 전단실험체인 SC-N 실험체에서 21.68kN/mm, SC-FRP 실험체에서 20.53kN/mm로 나타났다.

실험체의 2차강성은 모든 실험체에서 모두 유사하게 나타났다. FC-N 실험체는 6.25kN/mm, FC-FRP 실험체는 7.76kN/mm로 나타났다. 전단실험체인 SC-N 실험체에서 12.56kN/mm, SC-FRP 실험체에서 12.08kN/mm로 나타났으며 이는 하이브리드 섬유시트(FRP)가 기둥의 소성힌지 구간을 효과적으로

Table 4 Comparison of specimen stiffness

Specimens	Initial stiffness			Secondary stiffness		
	Load (kN)	Disp (mm)	Stiffness (kN/mm)	Load (kN)	Disp (mm)	Stiffness (kN/mm)
FC-N	245.83	29.82	8.24	251.89	40.32	6.25
FC-FRP	-161.77	-9.03	-17.91	-247.64	-31.92	7.76
SC-N	195.10	9.00	21.68	263.69	21.00	12.56
SC-FRP	250.65	12.21	20.53	332.41	27.51	12.08

횡구속하여 휨 항복 이후 소성힌지의 콘크리트 횡구속이 개선된 것으로 판단된다.

4.2 부재 연성능력

RC 기둥 부재에서 연성은 하중 저항능력의 큰 감소가 없이 변형을 유지할 수 있는 능력을 의미하며, 단면의 모멘트-곡률 관계 및 하중-변위 곡선 관계를 이용하여 나타낼 수 있다. 연성지수는 인장철근비, 압축철근비, 콘크리트 압축강도 및 횡보강근 비의 영향을 받는다. 선행연구결과에 따르면 RC 기둥부재의 연성지수는 횡보강근의 형상 및 간격, 축력비의 영향을 추가적으로 받는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 하이브리드 섬유 시트로 보강된 RC 기둥의 연성을 산정하기 위하여 식 (1)와 같은 변위연성지수를 사용하였다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{80}}{\Delta_y} \quad (1)$$

여기서 Δ_{80} 는 최대하중 이후 80%이하로 내력이 저하된 시점의 변위, Δ_y 는 인장철근이 항복변형률에 도달할 때 변위 또는 콘크리트 부재의 항복시 변위로 최대하중의 75%까지의 접선과 최대하중이 교차하는 시점의 변위이다.

Table 3에는 식 (1)를 통하여 산정된 실험체의 연성지수를 나타내었다. FC-N 실험체의 연성지수는 1.97, FC-FRP 실험체의 연성지수는 3.11 으로 나타났다. 이는 하이브리드 섬유시트(FRP)를 소성힌지 구간에 보강한 경우 소성힌지 횡구속 효과로 상대적으로 연성적으로 거동하였다고 판단된다.

4.3 에너지소산능력

에너지 소산능력은 연성지수와 함께 구조물이 지진과 같은 수평방향 반복하중에 대하여 구조물 또는 구조부재의 하중-변

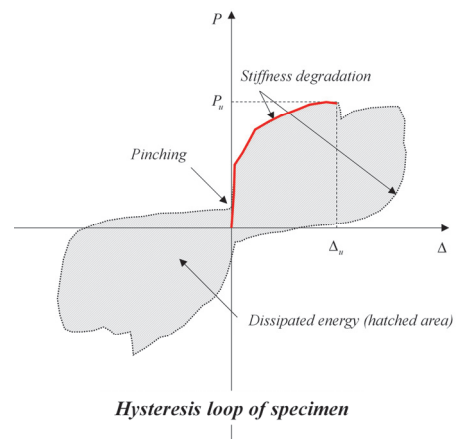


Fig. 10 Evaluation of energy dissipation using hysteresis curve

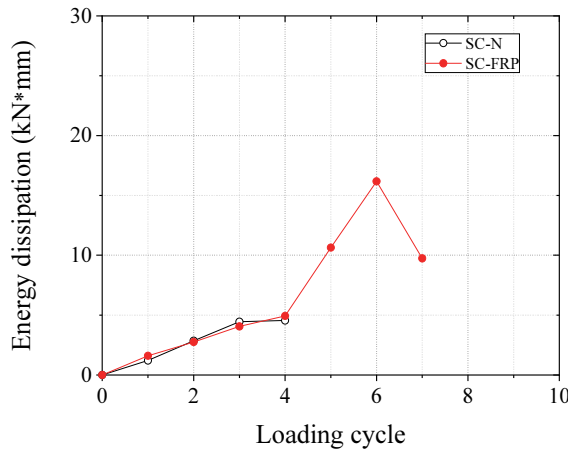


Fig. 11 Evaluation of energy dissipation the flexural specimen

위 이력곡선을 이용하여 구조물의 내진성능을 평가하는 지표로서 사용되고 있다. 통상의 철근콘크리트 구조부재는 취성적인 콘크리트와 연성적인 철근으로 구성되어 각각의 재료의 강도 및 단면형상, 철근비, 배근형상, 전단경간비, 하중조건 등에 따라 강성 및 강도의 저하, 편칭현상 등으로 인한 매우 복잡한 거동 특성을 나타낸다. 에너지 소산능력의 평가에 있어서는 인장지배 단면의 RC 부재에서도 파괴 시에는 전단 및 부착 파괴 등에 의한 급격한 내력 저하가 나타날 수 있어 파괴 이전까지의 비교적 안정된 이력거동 상태에서 부재의 에너지 소산능력을 평가하고 있다. RC 부재에 대한 에너지 소산능력의 평가는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 각 사이클당 하중-변위 이력곡선의 면적의 총합을 누적하여 평가할 수 있다. 이력곡선의 면적은 식 (2)을 이용하여 비교적 간단히 산출할 수 있다.

$$E_i = E_{i-1} + \Delta E_i, \Delta E = (P_i + P_{i-1})(\Delta_i + \Delta_{i-1})/2 \quad (1)$$

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = E_{i-1} + \Delta E_i \quad (2)$$

Fig.11과 Table 5에는 기둥 실험체의 에너지소산면적을 누적하였으며 실험체의 에너지소산면적을 횡하중-변위곡선의 싸이클의 모든 면적을 누적하여 분석하였다. 전단파괴 실험체인 SC-N 실험체는 누적에너지소산면적의 총합이 13.06kN·m를 나타내었으며, 하이브리드 섬유시트(FRP)를 보강한 FC-FRP 실험체는 FC-N(무보강) 실험체보다 약 3.82

Table 5 Comparison energy dissipation

Specime ns	Energy dissipation (kN.m)							Cumulative	Note
	1Δ _y	2Δ _y	3Δ _y	4Δ _y	5Δ _y	6Δ _y	7Δ _y		
SC-N	1.21	2.86	4.44	4.55	-	-	-	13.06	$\frac{FRP}{N}$
SC-FRP	1.60	2.75	4.05	4.93	10.64	16.18	9.74	49.89	3.82

배 높은 49.89kN·m 를 나타내었다. 하이브리드 섬유시트 (FRP)를 전구간에 보강한 경우 횡구속 효과로 인한 연성적인 거동을 확인하였다.

5. 결론

이 연구에서는 하이브리드 FRP 시트로 보강된 RC 기둥의 구조성능을 평가하는 연구를 수행하였으며, 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 하이브리드 섬유시트(FRP)로 소성힌지 구간을 보강한 휨 기둥 실험체(FC-FRP)의 최대내력은 무보강 기둥 실험체(FC-N)와 비교해 약 5.6% 증가된 반면, 소성힌지 구간의 콘크리트에 대한 횡구속 효과 증대로 연성능력은 11.0%, 누적 에너지 소산능력은 78.4% 향상되었다.
- 반복가력 실험 종료 시점에서 SC-N 실험체의 누적에너지 소산량은 13.06 kN.m 하이브리드 섬유시트(FRP)를 보강한 FC-FRP 실험체는 FC-N(무보강) 실험체보다 약 3.82배 높은 49.89kN·m 를 나타내었다. 하이브리드 섬유시트(FRP)를 전 구간에 보강한 경우 횡구속 효과로 인한 연성적인 거동을 확인하였다.
- 하이브리드 섬유시트(FRP)로 경간 전체를 보강한 전단 실험체(SC-FRP)의 최대내력은 무보강 실험체(SC-N)와 비교해 약 26% 증가하였다. 무보강 실험체는 최대내력 이후 전단 보강근의 항복에 의해 내력이 급격히 저하된 반면, FRP 보강 실험체는 최대내력 이후에도 내력이 서서히 감소하였다. 이는 하이브리드 섬유시트(FRP)가 전단 실험체의 복부에 발생한 전단균열에 효과적으로 저항하였기 때문으로 판단된다.
- FC-N 실험체의 연성지수는 1.97 FC-FRP 실험체의 연성지수는 3.11 으로 나타났다. 이는 하이브리드 섬유시트 (FRP)를 소성힌지 구간에 보강한 경우 소성힌지 횡구속 효과로 인한 연성적인 거동에 따른 요인으로 판단된다 이후 연구에서는 하이브리드 섬유시트와 FRCM용 무기계 매트릭스와 텍스타일 그리드와의 구조성능 평가를 계획할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2019R1A6A1A 03032988). 또한 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의도전연구기반지원사업임(2021R111A1A 0104726112).

References

1. Italian National Research Council (CNR). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. CNR-DT200 R1/2013, Rome.
2. ACI Committee 374 (2013), Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads, (ACI 374.1R-13), American Concrete Institute, Michigan.
3. ACI Committee 440 (2015), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15), American Concrete Institute, Michigan.
4. Chang, C. H., Kwon, M. H., Kim, J. S., and Joo, C. H. (2012), Numerical Study for Seismic Strengthening of RC columns Using Fiber Reinforced Plastic Composite, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 16(3), 117-127. (in Korean).
5. Choi, D. U., Kang, T. H. K., Ha, S. S., Kim, K. H., and Kim, W. S. (2011), Flexural and Bond Behavior of Concrete Beams Strengthened with Hybrid Carbon-Glass Fiber-Reinforced Polymer Sheets, *ACI Structural Journal*, 108(1), 90-98.
6. Denvid, L., and Hoat, J. P. (2010) Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams, *Engineering Structures*, 32(12), 3857-3865.
7. Grace, N. F., Abdel-Sayed, G., and Ragheb, W. F., (2002), Strengthening of Concrete Beams Using innovative Ductile Fiber Reinforced Polymer Fabric, *ACI Structural Journal*, 99(5), 692-700.
8. Ha, S. S., Choi, D. U., Lee, J. Y., and Kim, K. H. (2008), Pseudo-Ductile Hybrid FRP Sheet for Strengthening Reinforced Concrete Beams, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(2), 239-247. (in Korean).
9. Kim, J. S., Seo, H. S., Lim, J. H., and Kwon, M. H. (2014), An Performance Evaluation of Seismic Retrofitted Column Using FRP Composite Reinforcement for Rapid Retrofitting, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26(1), 47-55. (in Korean).
10. Korea Concrete Institute. (2017), Concrete Design Code, Kimoondang Publishing Company, 637pp. (in Korean).
11. Manders, P. W., and Bader, M. G. (1981), The Strength of Hybrid Class/Carbon Fibre Composites: Part 1-Failure Strain Enhancement and Failure Mode, *Journal of Material Science*, 16, 2233-2245.
12. Al-Salloum, Y. A., Elsanadedy, H. M., Alsayed, S. H., and Iqbal, R.A. (2012), Experimental and numerical study for the shear strengthening of reinforced concrete beams using textile reinforced mortar, *Journal of Composites for Construction*, 16(1), 74-90.
13. Phillips, L. N., (1976), The Hybrid Effect-Does it Exist. *Composites*, 7, 7-8.
14. Sim, J. S., Lee, K. S., Kwon, H. W., and Kim, H. J. (2014), Retrofitting Effects and Structural Behavior of RC Columns Strengthened with X-Bracing Using Carbon Fiber Anchor, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(3), 323-331. (in Korean).
15. Yoon, H. S., Lee, J. M., Lee, J. Y., Choi, D. U., and Kim, K. H. (2009), Bond Capacity of Pseudo-Ductile FRP Hybrid Sheet to Strengthen RC Members, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(1), 47-53. (in Korean).
16. Cho, M. S., Kim, M. J., Lee, J. Y., Jeong, C. Y., and Kim, K. H. (2020), Performance Evaluation of FRCM Inorganic Matrix for Repair and Reinforcement of Concrete Structures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 32(4), 333-339. (in Korean).
17. Kim, M. J., Kim, H. G., Lee, J. Y., Cho, M. S., and Kim, K. H. (2019), Evaluation of Flexural Performance of RC Columns Reinforced with Hybrid FRP Sheets, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 31(6), 611-618. (in Korean).
18. Korean Design Standard (2022), Design Code for Shear and Torsion of Concrete Structures (KDS 14 20 22), Korea Construction Standard Center, Seoul (in Korean).

Received : 11/29/2022

Revised : 12/21/2022

Accepted : 12/26/2022

요 지 : 이 연구는 하이브리드 섬유시트를 이용하여 보강된 철근콘크리트 기둥의 구조성능평가에 관한 연구이다. 내진보강 공법은 보강이 필요한 노후 콘크리트 구조물에 아라미드섬유와 PET섬유를 일축으로 배열하여 직조한 하이브리드 섬유시트를 에폭시로 함침하고, 이를 구조물에 부착시켜 보강 구조물의 내하력을 증진시키는데 그 목적이 있다. 특히, 강재보다 가벼운 섬유를 사용함으로써 얻어지는 재료의 경량화뿐만 아니라, 사용된 섬유 중 저장도고인성의 섬유요소가 고강도저인성 섬유요소의 취성적 파괴를 지연시켜 기존의 섬유보강 공법과 비교해 안전성 측면에서 우수하다. 연구는 구조실험과 그 결과에 대한 구조성능평가로 진행되었다. 총 4개의 실험체는 하이브리드 보강방법 및 파괴모드를 주요변수로 계획하였으며, 실험체 크기 및 가력조건 등은 기존연구에서 수행한 실험결과와 비교가 가능하도록 계획하였다. 실험체의 구조성능은 에너지소산능력, 연성평가등을 사용하여 평가하였다. 다음과 같은 분석을 통하여 하이브리드 섬유시트의 보강하였을 때 우수한 성능 결과를 보일 수 있다는 결론은 얻었다.

핵심용어 : 철근콘크리트 기둥, 아라미드, PET섬유, 하이브리드 섬유시트, 휨거동, 전단거동, 보강