

텍스타일 그리드 종류가 다른 FRCM 복합재를 적용한 철근콘크리트 보의 전단거동 평가*

Evaluation of Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with FRCM Composites with Different Textile Grid Types

공현** · 조민수*** · 임수아*** · 김동환*** · 김길희****

Hyun Kong** · Minsu Jo*** · Sua Lim*** · Donghwan Kim*** · Kilhee Kim****

Abstract

This paper presents the results of an experimental study to evaluate the shear behavior of reinforced concrete beams reinforced with FRCM composites using different types of textile grids. It was found that the shear behavior of reinforced concrete beams with FRCM composites was observed by comparing the strains measured in the stirrups and textile grids. It was found that the ultimate strength of the strengthened specimens increased compared to the basic specimens, and the failure mode at ultimate strength changed from shear failure to bending failure. When the shear strength design values of the KDS 14 20 22 and AIJ ultimate strength types were compared with the actual experimental values, it was found that the AIJ ultimate strength type was more accurate. In addition, the shear contribution of FRCM composites in the A and T models was compared, and the results showed that both models had similar trends. Reflecting these results, it is recommended that further studies should be conducted to calculate the shear performance of beam members with FRCM composites and the shear contribution of FRCM composites by using the stirrup reinforcement ratio and the type of textile grid as variables.

Keywords: FRCM Composites, Textile Grid, Shear Reinforcement, Stirrup, Failure Mode

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 구조물 노후화로 인한 철거 및 재시공이 경제 적·환경적인 문제 등을 초래하고 있으며, 1990년대

부터 외부 보강 적용을 위해 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 시스템을 사용해왔다(김영진 외, 2011; 김상우 외, 2021). 그러나 FRP 시스템의 유기계 매트릭스인 폴리머는 젖은 표면, 저온에 적용하기 어렵음과 투과성 및 콘크리트 기판과의 사용성 부족

*이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2019R1A6A1A03032988) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2023R1A2C3002443)의 지원을 받아 수행된 연구사업이며, 이 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(2022R1A6C102A907)을 받아 수행된 연구이며, 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2023-00239201)을 받아 수행된 기초연구사업임.

**공주대학교 건축공학과&도시융합시스템공학과 학석사연계과정(주저자: koh02134@gmail.com)

***공주대학교 스마트자연공간연구소 연구교수

****공주대학교 건축공학과&도시융합시스템공학과 교수(교신저자: kimkh@kongju.ac.kr)

등의 단점들이 있다(Al-Saioum et al., 2012). 이러한 이유로 단점들을 극복하기 위해 유기계 매트릭스를 대체하는 무기계 매트릭스를 사용한 FRCM(Fabric Reinforced Cementitious Matrix) 복합재에 관한 관심이 높아지고 있다.

FRCM 복합재란 시멘트질 매트릭스와 텍스타일 그리드로 이루어진 복합재 형태를 뜻하며, FRCM 복합재는 미세균열을 방지하기 어렵고 유기계 매트릭스에 비하여 부착성능이 낮다는 단점들이 있지만 장점으로 내화성 및 내구성이 우수하고 젖은 표면에 적용이 가능하며 보수 및 보강의 연속 시공이 가능하다는 점이 있다.

FRCM 복합재를 사용한 철근콘크리트 보의 전단 보강에 대한 연구 문헌에서 수집한 실험 결과의 데이터 베이스를 분석한 결과 FRCM 복합재는 전단 강도를 3%에서 최대 195%까지 증가시킬 수 있는 것으로 나타났으며, FRCM 복합재는 파괴유형을 전단 파괴에서 휨파괴 모드로 변경될 수 있다는 것을 나타내었다(Gonzalez-Libreros et al., 2017).

ACI 549.4R-13 기준(ACI Committee 549, 2013)(이하 A 모델)의 전단기여도 평가 방법은 유효변형률 ϵ_{eff} 를 FRCM 복합재의 직접인장시험을 통하여 측정된 극한변형률 $\epsilon_{FRCM,u}$ 의 0.004 이하로 제한하여 나타내었지만, Triantafillou and Papanicolaou 모델(Triantafillou et al., 2006)(이하 T 모델)은 유효변형률 ϵ_{eff} 를 섬유인장시험을 통하여 측정된 극한변형률 ϵ_{fu} 의 약 50%로 제한하여 FRCM

복합재의 의한 전단기여도(V_{FRCM})를 계산하였다.

이 논문에서는 텍스타일 그리드 종류가 다른 FRCM 복합재를 보강한 철근콘크리트 보의 전단거동에 대한 실험적 연구 결과를 제시하였다. 텍스타일 그리드 종류는 총 세 가지로 V-SBR, S-EPOXY 및 C-DRY 그리드를 사용하였다. 각 실험체의 최대내력, 처짐 및 최대내력 시 균열양상을 나타내었으며, 전단보강 근 및 텍스타일 그리드에서 측정된 변형률을 비교하여 전단거동을 관찰하였다. 전단강도 산정에 있어서 현행 설계기준 중 KDS 14 20 22(국토교통부, 2022) 및 AIJ 종국강도형(日本建築学会, 1990)에서 제시한 전단강도 산정식을 비교하여 나타내었으며, 앞서 제시한 A 모델 및 T 모델의 전단기여도 산정식을 비교 및 분석하였다.

2. 실험계획

실험체는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 보의 단면은 폭 250mm, 높이 400mm, 총 길이 2,600mm로 설계하였다. 보의 경간 길이는 1,940mm, 실험구간인 전단경간은 700mm로 전단경간비 a/d 를 2.0으로 설계하였다. 철근 배근의 경우 종방향 인장철근은 SD400 등급 D19 철근을 5개, 종방향 압축철근은 SD400 등급의 D10 철근을 2개, 횡방향 철근은 SD400 등급의 D10 철근을 200mm 간격으로 배근하였다.

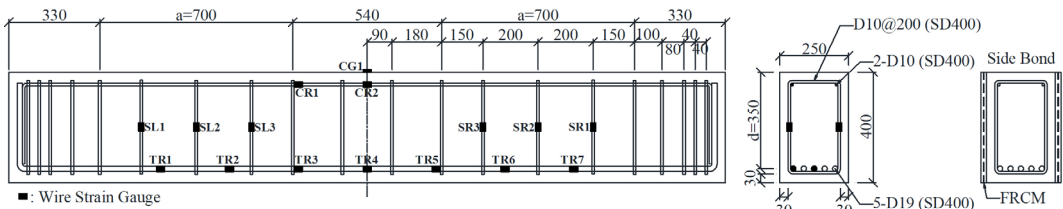


Fig. 1. Specimen Details (Dimensions in mm)

Table 1. List of Specimens

Specimens	Type of Textile Grid	a/d	f_{ck} (MPa)	Longitudinal Rebar			Transverse Rebar		
				Steel bar	f_y (MPa)	ρ_{long}	Steel bar	f_{wy} (MPa)	ρ_w
B-N	-								
B-V.S	V-SBR*	2.0	21.93	5-D19	450	0.016	D10 @200	466	0.00285
B-S.E	S-EPOXY*								
B-C.D	C-DRY*								

Note: *Type of impregnation: SBR (Styrene Butadiene Rubbler), EPOXY, Unimpregnated (Dry)

a/d : Shear Span Ratio, f_{ck} : compressive strength of concrete, f_y : Longitudinal Rebar Tensile Strength, f_{wy} : Transverse Rebar Tensile Strength, ρ_{long} : Longitudinal Rebar Ratio, ρ_w : Transverse Rebar Ratio

Specimens Name: A (Beam)-B (Textile Grid)

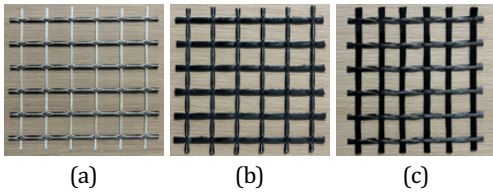


Fig. 2. Types of Textile Grids: (a) V.S, (b) S.E, (c) C.D

2.1 재료

Table 1에 나타난 것과 같이 철근콘크리트 보를 제작하기 위해 설계 압축강도가 21MPa인 레미콘을 사용하였으며, 첫 번째 보 실험을 진행하기 직전에 KS F 2403에 따라 직경 100mm, 높이 200mm 크기의 표준 콘크리트 실린더 10개를 제작하여 콘크리트의 압축강도를 측정하였다. 표준 콘크리트 실린더의 평균 압축강도는 21.93MPa로 측정되었으며, 철근 인장시험 결과 D10 철근의 항복강도는 450MPa, D19 철근의 항복강도는 466MPa로 측정되었다.

FRM 복합재를 이용하여 철근콘크리트 보를 보강하기 위해 탄소섬유에 각각 다른 함침제가 사용된 텍스타일 그리드를 사용하였다. Fig. 2는 각 세 가지 종류의 텍스타일 그리드 형태를 나타내었다. V-SBR 섬유는 독일 제조업체의 V.FRAAS 섬유에 SBR 함침제를 적용하였으며, S-EPOXY 섬유는 독일 제조업체의 SOLIDIAN 섬유에 EPOXY 함침제가 사용되었다. C-DRY 섬유는 중국 업체의 함침을 시키지 않은 탄소

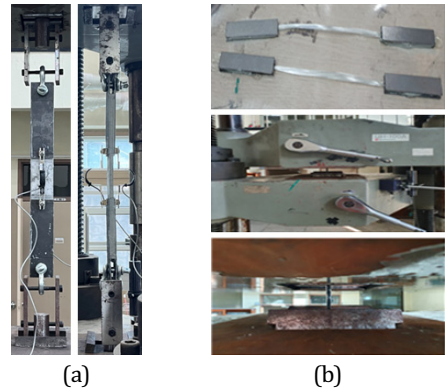


Fig. 3. Tensile Test: (a) FRM Composites Tensile Test, (b) Roving Tensile Test (Textile Grid)

Table 2. Mechanical Properties of FRM Composites

Type of Textile Grid	A_f (mm ²)	f_{FRM} (MPa)	E_{FRM} (GPa)	ϵ_{FRM} (%)
V.S	1.856	1008	333	0.27
S.E	1.856	2122	372	0.52
C.D	0.856	757	89	0.82

A_f : Cross-Sectional Area of Textile Grid, f_{FRM} : Tensile Strength of FRM Composites, E_{FRM} : Elastic Modulus of FRM Composites, ϵ_{FRM} : Ultimate Strain of FRM Composites

섬유를 사용하였다.

Fig. 3(a) 및 Table 2는 직접인장시험을 통하여 측정된 FRM 복합재의 재료 특성을 나타내었으며, 직접인장시험은 시멘트질 매트릭스와 텍스타일 그리

Table 3. Mechanical Properties of Textile Grids

Type of Textile Grid	A_f (mm^2)	f_f (MPa)	E_f (GPa)	ϵ_{fu} (%)
V.S	1.856	1758	147	1.20
S.E	1.856	2500	220	1.14
C.D	0.856	1291	87	1.48

A_f : Cross-Sectional Area of Textile Grid, f_f : Tensile Strength of Textile Grid, E_f : Elastic Modulus of Textile Grid, ϵ_{fu} : Ultimate Strain of Textile Grid

드의 슬립을 고려하여 측정된 FRCM 복합재의 재료 특성이다. Fig. 3(b) 및 Table 3은 섬유 로빙의 인장 시험을 통해 측정된 재료 특성을 나타내고 있으며, 섬유 로빙 자체의 인장시험을 통하여 섬유의 파단까지 측정된 섬유의 재료 특성을 나타내고 있다(조민수, 2022).

Table 4는 FRCM 복합재에 사용된 모르타르의 배합을 나타내었으며, Table 5는 무기계 매트릭스의 재료 특성이다.

2.2 보강방법

FRCM 복합재는 철근콘크리트 보의 전단경간 위치에 측면 부착 방법으로 보강되었다. 보강은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 FRCM 복합재를 부착하기 전 표면정리를 한 후 5mm 두께의 1차 매트릭스(시멘트 모르타르)를 도포하였다. 그 후 텍스타일 그리드를

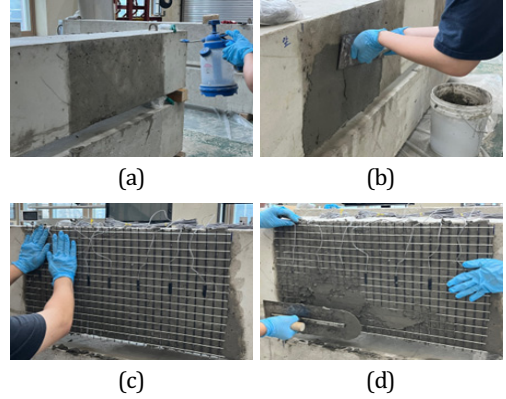


Fig. 4. Reinforcing Methods: (a) Surface Cleanup, (b) Apply the First Matrix, (c) Attaching a Textile Grid, (d) Apply the Second Matrix

부착한 후 5mm 두께의 2차 매트릭스(시멘트 모르타르)를 텍스타일 그리드 위에 도포하여 마무리하였다. 보강실험체는 FRCM 복합재를 보강 완료 후 미세균열을 방지하기 위해 표면에 물을 도포하고, 비닐을 덮어 28일 양생 후에 실험을 진행하였다.

2.3 계측 및 가력 방법

보강이 완료된 보 실험체는 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 공주대학교 스마트자연공간연구센터에서 보유된 1,000kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 단순지지 보 형태의 4점 가력을 실시하였다. 가력지점사이의 거리는 540mm로 하였으며, 가력지점

Table 4. Inorganic Matrix Mixing Ratio

Mix No.	W/B (%)	Composition of Binder by Weight (%)							
		C ¹⁾	GGBS	S.F	S ²⁾	PVA ³⁾	EVA ⁴⁾	AD ⁵⁾	W
FRCM	42.5	42.0	2.0	1.0	49.81	0.2	0.2	4.79	17.0

Note: 1) C: Cement, 2) S: Sand, 3) PVA: Polyvinyl Alcohol, 4) EVA: Ethylene vinylacetate, 5) AD: Admixture

Table 5. Mechanical Properties of Inorganic Matrix (Age 28 Days)

Mix No.	Flow (mm)	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Adhesive Strength (MPa)
FRCM	188	66.9	11.2	1.6

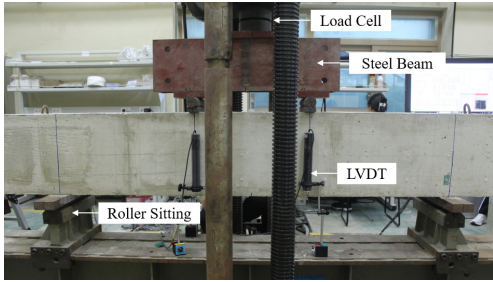


Fig. 5. Test Setup

하부에 처짐을 측정하기 위해 100mm 변위 용량의 LVDT 4대를 설치하여 변위의 평균값을 측정하였다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 실험구간 내의 종방향 철근, 횡방향 철근 및 텍스타일 그리드의 변형률은 변형률 게이지를 통해 측정하였다. 종방향 인장철근 (TR)의 경우, 중앙부에서 250mm 간격으로 14개, 압축철근(CR)은 중앙부에서 250mm 간격으로 4개 부착하였으며, 횡방향 철근(SL, SR)의 경우 좌·우측 실험구간 내의 총 6개 부착하였다. FRM 복합재의 경우 텍스타일 그리드 표면(F)에 100mm 간격으로 부착하였다.

3. 실험결과

3.1 하중-변위 관계

Fig. 6은 각각의 실험체에 대한 하중-변위 관계를 나타내었으며, Table 6에서 실험결과를 요약하여 나

타내었다. 기본실험체인 B-N 실험체를 제외하고는 각 보강실험체의 주철근의 변형률이 항복변형률을 상회하는 것을 확인하였다. B-N 실험체의 경우 실험구간 내에서 전단보강근이 항복 후 전단파괴하는 형태를 나타내었다. B-V.S 실험체는 보의 중앙부의 인장철근과 실험구간 내에서 전단보강근이 항복한 후 시멘트질 매트릭스와 텍스타일 그리드의 슬립이 관찰된 전단파괴 형태를 나타내었다. B-S.E, B-C.D 실험체는 전단보강근의 항복이 관찰되지 않았으며, 보 중앙부의 인장철근이 항복한 후 B-S.E 실험체는 보의 중앙부에서 콘크리트 압괴로 인하여 휨파괴가 나타났으며, B-C.D 실험체는 시멘트질 매트릭스와 텍스타일 그리드의 슬립이 관찰된 전단파괴 형태를 나타내었다. 모든 실험체의 강성은 유사하였으나, B-N 실험체에 비하여 FRM 복합재로 보강한 B-V.S,

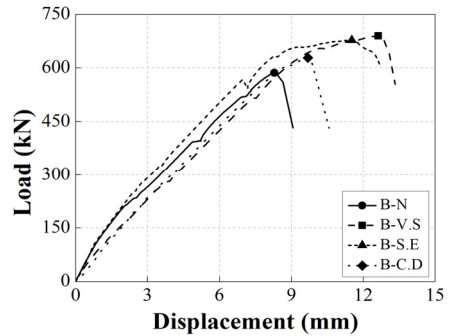


Fig. 6. Load-Displacement Relations

Table 6. Summary of Test Results

Specimens	P_{max} (kN)	V_{max} (kN)	Δ_{Pmax} (mm)	Gain in P_{max} (%)	V_{Mn}	$V_{pre,A}$	$V_{pre,T}$	$V_{max}/V_{pre,A}$	$V_{max}/V_{pre,T}$	Failure Mode
B-N	586.2	293.1	8.29	-						
B-V.S	689.6	344.8	12.62	17.63	Shear: Slip					
B-S.E	677.5	338.8	11.52	15.57	Concrete Crushing					
B-C.D	628.2	314.1	9.69	7.16	307.4	298.5	1.02	1.05	Shear: Slip	

Note: P_{max} : Ultimate Load, V_{max} : Ultimate Shear Strength, Δ_{Pmax} : Deflection at Ultimate Load, V_{Mn} : Shear Strength at Design Ultimate Bending Moment, $V_{pre,A}$: Design Shear Strength (A Model), $V_{pre,T}$: Design Shear Strength (T Model)

B-S.E, B-C.D 실험체의 최대내력과 최대내력 시 처짐이 증가하였다.

Table 6에 B-N 실험체의 휨 해석을 통하여 계산된 V_{Min} 과 실제 전단강도인 V_{Max} 를 비교하였을 때 거의 유사한 값을 나타내고 있지만, 전단파괴로 나타났다. 보강실험체는 전단보강을 하였기 때문에 휨강도를 정량적으로 산정할 수 없지만, 휨파괴로 나타난 B-S.E 실험체의 경우 FRCC 복합재의 전단보강으로 인하여 전단강도가 높게 증가되어 휨파괴로 파괴모드가 변경된 것으로 판단된다.

3.2 파괴모드 및 최종파괴 시 균열양상

각 실험체의 최종파괴 시 균열양상은 Fig. 7에 나타내었다. B-N 실험체는 실험구간 내에서 전형적인 전단파괴의 형태를 나타내었다. B-V.S 및 B-C.D 실험체 또한 전단 구간 내에서 시멘트질 매트릭스와 텍

스타일 그리드의 슬립이 관찰된 전단파괴의 형태를 나타내었으며, B-S.E 실험체는 실험구간 내에서 대각선 균열이 발생하였지만, 보 중앙 상부에서 콘크리트 압괴로 인한 휨파괴로 파괴모드가 변경된 것을 확인할 수 있다.

3.3 변형을 비교

Fig. 8은 하중과 전단보강근의 변형을 관계를 나타내었다. 여기서 변형률은 전단파괴가 나타난 위치의 변형률 게이지 값을 사용하였으며, 휨파괴로 나타난 B-S.E 실험체의 경우 양쪽의 전단 구간 중 비교적 높은 기여도를 나타낸 위치의 변형률 게이지 값을 사용하였다. 전단보강근의 위치 및 최종파괴 시 균열양상이 그림에 포함되어 있다. 각 실험체의 전단보강근 최대변형률은 가력지점과 가까운 위치에 배근된 전단보강근에서 나타났으며, 그림에 나타난 것과

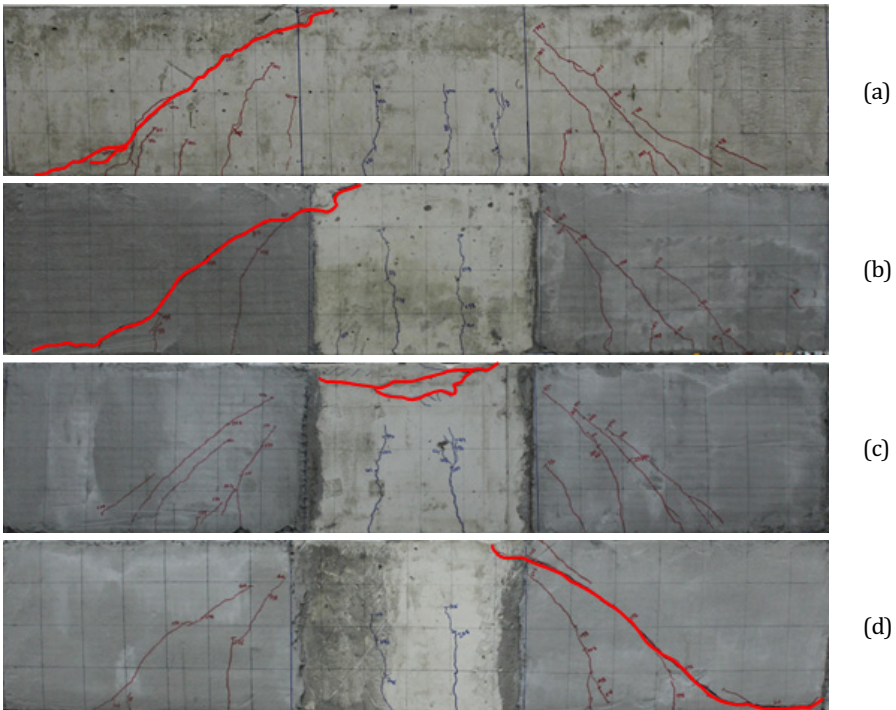


Fig. 7. Failure Mode of Beam: (a) B-N, (b) B-V.S, (c) B-S.E, (d) B-C.D

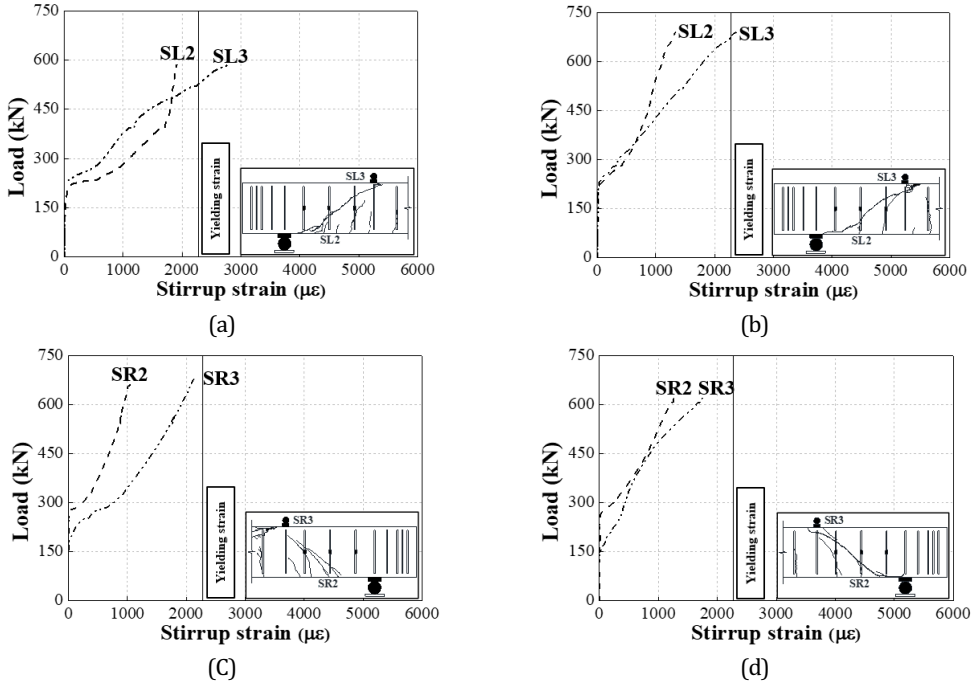


Fig. 8. Load-Strain Relations of Stirrups: (a) B-N, (b) B-V.S, (c) B-S.E, (d) B-C.D

같이 전단보강근이 한 가닥 이상 대각선 균열과 교차하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(a)는 B-N 실험체의 하중과 전단보강근 변형률 관계를 나타냈으며, 가력지점과 가까운 SL3 위치의 전단보강근이 항복점에 도달한 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)의 B-V.S 실험체 또한 SL3 위치의 전단보강근이 항복점에 도달하였다. Fig. 8(c)의 B-S.E 실험체의 경우 전단보강근이 항복하지 않았으며, 보 중앙부에서 콘크리트 압괴가 선행되었다. Fig. 8(d)의 B-C.D 실험체는 전단보강근이 항복하지 않았음에도 전단파괴의 형태를 나타내었다.

Fig. 9는 하중과 텍스타일 그리드의 변형률 관계를 나타내었다. 텍스타일 그리드에 부착한 게이지 위치와 최종파괴 시 균열양상이 그림에 포함되어 있다. 텍스타일 그리드의 변형률은 대각선 균열의 위치와 교차되는 변형률 게이지 측정값이 큰 변형률 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)는 B-V.S 실험체의 하중-텍스타일 그리드 변형률 관계를 나타냈으며, 주 전단균열이 교차되는 F5, F6 위치의 텍스타일 그리드가 전단에 기여한 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9(b)의 B-S.E 실험체는 실험구간에 대각선 균열과 교차되는 F9, F10 위치의 텍스타일 그리드가 전단에 기여한 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(c)의 B-C.D 실험체 또한, 주 전단균열과 교차되는 F10, F11 위치의 텍스타일 그리드가 전단에 기여한 것을 나타내었지만, B-V.S 및 B-S.E 실험체에 비해 변형률 값이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

따라서, B-S.E 실험체의 경우 S-EPOXY 그리드 보강으로 인한 전단내력이 증가되어 보 중앙부의 콘크리트 압괴로 인한 휨파괴로 파괴모드가 변경된 것을 확인할 수 있었다. B-C.D 실험체는 전단보강근이 항복하지 않았으며, 텍스타일 그리드의 변형률이 가장 적게 증가한 것으로 보아 실험구간 내의 보 복부 콘

크리트 압괴로 판단할 수 있다.

각 실험체의 섬유 보강 효과가 다른 이유는 B-S-E 실험체의 경우 Table 2 및 Table 3에 나타낸 것과 같이 섬유의 단면적과 탄성계수의 값이 가장 큰 S-E 섬유 보강으로 인하여 보 복부에서 작용하는 FRCM 복합재의 전단내력이 크게 증가하였고, 그로 인하여 B-S-E 실험체의 전단내력이 휨내력보다 증가하게 되어 휨파괴로 파괴모드가 변경되었다. 또한, 함침

되지 않은 섬유를 사용한 B-C-D 실험체의 경우 함침된 V.S 및 S.E 섬유보다 C.D 섬유의 단면적과 탄성계수가 가장 낮기 때문에 FRCM 복합재의 전단기여도가 비교적 낮게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

4. 실험결과 분석

4.1 KDS 14 20 22 및 AIJ 중국강도형 전단강도 산정식 비교

기본실험체의 전단강도를 예측하기 위해 KDS 14 20 22 및 AIJ 중국강도형 기준의 전단강도 산정식을 통하여 계산하였으며, Fig. 10은 기본실험체의 하중과 변위 관계 그래프에 KDS 14 20 22 및 AIJ 중국강도형의 전단강도 설계값과 비교하여 나타내었다.

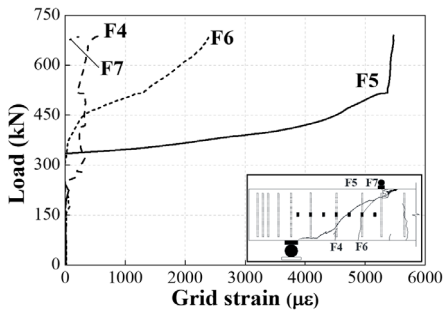
KSD 14 20 22 기준의 경우 식 (1)과 같이 콘크리트의 전단기여도와 전단보강근의 전단기여도의 합으로 나타내고 있다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

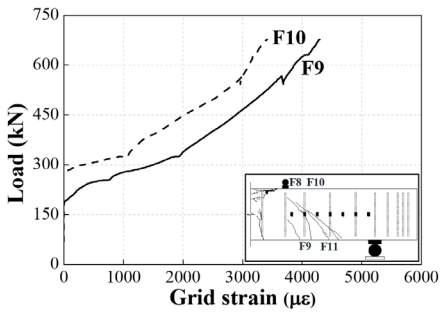
$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d: \text{콘크리트의 전단기여도}$$

$$V_s = \frac{A_{sw} f_{wy} d}{s}: \text{전단보강근의 전단기여도}$$

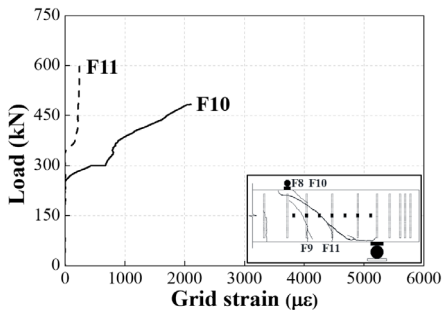
여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, b_w 는 보의 폭, d



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Load-Strain Relations of Textile Grids: (a) B-V.S, (b) B-S.E, (c) B-C.D

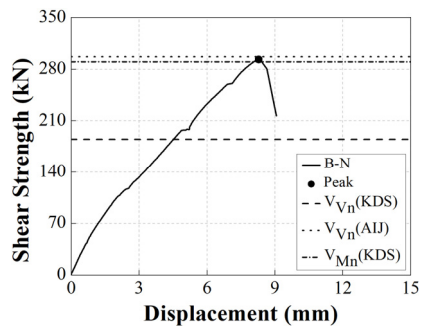


Fig. 10. Comparison of Maximum Shear Strength with Prediction Strength

는 보의 유효깊이이며, A_{su} 는 전단보강근의 단면적, f_{wy} 는 전단보강근의 항복강도, s 는 전단보강근의 배근 간격이다.

AIJ 중국강도형 기준의 경우 식 (2)와 같이 트러스 작용에 의한 부담전단력과 아치 작용에 의한 부담전단력의 합으로 나타내고 있다.

$$V_n = V_t + V_a \quad (2)$$

$$V_t = b j_t \rho_w f_{wy} \cot \phi$$

: 트러스 작용에 의한 부담전단력

$$V_a = (\nu f_{ck} - \sigma_t) \tan \theta \cdot b (h/2)$$

: 아치 작용에 의한 부담전단력

여기서, b 는 보의 폭, h 는 보의 높이, l 은 보의 길이, j_t 는 주철근의 중심간 거리, ρ_w 는 전단보강근의 철근비, f_{wy} 는 전단보강근의 항복강도, ϕ 는 콘크리트 압축응력의 부재축에 대한 각도이며, ν 는 콘크리트 압축강도의 유효계수, σ_t 는 $(1 + \cot^2 \phi) \rho_w f_{wy}$ 로 계산되며 콘크리트의 압축응력을 나타내며, $\tan \theta$ 는 $\sqrt{(l/h)^2 + 1} - l/h$ 로 계산된다.

Fig. 10에 나타낸 그래프와 같이 실제 실험값과 KDS 14 20 22 기준 및 AIJ 중국강도형 기준을 비교해보았을 때 AIJ 중국강도형으로 계산한 전단강도 설계값이 비교적 잘 예측하는 것으로 확인할 수 있다. 이러한 이유는 본 연구 실험체의 전단경간비(a/d)가 2.0으로 설계되어 콘크리트와 전단보강근의 전단기여도로 계산된 KDS 14 20 22기준보다 트러스와 아치 작용을 고려하여 계산된 AIJ 중국강도형 기준이 본 연구 실험체의 실제 실험값과 거의 유사한 값을 나타낸 것으로 판단된다.

4.2 기존 모델을 적용한 FRCM 복합재의 전단기여도 산정식 비교

앞서 AIJ 중국강도형 기준으로 계산한 전단강도 산정식을 통하여 FRCM 복합재로 보강한 실험체의

전단강도는 다음 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$V_n = V_t + V_a + V_f \quad (3)$$

V_f 는 A 모델과 T 모델을 적용하여 계산하였다.

먼저 A 모델의 경우 다음 식 (4)와 같이 나타내고 있다.

$$V_f = n A_f \sigma_{eff} d \quad (4)$$

여기서, n 은 보강재의 레이어 수, A_f 는 단위 폭 당 FRCM 복합재의 면적, d 는 보의 유효 깊이이며, σ_{eff} 는 FRCM 복합재의 유효 응력으로 $E_{frcm} \epsilon_{eff}$ 로 계산할 수 있다. E_{frcm} 과 ϵ_{eff} 는 앞에서 언급하였던 직접인장시험을 통하여 측정된 FRCM 복합재의 재료 특성을 사용하여 계산할 수 있다. ϵ_{eff} 는 $\epsilon_{eff} = \epsilon_{frcm, u} \leq 0.004$ 로 FRCM 복합재의 극한변형률 $\epsilon_{frcm, u}$ 를 0.004로 제한되고 있다는 점을 주목해야 한다.

T 모델의 경우 다음 식 (5)와 같이 나타내고 있다.

$$V_f = \rho_f \sigma_{eff} b_w d_f \quad (5)$$

여기서, ρ_f 는 FRCM 복합재의 보강비, b_w 는 보의 폭, d_f 는 유효깊이로 $0.9d$ 로 계산할 수 있으며, σ_{eff} 는 FRCM 복합재의 유효응력으로 $0.5 E_f \epsilon_{fu}$ 로 계산할 수 있다. T 모델의 경우 A 모델과는 다르게 E_f 와 ϵ_{fu} 는 섬유인장특성시험을 통하여 측정된 섬유의 재료 특성을 사용하여 계산되며, FRCM 복합재의 유효응력 식과 같이 섬유의 극한변형률을 50%만 반영하여 계산된다는 차이점이 있다.

따라서, A 모델과 T 모델의 식을 각각 식 (3)에 대입하여 각 보강한 실험체의 전단강도를 계산하여 Fig. 11 및 Table 6에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 A 모델을 적용하여 계산한 결과, 휨파괴로 파괴모드가 변경된 B-S.E 실험체를 제외하고 나머지 B-V.S 및 B-C.D

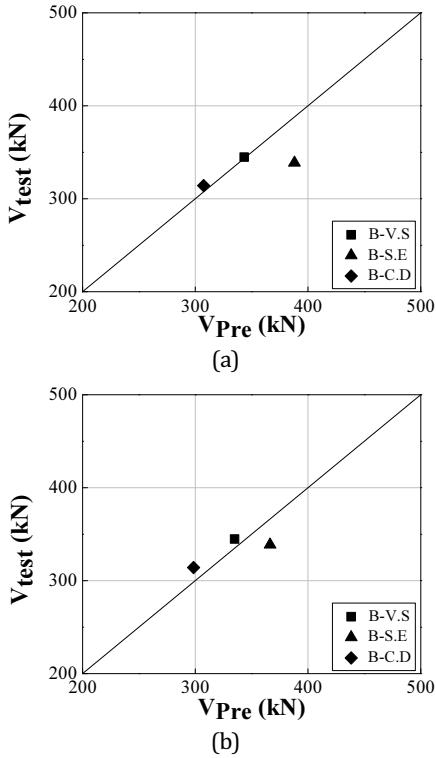


Fig. 11. Comparison of V_{Pre} with V_{test} : (a) A Model, (b) T Model

실험체는 Table 6에 나타난 것과 같이 V_{max}/V_{pre} 의 값이 1.00 및 1.02로 실제 실험값과 유사한 값을 나타내었다. 또한, Fig. 11(b)의 T 모델을 적용한 결과 B-V.S, B-C.D 실험체도 각각 1.03 및 1.05의 값으로 실험값과 유사한 값을 나타내었다.

5. 결론

이 논문은 텍스타일 그리드 종류에 따른 FRCM 복합재로 보강한 철근콘크리트 보의 전단거동 평가를 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 실험결과에 따르면 B-N 실험체에 비해 텍스타일 그리드 종류에 따라 B-V.S, B-S.E 및 B-C.D 실험체의 최대내력 및 처짐이 증가하는 것으로 나타났습니다.

- (2) B-V.S 및 B-S.E 실험체는 유사한 거동을 나타내었지만, B-S.E 실험체는 최대내력 시 콘크리트 압괴로 인한 휨파괴로 파괴모드가 바뀐 것을 확인할 수 있다. 이는 V-SBR 그리드보다 S-EPOXY 그리드로 인한 전단에 대한 기여도가 더 크게 증가하는 것으로 판단된다.
- (3) KDS 14 20 22 및 AIJ 중극강도형의 전단강도 산정식 비교 결과, 전단경간비(a/d)가 2.0으로 설계되어 콘크리트와 전단보강근의 기여도로 계산하는 KDS 14 20 22의 전단강도 산정식보다 트러스, 아치 작용으로 계산되는 AIJ 중극강도형의 전단강도 산정식이 더욱 유사한 값을 나타내었다.
- (4) A 모델 및 T 모델의 FRCM 전단기여도 산정식 비교 결과, FRCM 복합재의 물리적 특성을 고려한 A 모델과 텍스타일 그리드의 물리적 특성을 고려한 T 모델의 전단기여도 산정값 모두 유사한 경향을 나타내었다.

참고문헌

1. 국토교통부(2022), 「KSD 14 00 00 : 2022 구조설계 기준」, 세종.
2. 김상우, 김진우, 김진섭(2021), “격자형 탄소섬유강화플라스틱의 외부부착 보강에 따른 철근 콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 실험적 연구”, 「LHI Journal」, 12(4): 119~125.
3. 김영진, 박승희, 진규남, 이창길(2011), “셀프센싱 시계측 기반 CFRP보강 콘크리트 구조물의 손상검색”, 「LHI Journal」, 2(4): 407~413.
4. 조민수(2022), “FRCM 복합재를 이용한 철근콘크리트 부재의 보강 성능 평가”, 박사학위논문, 공주대학교.
5. 日本建築学会(1990), 「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」, 日本.
6. ACI Committee 549 (2013), *Guide to Design and*

- Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures*, Michigan: American Concrete Institute.
7. Al-Saioum, Y. A., H. M. Elsanadedy, S. H. Alsayed and R. A. Iqbal (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.
 8. Gonzalez-Libreros, J. H., C. Sabau, L. H. Sneed, C. Pellegrino and G. Sas (2017), "State of Research on Shear Strengthening of RC Beams with FRCM Composites", *Engineering Structures*, 149: 444~458.
 9. Triantafillou, T. C. and C. G. Papanicolaou (2006), "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets", *Materials and Structures*, 39: 93~103.

요약

이 논문은 텍스타일 그리드 종류가 다른 FRCM 복합재를 적용한 철근콘크리트 보의 전단거동을 평가하기 위해 실험적 연구 결과를 제시하였다. 세 가지 종류의 텍스타일 그리드를 사용하여 각 실험체의 최대내력, 최대내력 시 처짐 및 파괴모드를 나타내었다. 또한, 전단보강근 및 텍스타일 그리드에서 측정된 변형률을 비교하여 FRCM 복합재가 보강된 철근콘크리트 보의 전단거동을 관찰하였다. FRCM 복합재를 보강한 실험체 모두 기본실험체에 비하여 최대내력이 증가하였으며, 최대내력 시 파괴모드가 전단파괴에서 휨파괴로 변경된 것을 확인할 수 있었다. 현행 전단강도 설계 기준 중에서 KDS 14 20 22 및 AIJ 중국강도형의 전단강도 설계값을 실제 실험값과 비교하였을 때, AIJ 중국강도형의 전단강도 설계값이 더욱 유사한 것으로 나타났다. 또한, A 모델 및 T 모델의 FRCM 복합재의 전단기여도 산정식을 비교한 결과, A 모델 및 T 모델 모두 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 결과를 반영하여 전단보강근의 철근비 및 텍스타일 그리드의 종류를 변수로 하여 추가적인 연구를 통하여 더욱 정확한 FRCM 복합재를 적용한 보 부재의 전단성과 FRCM 복합재의 전단기여도 산정이 필요할 것으로 사료된다.

주제어: FRCM 복합재, 텍스타일 그리드, 전단 보강, 전단보강근, 파괴모드