



Sprayed FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 보강성능에 관한 연구

이강석^{1)*} · 손영선²⁾ · 이문성³⁾

¹⁾전남대학교 건축학부 ²⁾일본 도쿄대학교 생산기술연구소 ³⁾한양대학교 BK21 건축사업단

Structural Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Sprayed Fiber Reinforced Polymers

Kang Seok Lee^{1)*}, Young-Seon Son²⁾, and Moon-Sung Lee³⁾

¹⁾School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾Institute of Industrial Science, University of Tokyo 153-8505, Japan

³⁾BK21 Architectural Engineering Program, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT The main purpose of this study is to develop a sprayed FRP repair and strengthening method, which is a new technique for strengthening the existing concrete structures by mixing one of the carbon or glass chopped fibers and one of the epoxy or vinyl ester resins with high-speed compressed air in open air and randomly spraying the mixture onto the concrete surface. At present, the sprayed FRP repair and strengthening method using the epoxy resin has not been fully discussed. In order to investigate the material property of the sprayed FRP, this study carried out tensile tests of the material specimens, which were changed with the combinations of various variables including the length of chopped fiber and the mixture ratio of chopped fiber and resin. These variables were set to have the equal material strength, compared with that of one layer of the FRP sheet. As a result, the optimal length of glass and carbon chopped fibers was turned out to be 38 mm, and the optimal mixture ratio between chopped fiber and resin was also turned out to be 1 : 2 from each variable. And also, the thickness of the sprayed FRP to have the equal strength to one layer of the FRP sheet was finally calculated. In this study, a series of experiments were carried out to evaluate the strengthening effects of flexural beams, shear beams and damaged beams strengthened with the sprayed FRP method, respectively. The results revealed that the strengthening effects of the flexural and shear specimens were reasonably similar to those of the FRP sheet, and the developed Sprayed FRP technique is able to be used as a strengthening scheme of existing RC building.

Keywords : sprayed FRP, FRP, glass fiber, carbon fiber, epoxy

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 공용 기간 동안 외부 환경 조건 및 설계하중의 변화, 재료 특성에 기인된 하자, 구조 설계 오류, 시공 결함 등 다수의 원인에 의하여 구조 성능이 저하되어 구조물의 수명 단축 및 안전성을 저하시키고 있다. 다수의 원인에 의하여 발생된 철근콘크리트 구조물의 성능저하 부위는 보수·보강을 통하여 성능저하에 대한 저항성을 향상시키고, 부족한 내력 등 구조물의 안전성을 회복시켜야 한다.

이러한 콘크리트 구조물의 재래식 보수·보강 방법으로는 강판보강법, 철골브레이스보강법, 단면증설법, 벽체 신설법 등이 있으나, 보강으로 인한 중량 증가, 시공조건 및 정밀 시공 등이 요구되는 단점을 내포하고 있다. 이러한 재래식 보수·보강법의 단점을 극복하기 위해서 최근 내구성이 우수한 탄소섬유·유리섬유·아라미드섬유 등

의 경량의 복합 신소재를 이용한 FRP sheet 보강법 등이 널리 사용되어 지고 있다. 그러나 FRP sheet 보강법은 재료 자체가 갖는 이방성 문제, 사전 표면처리 작업 및 접합부 적용 시 시공성 문제, 비교적 고가의 소재를 사용함에 따른 경제성 문제가 야기되고 있어 현재 시공성 및 경제성이 탁월한 새로운 보강 기술의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구의 주 목적은 유리 및 탄소단섬유 (chopped fiber) 와 에폭시 및 비닐에스터수지 (resin)를 외기에서 혼합하여 요철이 많은 콘크리트 표면에 고속의 압찰 공기로 랜덤하게 분사하여 기존 콘크리트 구조물을 보강하는 새로운 공법, 즉 sprayed FRP 보수·보강 공법을 개발하는 것으로서, 국내·외적으로 sprayed FRP 공법에 관한 연구¹⁻³⁾는 극히 드물다. 특히 수지로서 에폭시를 사용한 연구는 전무하다. 본 연구에서는 sprayed FRP 보강을 위한 최적의 재료 물성치를 제시하고자 유리 및 탄소단섬유의 길이, 단섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지의 배합 비율 등을 주요 변수로 설정하여 재료 인장시험을 실시하였다. 또한, 상기 재료 시험 결과를 바탕으로 sprayed FRP 공법을 이용하여 보강된 휨 파괴가 진행되는 철근콘크리트 보

*Corresponding author E-mail : ksnlist@chonnam.ac.kr

Received October 23, 2006, Accepted January 30, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

(이하, 휨 보로 정의), 전단파괴가 선행하는 보 (이하, 전단보로 정의) 및 상기의 휨 및 전단보에 손상을 가한 뒤 보강을 실시한 보 (이하, 손상보로 정의)의 보강 성능을 실험적 연구를 토대로 평가하였다.

2. 연구 내용 및 방법

일반적으로 sprayed FRP 공법에서는 분사 후 속경화가 이루어지는 비닐에스터수지가 사용되고 있으나, 비닐에스터수지에 비해 고강도인 에폭시수지를 보강 재료에 도입하여 분사 두께를 낮추고 sprayed FRP 공법의 시공성을 향상시키고자 하였다. 본 연구에서는 유리 및 탄소단섬유 (Fig. 1 참조)와 에폭시 및 비닐에스터수지를 이용하여 현행 FRP sheet 1겹의 강도를 발휘하는데 필요한 단섬유와 수지의 배합 비율, 단섬유의 길이 등 각종 최적 물성치 제안 및 sprayed FRP 보수·보강 효과를 파악하기 위하여 재료 시험 및 구조 실험을 수행하였다. Sprayed FRP 보강용 기자재로는 Fig. 2에 나타난 B사의 제품을 사용하였다.

3. 실험

3.1 재료 시험

3.1.1 사용 재료 및 시험편 계획

현재 sprayed FRP 공법은 연구 단계로 재료 시험에 관한 규격이 따로 명시되어있지 않은 상황이다. 따라서 본

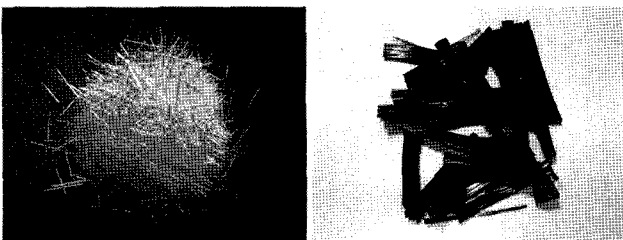


Fig. 1 Glass and carbon chopped fibers

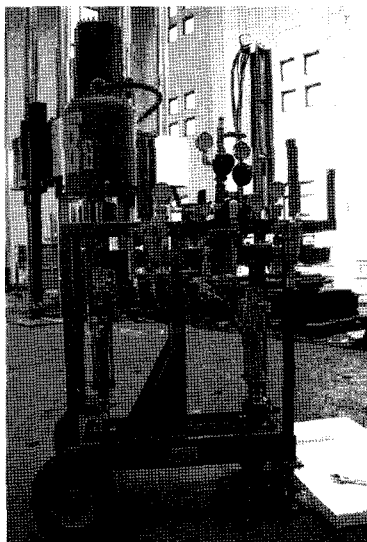


Fig. 2 Equipment for sprayed FRP

연구에서는 기존의 KS M 3381⁴⁾ 유리섬유 강화 플라스틱의 인장시험방법에 준하여 재료 시험을 계획하였다. 재료 시험에 사용된 보강 재료에는 로빙 (roving)타입 유리 및 탄소섬유와, 강도 비교용 시트 타입의 유리 및 탄소섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지로서 단섬유의 길이 및 섬유와 수지의 배합 비율을 변수로 이용하였으며, 재료 시험 변수와 각각의 물리적 특성은 Tables 1 및 2와 같다.

변수 중 유리단섬유의 경우, 단섬유의 길이 및 배합 비율의 조합에 따라 5개씩 총 120개의 시험편을 제작하였다. 탄소단섬유의 경우, 유리단섬유의 재료 시험 경험을 바탕으로 시공성 및 성능을 고려하여 28 및 38 mm의 단섬유 길이를 변수로 사용하여 총 40개의 시험편을 제작하였다.

시험편의 양생기간은 25°C의 외기에서 7일간의 경화를 완전경화로 가정하였으며, 시험편의 중심에 strain gauge를 붙여 50 kN 용량의 소형 만능시험기를 사용하여 인장강도를 측정하였다. 시험 속도는 규준에서 명시한 1±0.5 mm/min 속도 A를 사용하였다.

3.1.2 시험 결과 및 분석

각 변수별로 동일한 5개의 시험편으로 인장시험을 수행한 결과, 파괴 양상은 시험편의 중앙에서 양쪽으로 40 mm 내에 위치하는 평행 부분의 파단 및 물림 부분의 압괴로 나타났으며, 평행 부분 내에서 파단이 되는 시험편의 값을 최종 실험 결과로 사용하였다. Sprayed FRP 공법의 최적 재료 물성을 파악하기 위한 재료 시험을 수행한 결과, 단섬유의 길이가 길수록, 섬유와 수지의 배합 비율에서 섬유의 양이 증가할수록 인장강도가 증가하였으나, sprayed FRP 보강용 기자재의 chopper gun의 성능 및 시공성을 고려하여, 고강도이면서 섬유의 영킹이 가장 적다고 판단되는 sprayed FRP 보강을 위한 최적 물성치로

Table 1 Variables of material tests

Chopped fiber	Length (mm)	Ratio of mixture	
		Epoxy	Vinyl ester
Glass	14, 28, 38, 56	1:3, 1:2.5, 1:2	1:4, 1:3, 1:2
Carbon	28, 38	1:2.5, 1:2	1:3, 1:2

Table 2 Material properties

Material		Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Design thickness (mm)	
Fiber	Roving type Carbon [M company]	3,920	2.35×10^5	-	
	Sheet type	Glass [C company]	500	2.5×10^4	1
		Carbon [S company]	3,550	2.35×10^5	0.167
Resin	Epoxy [J company]	45	-	-	
	Vinyl ester [J company]	30	-	-	

서는 단섬유 길이는 38 mm, 배합 비율은 1:2로 각각 평가하였다.

본 연구에서 평가된 대표적인 최적 재료 시험 변수의 응력-변형률 곡선을 Fig. 3에 나타내었으며, 유리단섬유를 사용한 시험편은 연성 능력이 우수하고, 탄소단섬유를 사용한 시험편은 유리단섬유에 비해 고강도인 것으로 판명되었다. Table 3에는 평가된 sprayed FRP 구조체 보강을 위한 재료 시험의 결과 및 설계 두께를 나타내었으며, 설계 두께는 식 (1)을 이용하여, Table 2의 FRP sheet의 물성과 비교하여 FRP sheet 1겹과 동일한 인장강도를 가지기 위한 sprayed FRP의 분사 두께를 계산하였다.

$$\frac{\sigma_{FRP}}{\sigma_{SFRP}} \cdot T_{FRP} = T_{SFRP} \quad (1)$$

여기서, σ : 인장강도, T : 설계두께

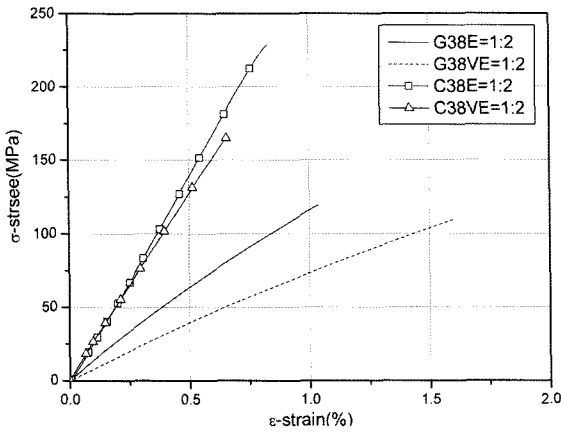


Fig. 3 Stress-strain relationships of glass and carbon chopped fibers and epoxy and vinyl ester resins

3.2 구조 실험

상기의 현행 FRP sheet 1겹의 강도를 발휘하는데 필요한 최적 재료 시험 결과를 바탕으로 sprayed FRP 공법으로 보강한 철근콘크리트 휨보, 전단보 및 손상보 (Fig. 4 참조)의 구조 거동에 대한 역학적 특성을 구명하기 위하여 구조 실험을 실시하였다. Fig. 5에 sprayed FRP 공법을 이용한 실험체의 보강 장면을 나타내었으며, Tables 4 및 5에는 본 실험체에 사용된 콘크리트와 철근의 재료성질을 각각 나타내었다.

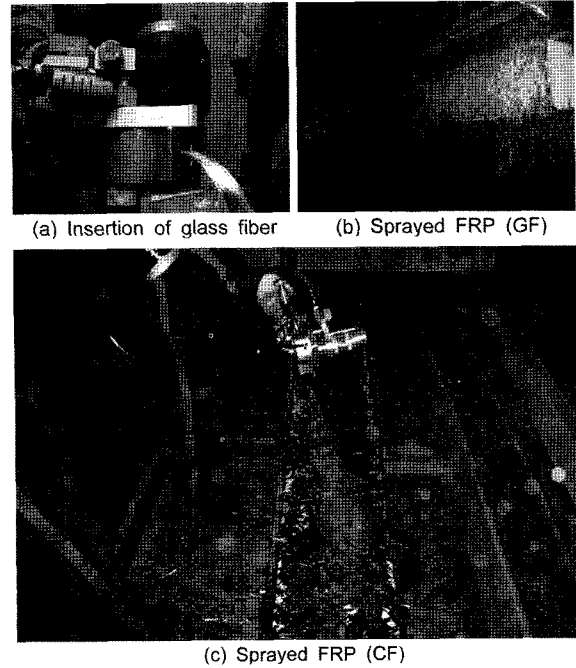


Fig. 5 Strengthening process of sprayed FRP

Table 3 Test results of specimens and sprayed FRP thickness for design

Specimen	Fiber	Resin	ϵ_t (%)	σ_t (MPa)	Design thickness (mm)
G38 : E = 1 : 2	Glass	Epoxy	0.833	119.305	4.2
G38 : VE = 1 : 2	Glass	VE	1.036	117.050	4.4
C38 : E = 1 : 2	Carbon	Epoxy	0.488	182.385	3.0
C38 : VE = 1 : 2	Carbon	VE	0.657	116.825	4.0

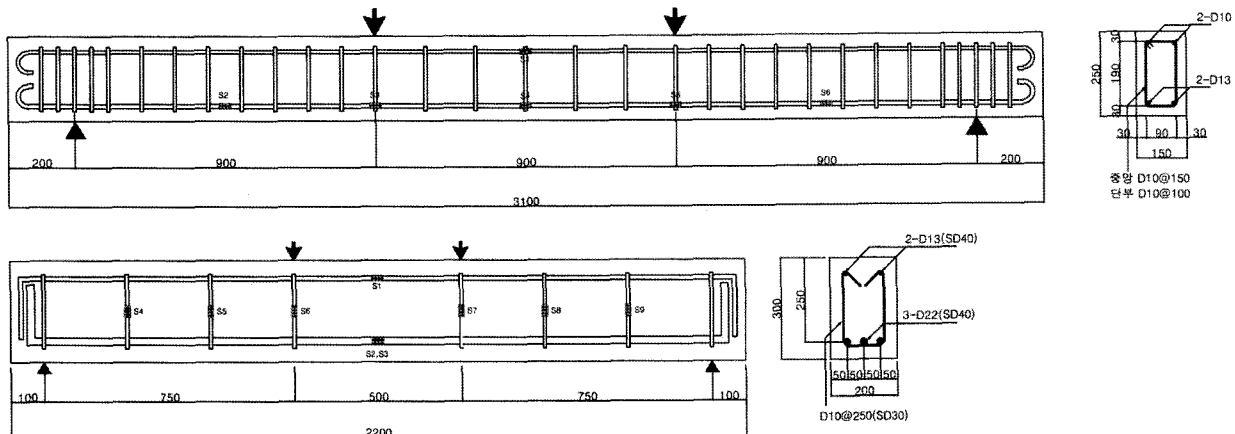


Fig. 4 Details of typical flexural and shear beams

(unit: mm)

Table 4 Material properties of concrete

Flexural beam			Shear beam		
Specified concrete strength (MPa)	Compression strength (MPa)		Specified concrete strength (MPa)	Compression strength (MPa)	
	14 days	28 days		14 days	28 days
24	19.3	23.1	30	29.2	35.6
	18.3	19.9		29.5	34.7
	19.4	29.9		29.7	30.9
Average	19.0	24.3	Average	29.5	33.7

Table 5 Material properties of reinforcing bar

Type	Modulus of elasticity E_s ($\times 10^6$) (MPa)	Yield strength f_y (MPa)	Tensile strength f_u (MPa)	Elongation (%)	
SD40	D10	1.86	471.4	536.6	17.9
	D13	1.82	375.1	567.2	19.6
	D22	1.75	380.8	499.7	19.9
SD30	D10	1.78	414.5	458.6	16.7

Table 6 Summary of flexural beam specimens

Specimen	Material	Spray	Damage
BN	-	-	-
B-GS-U	Glass fiber sheet	U	-
B-EG-SB	Epoxy + Glass chopped fiber	B	-
B-EG-SU	Epoxy + Glass chopped fiber	U	-
BCR-EG-SB	Epoxy + Glass chopped fiber	B	III
B-VG-SB	Vinyl ester + Glass chopped fiber	B	-
B-VG-SU	Vinyl ester + Glass chopped fiber	U	-

Note) B : bending, N : normal, CR : cracking, GS : glass fiber sheet, E : epoxy, V : vinyl ester, G : glass chopped fiber, C : carbon chopped fiber, S : spray, B : bottom, U : bottom + side

3.2.1 휨보의 실험체 계획

설계압축강도 24 MPa의 콘크리트를 사용한 휨보 실험체의 형상을 Fig. 4(상부)에 나타냈으며, 실험체 일람은 Table 6과 같다. 실험체는 휨 파괴가 선행되도록 상단근과 하단근에 SD40의 2-D10과 2-D13을 배근하고, 전단파괴가 일어나지 않도록 전단보강근 D10을 중앙부 150 mm, 단부 100 mm 간격으로 배근하였다. 보강 재료는 재료 시험과 동일한 로빙 및 시트 타입의 유리섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지를 사용하였다 (Table 2 참조). 기준 실험체 (1개), 유리섬유시트로 보강한 비교 실험체 (1개), 유리섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지를 이용하여 sprayed FRP의 밀면 및 U형으로 보강한 실험체 (4개) 및 손상 실험체 (1개)인 총 7개의 실험체로 구성되어 있다.

한편, 손상 실험체는 Fig. 6에 나타낸 [참고문헌 5]에서 정의하는 기준 실험체의 최대 하중에 근사한 damage class의 범위 (약 60 kN)까지 손상을 가한 뒤 유리 및 탄소단섬유와 에폭시수지를 이용하여 밀면 보강을 실시하였다. 모든 실험체는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 250 kN 액츄에이터를 이용하여 2점 가력 하였으며, 가력 지점과 실험체의 중앙에 100 mm LVDT를 설치하여 휨 변위를 측정하였다.

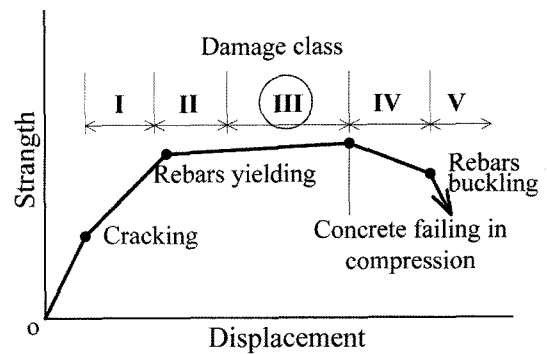


Fig. 6 Relationships between damage degree and load-displacement of flexural member⁵⁾

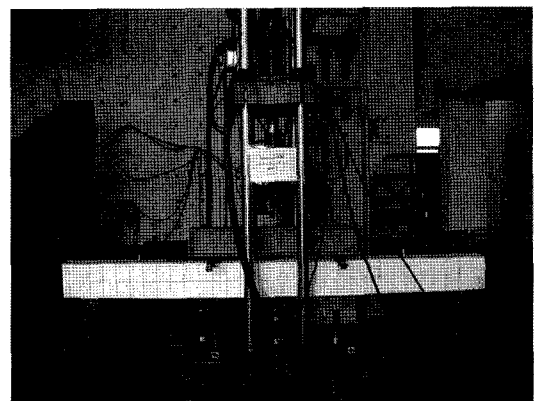


Fig. 7 Loading and measurement of flexural beam

3.2.2 전단보의 실험체 계획

Fig. 4(하부)에 나타낸 것처럼, 전단 실험체의 전단 스펬비 (a/d)는 3.0으로써, 설계 압축강도 30 MPa의 콘크리트를 사용하였다. 상단근과 하단근에 각각 SD40의 2-D13과 2-D22의 주철근으로 배근하고, 전단보강근 SD30의 D10을 250 mm 간격으로 배근하였으며, 보강 재료 (Table 2)는 휨 실험체와 동일하다. Table 7에 나타내는 바와 같이, 실험체는 전단 보강근의 유무에 따른 기준 실험체 2개, 유리 및 탄소섬유시트로 보강한 비교 실험체 2개, 각 보강 재

료를 이용한 sprayed FRP 측면, U형 보강 실험체 8개 및 damage class III (Fig. 8)⁵⁾에 해당하는 기준 실험체 최대 하중의 90%까지 손상 (약 225 kN)을 가한 뒤 유리단섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지를 이용하여 측면 보강한 실험체 2개로서 총 14개로 구성되어있다. Fig. 9에 나타내는 바와 같이 실험은 1,000 kN 액추에이터를 이용하여 2점 가력 하였으며, 가력 지점과 실험체의 중앙에 100 mm LVDT, 가력 지점과 지점 중앙에 50 mm LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 파괴 양상

휨 실험체는 전반적으로 중앙부에서 시작된 sprayed FRP 보강재의 파단 및 박리가 일어나면서 최종 파단 되었으며, 손상보 BCR-EG-SB (Fig. 10(b)) 또한 부재와 보강재

Table 7 Summary of shear beam specimens

Specimen	Material	Spray	Damage
SBN-NT	-	-	-
SBN	-	-	-
SB-GS-U	Glass fiber sheet	U	-
SB-EG-SI	Epoxy + Glass chopped fiber	I	-
SB-EG-SU	Epoxy + Glass chopped fiber	U	-
SBCR-EG-SI	Epoxy + Glass chopped fiber	I	III
SB-VG-SI	Vinyl ester + Glass chopped fiber	I	-
SB-VG-SU	Vinyl ester + Glass chopped fiber	U	-
SB-CS-U	Carbon fiber sheet	U	-
SB-EC-SI	Epoxy + Carbon chopped fiber	I	-
SB-EC-SU	Epoxy + Carbon chopped fiber	U	-
SBCR-EC-SI	Epoxy + Carbon chopped fiber	I	III
SB-VC-SI	Vinyl ester + Carbon chopped fiber	I	-
SB-VC-SU	Vinyl ester + Carbon chopped fiber	U	-

Note) SB : shear beam, N : normal, T : tension, CR : cracking, GS : glass fiber sheet, CS : carbon fiber sheet, E : epoxy, V : vinyl ester, G : glass chopped fiber, C : carbon chopped fiber, S : spray, I : side U : bottom + side

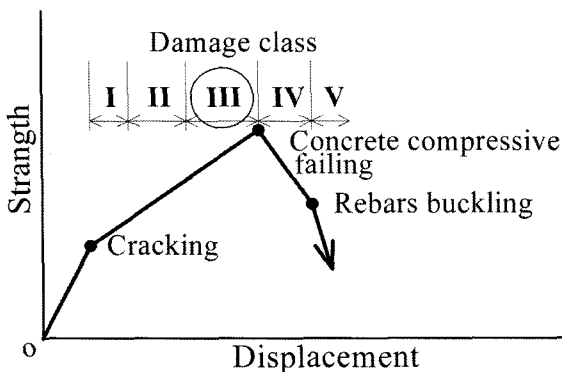


Fig. 8 Relationships between damage degree and load-displacement of shear member⁵⁾

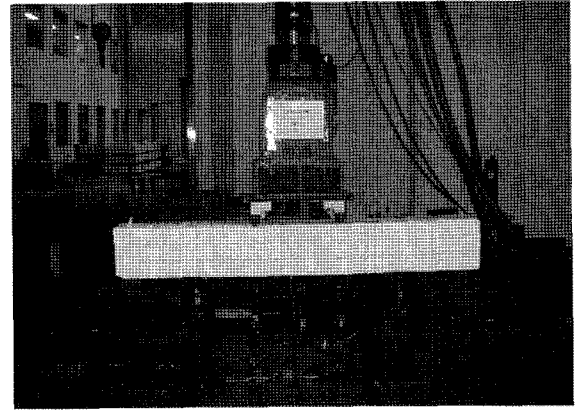


Fig. 9 Loading and measurement of shear beam

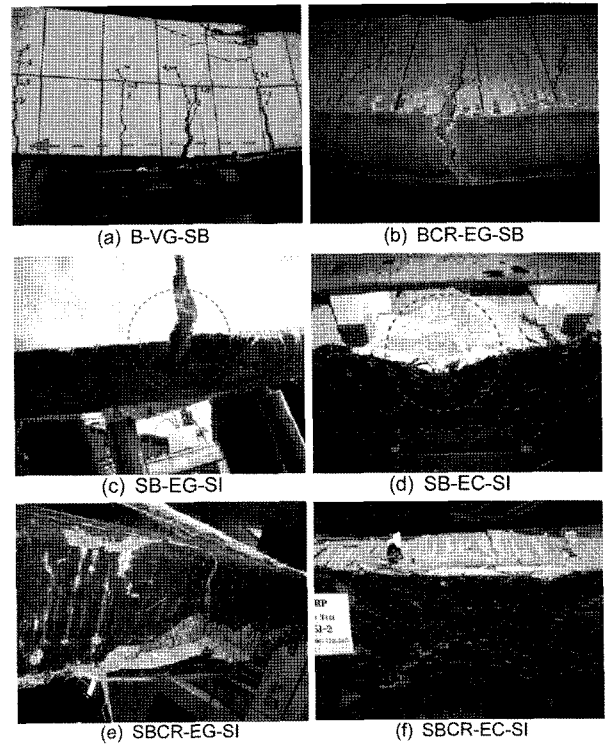


Fig. 10 Failure of specimens

가 함께 거동하면서 콘크리트와 함께 보강재의 박리가 일어났다. 일부 불완전 경화를 보인 실험체 B-VG-SB (Fig. 10(a))의 경우는 중앙부에서 시작된 박리가 단부로 급격하게 진행되면서 파괴되었다.

한편, 전단 실험체의 경우 유리섬유시트로 보강된 비교 실험체 (SB-GS-U)와 SB-EG-SI (Fig. 10(c)) 및 SB-EC-SI (Fig. 10(d))의 경우 휨 구간 상부 콘크리트가 압괴 (diagonal compression failure) 이후, 전단 구간에서 보강재가 콘크리트와 함께 거동 후 박리함으로써, 최종적으로 휨-전단 모드로 파괴되었다. 손상보 (Fig. 10(e), (f))의 경우에도 부재가 콘크리트와 함께 거동하는 휨 파괴 모드가 진행되다가 휨 구간 상부 콘크리트가 압괴 이후, 보강재가 전단 구간에서 파단 및 박리함으로써, 최종적으로 휨-전단 파괴 모드로 나타났다. 나머지 실험체는 모두 보강재의 파단 및 조기 박리가 일어나면서 전단 파괴 모드로 파괴되었다.

4.2 하중-변위 곡선

Sprayed FRP로 보강된 실험체의 실험 결과를 Table 8 및 Figs. 11~13 (보강 방법에 따른 하중-변위 곡선)에 각각 나타내었다. Fig. 11에 나타난 휨 보의 경우, sprayed FRP로 보강된 실험체는 기준 실험체 (BN) 이상, 유리섬유시트로 보강한 비교 실험체 (B-GS-U)의 유리섬유시트가 고강도 시트 (일반 강도의 약 3.3배)임을 고려한다면 비교 실험체와 동등 혹은 그 이상의 보강 효과 (강도)가 나타난 것으로 사료된다. 또한, 손상도 실험체 (BCR-EG-SB)는 기준 실험체 이상의 보강 효과뿐만 아니라 손상을

주지 않은 보강 실험체 (B-EG-SB)와 거의 동등 수준의 보강 효과가 나타났다. 밀면 및 U형 보강 방법에 따른 보강 효과는 유리단섬유에 에폭시수지를 보강한 실험체는 U형 보강의 조기 박리로 인하여 밀면과 유사한 보강 효과가 나타났으며, 비닐에스터수지로 보강한 실험체는 U형 보강이 약 1.25배 높은 보강 효과를 보여주었다.

전단보의 경우, Figs. 12 및 13에 나타난 기준 실험체 이상 (SBN)의 보강 효과가 나타났으며, 손상도 실험체 (SBCR-EG-SI 및 SBCR-EC-SI) 또한 손상을 가하지 않은 보강 실험체 (SB-EG-SI 및 SB-EC-SI)와 거의 동등한 보강 효과가 나타났다. Fig. 12의 유리단섬유 보강의 SB-

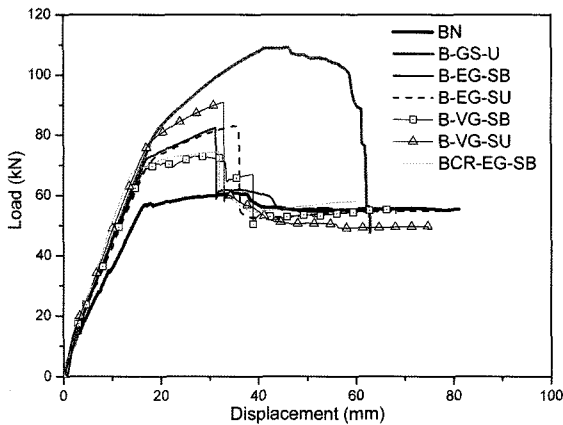


Fig. 11 Load-displacement relationship of flexural beams (glass chopped fiber)

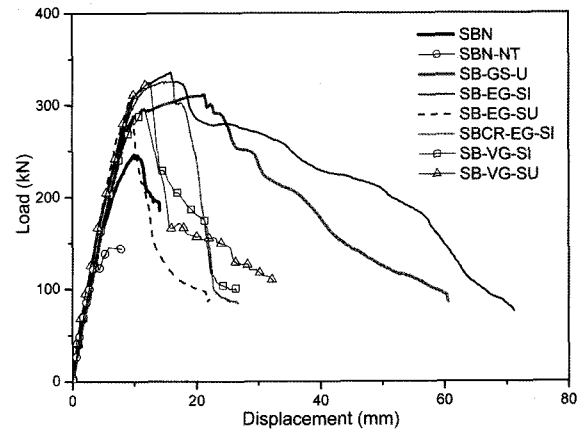


Fig. 12 Load-displacement relationship of shear beams (glass chopped fiber)

Table 8 Summary of test results (unit: kN, mm)

Specimen	Cracking		Yield		Maximum		T_{SFRP}		Failure mode
	V_{cr}	δ_{cr}	V_y	δ_y	V_u	δ_u	†	‡	
BN	13.4	2.85	36.1	9.91	60.8	35.55	-	-	F
B-GS-U	-	-	75.3	16.03	108.8	41.17	-	-	
B-EG-SB	11.2	1.95	74.5	20.4	82.4	31.23	4.2	4.9	
B-EG-SU	13.4	2.25	82.1	32.72	83.0	35.45		3.2	
BCR-EG-SB	12.3	2.08	58.3	17.61	74.5	31.68	4.4	3.6	
B-VG-SB	11.2	1.61	68.9	17.51	73.0	27.57		3.5	
B-VG-SU	12.8	1.78	76.0	17.43	90.9	32.90		2.9	
SBN-NT	56.0	1.39	-	-	145.3	5.89	-	-	S
SBN	37.1	0.91	230.4	8.44	246.4	9.95	-	-	F+S
SB-GS-U	-	-	256.7	8.24	311.4	21.34	-	-	
SB-EG-SI	76.4	1.76	304.9	9.76	335.7	15.89	4.2	4.7	
SB-EG-SU	54.5	1.04	-	-	306.8	9.40		4.4	
SBCR-EG-SI	36.9	1.06	294.5	9.57	325.7	16.08		4.1	
SB-VG-SI	61.3	1.55	229.1	7.04	297.1	11.71	4.4	3.8	
SB-VG-SU	74.5	1.51	300.6	9.17	324.8	12.47		2.7	
SB-CS-U	-	-	312.1	17.62	326.6	22.96	-	-	F+S
SB-EC-SI	66.3	2.15	314.5	12.39	343.6	21.38	3.0	2.7	
SB-EC-SU	66.0	1.84	264.7	9.44	304.2	12.21		2.7	
SBCR-EC-SI	35.2	0.92	315.2	11.04	332.9	16.46		3.5	
SB-VC-SI	26.5	0.44	-	-	276.9	8.50	4.0	4.6	S
SB-VC-SU	69.9	1.62	-	-	305.3	9.02	4.0	3.3	

Note) † : Sprayed FRP design thickness, ‡ : Sprayed FRP thickness, F : Flexural failure, S : Shear failure

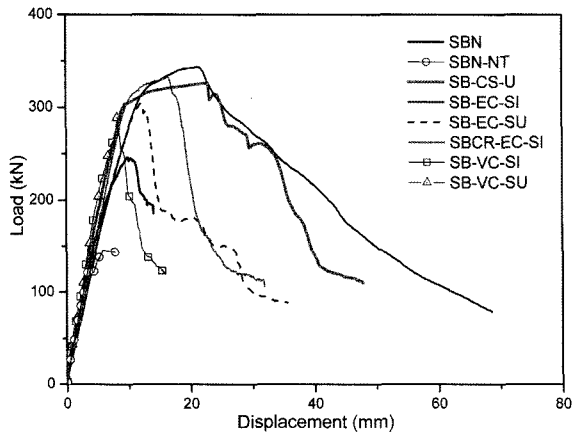


Fig. 13 Load-displacement relationship of shear beams (carbon chopped fiber)

VG-SI를 제외한 나머지 모두 유리섬유시트의 비교실험체 (SB-GS-U) 이상의 강도가 발현되었다. Fig. 13의 탄소단 섬유 실험체는 탄소섬유시트로 보강한 비교 실험체 (SB-CS-U)와 거의 유사한 강도가 나타났으나, SB-EC-SI를 제외한 4개의 실험체 모두 불완전 경화로 인하여 모재와 함께 거동하지 못하고 보강재의 조기 박리로 인한 파괴가 발생하였다.

4.3 보강 및 손상 실험체의 강성 비교분석

본 연구에서 검토한 부재 강성을 Fig. 14에 나타내는 원 점을 기준으로한 등 간격 변위에 대한 할선 강성 (휨보 : 5 mm, 전단보 : 3 mm 간격)으로 정의를 하였으며, Fig. 14의 할선 강성을 바탕으로 기준 실험체, 보강 실험체 및 손상 실험체의 강성 변화를 비교검토하였다.

Fig. 15에 나타내는 휨 실험체의 초기 강성 (5 mm)에서 보강 실험체 (B-EG-SB)는 기준 실험체 (BN)에 비해 약 1.32배의 강성 증가를 보여주었고, 기준 실험체가 항복에 들어가면서부터 보강 실험체가 항복에 들어가기 전까지의 구간에서 약 1.25배의 강성 증가를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 보강 실험체가 항복을 한 이후에도 기준 실험체의 약 1.32배의 강성이 유지되고 있으며, 이

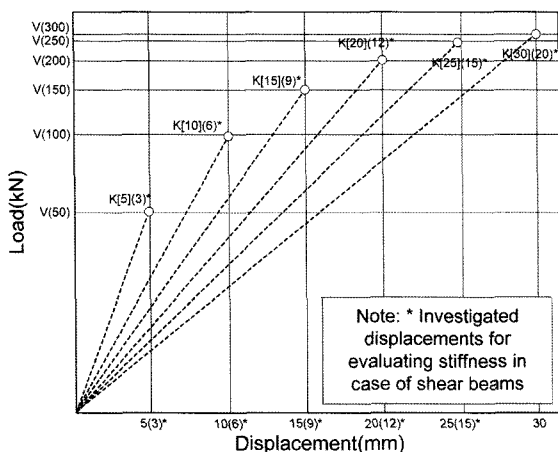


Fig. 14 Definition of investigated stiffness

는 보강 실험체의 철근이 항복을 한 이후에도 sprayed FRP 보강재가 하중에 저항하는 것으로 판단된다. 손상 실험체 (BCR-EG-SB)는 항복 전까지 보강 실험체에 비해 최고 약 1.13배의 강성 증가가 나타났으며 손상 실험체가 항복에 들어가면서부터 보강 실험체와 유사한 강성을 유지하다가 최종적으로 저하되었다.

손상 실험체의 강성 변화의 특징은 상기에서 나타낸 바와 같이 초기 강성에서부터 항복에 들어가기 전까지의 강성 구간에서 보강 실험체 이상의 강성이 나타났는데, 이는 손상 실험체에 sprayed FRP 보강을 실시하면서 실험체의 균열로 보강재의 수지가 보강되어 2차적인 보강 효과가 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 16에 나타내는 유리단섬유를 이용한 전단 실험체의 강성 변화를 비교해 보면 기준 실험체 (SBN)에 비해 보강 실험체 (SB-EG-SI)의 초기 강성은 약 1.14배의 강성 증가가 나타났다. 기준 실험체의 강성이 항복 이후 급격히 떨어지는 것에 비해 보강 실험체는 항복 이후에도 일정한 강성을 유지하면서 저하되었으며, 이는 항복 이후에도 sprayed FRP 보강재가 하중에 저항하는 보강 효과가 나타나고 있는 것으로 판단된다. 손상 실험체 (SBCR-EG-SI)의 초기 강성은 기준 실험체의 초기 강성보다 약간 높게 나타났으며, 기준 실험체의 강성이 점차 감소하는 것

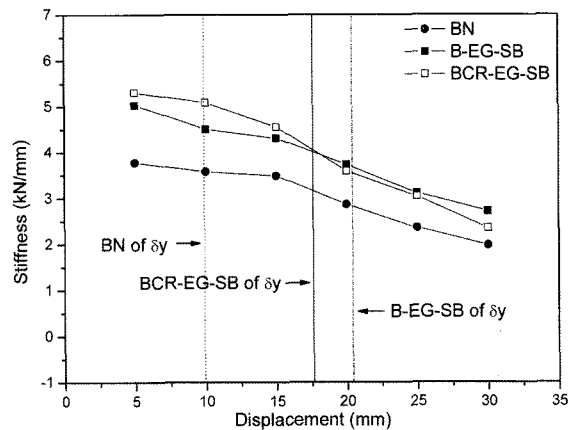


Fig. 15 Stiffness-displacement relationships of flexural beams (glass chopped fiber + epoxy resin)

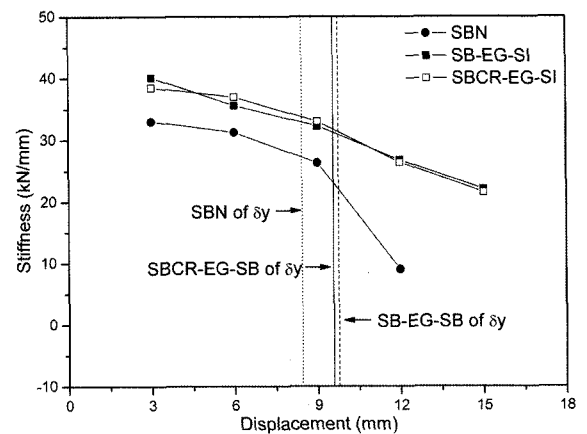


Fig. 16 Stiffness-displacement relationships of shear beams (glass chopped fiber + epoxy resin)

에 비해 손상 실험체는 일정한 강성을 유지하였으며 항복에 들어가면서부터 보강 실험체와 유사한 강성으로 감소하였다.

Fig. 17에 나타내는 탄소단섬유를 이용한 전단 실험체의 강성변화는 Fig. 16에 나타낸 유리단섬유를 이용한 전단 실험체와 유사한 경향을 보여주었다. 즉 기존 실험체는 항복에 도달하면서 점차 강성이 떨어지는 것에 비해 보강 실험체 및 손상 실험체는 일정한 강성을 유지하였으며, 항복에 도달하면서 강성의 감소가 나타났다. 손상 실험체의 경우 항복 이전의 강성은 보강 실험체의 약 1.11배의 높은 강성을 나타내었다. 향후 상세한 검토가 필요하지만 이는 휨 실험체 및 유리단섬유를 이용한 전단 실험체와 동일하게 손상 실험체에 sprayed FRP 보강을 실시하면서 실험체의 균열로 보강재의 수지가 보강되어 2차적인 보강 효과가 나타난 것으로 사료된다. 휨 및 전단의 손상보에 대한 강성 변화로 비교해 본 보강 효과는 기존 실험체 이상의 보강 효과를 나타내었으며, 철근이 항복한 이후부터는 보강재가 하중에 저항하는 능력이 감소하였으나, 이는 기존 실험체 강성 이상으로서 항복 이후에도 보강재의 보강 효과가 유지되는 것으로 판단된다.

4.4 기존 연구 결과와 실험 결과 비교

기존 FRP sheet를 보강재로 이용한 연구와 sprayed FRP 공법의 보강 효과를 비교하기 위하여 본 연구에 사용된 휨 및 전단 실험체는의 기존 연구^{6,7)}에서 실험된 실험체와 동일한 조건으로 제작 및 실험을 수행하였다. Fig. 18에는 본 연구와 상기 기존 연구의 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 휨 실험체의 경우, 최대 내력 측면에서 본 연구의 유리단섬유를 이용한 sprayed FRP 보강법이 기존 FRP와 유사한 보강 효과를 나타내고 있는 반면, 최대 내력시의 변위는 기존 CFS가 약 10 mm 정도 높게 나타났다. 유리 및 탄소단섬유로 보강한 sprayed FRP 전단 실험체의 경우 대부분 동등 이상의 보강 효과가 나타났다. 또한 각각 휨 및 전단의 손상 실험체 (damage class)는 보강

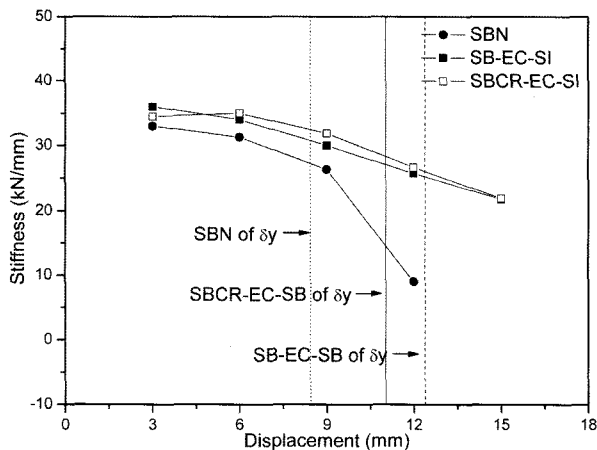


Fig. 17 Stiffness-displacement relationships of shear beams (carbon chopped fiber + epoxy resin)

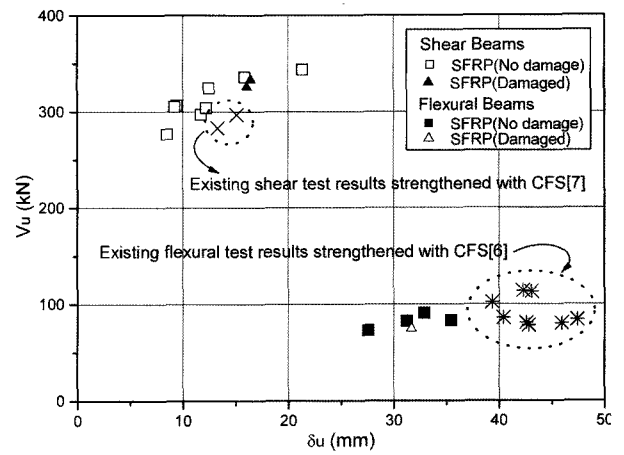


Fig. 18 Comparison of SFRP and FRP test results

실험체와 유사한 보강 효과 (강도)를 나타내었다.

5. 기존 FRP 보강설계식의 고찰 및 sprayed FRP 보강법의 적용 가능성 검토

5.1 휨 보강 설계식

보강재에 의한 휨 보강 효과를 고려한 최대 내력에 대한 기존 제안식을 식 (2)~(6)에 나타내었으며, 각각의 제안식을 사용하여 계산된 값과 실험 결과를 비교하였다.

(1) ACI 440의 제안식⁸⁾

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2)$$

여기서, 강도감수계수 $\Psi = 0.85$

(2) 나정민의 제안식⁶⁾

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_f f_{yf} (h - d) \quad (3)$$

여기서, $f_{yf} = 0.7 f_{yf}$

(3) El-Mihilmy의 제안식⁹⁾

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_f f_f \left(d_f - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

여기서, $f_f = E_f \epsilon_f$, $\epsilon_f = \epsilon_{cu} \times \frac{d_f - c}{c}$

(4) 한만엽의 제안식¹⁰⁾

$$M_n = \sigma_y (A_s - A'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_y A'_s (d - d') + \sigma_f A_f \left(h_s - \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

여기서, $\sigma_f = E_f \epsilon_f$, $\epsilon_f = \epsilon_{cu} \times \frac{h_s - c}{c}$

(5) 이원호의 제안식¹¹⁾

$$M_n = T_s (d - k) + T_{cfs} (h - k) \cdot v \quad (6)$$

$$v = (0.23 + 0.58 X_1 + 0.69 X_2), X_2 \leq 0.25$$

여기서, X_1 은 보강 길이 비 (보강 길이/경간), X_2 는 단부

에 U형으로 보강된 폭 비 (보강폭/경간)

상기 식에서 A_f 는 보강재의 단면적으로서 sprayed FRP 공법에서는 $b \cdot t_{sfrp}$ 를 이용하였다 (t_{sfrp} :보강 두께). f_f 는 Table 3에 나타난 단섬유와 수지의 배합에 따른 재료 시험 결과의 강도를 이용하였고, d_f 및 h_s 는 압축 축 끝단에서 sprayed FRP 중심까지의 거리를 적용하여 기존 제안식에 의한 이론값을 계산하였으며, Table 9 및 Fig. 19에 실험값과 비교하여 나타내었다.

Fig. 19에 나타난 바와 같이, ACI 440 식 (2), El-Mihilmy 식 (4), 한만엽 식 (5) 및 이원호 식 (6)의 결과는 각 식에서 적용하는 강도감수계수 및 보강재의 변형률의 고려에 대한 차이가 나타났으나 이는 매우 작은 것으로 판단되며, 실험값과 거의 일치하였다. 나정민 식 (3)의 경우 응력 중심 간의 거리 (jd)에서 보강재가 분담하는 영역을 최소 (보강재에서부터 인장철근 중심: $h-d$)로 규정하고 있어 sprayed FRP 보강 실험 결과와 비교한 결과, 이론치의 강도가 과소평가됨을 알 수 있었다. 한편, 이원호의 제안식을 제외한 기존 제안식 모두 밀면보강방법만을 고려하고 있어 본 실험의 U형 보강에 대해서는 정확한 강도를 계산할 수 없었다. 향후 보강 방법에 따른 고려가 필요한 것으로 판단된다.

5.2 전단보강 설계식

현재 ACI Code¹²⁾에서 사용되는 철근콘크리트 보의 전단 기준식은 식 (7)과 같으며, 보강재 효과를 고려한 보의 최대 전단 내력에 대한 기존 제안식은 ① CFS의 강도저감계수(α)를 바탕으로 ACI 318의 전단내력식을 수정한 신성우의 제안식¹³⁾, ② 기존 실험 자료의 회기분석에 의

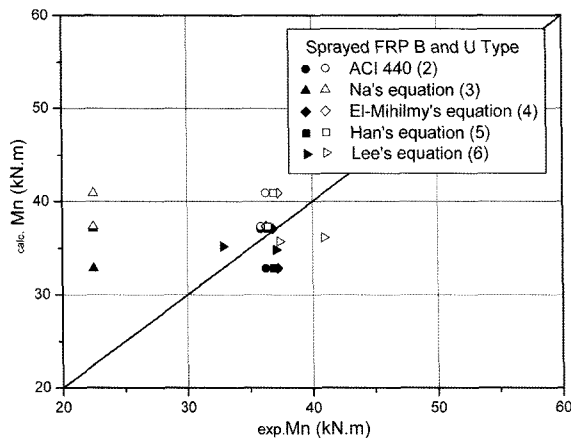


Fig. 19 Comparison between calculated $exp.M_n$ and $calc.M_n$

Table 9 Comparisons of $exp.M_n$ and $calc.M_n$

(Unit : kN · m)

Specimen	Test	ACI ⁸⁾	Jung-Min Na ⁶⁾	El-Mihilmy ⁹⁾	Man-Yop Han ¹⁰⁾	Waon-Ho Yi ¹¹⁾
S-EG-SB	37.08	35.85	22.46	36.78	36.42	34.82
S-EG-SU	37.35	35.85	22.46	36.78	36.42	35.72
S-VG-SB	32.85	36.29	22.52	37.23	36.91	35.20
S-VG-SU	40.91	36.29	22.52	37.23	36.91	36.14

하여 제안한 CFS의 유효변형률을 바탕으로 트러스 아치 전단내력식을 수정한 신성우의 제안식¹⁴⁾, ③ ACI 318 및 Zsutty가 제안한 전단내력식을 수정한 이용택 · 이리형의 제안식¹⁵⁾ 등이 있다. 한편, [참고문헌 16]에서는 상기의 기존 제안식에 의한 이론값과 FRP sheet로 보강한 실험값을 상호 비교 및 검토하였다. 그 결과, 식 (8)에 나타내는 CFS의 강도저감계수 $\alpha = 0.3$ 으로 제안한 신성우의 제안식에 의한 비교값이 평균 0.92 (표준편차 0.07)로서 가장 신뢰성이 높은 제안식으로 평가되었다. 따라서, 본 연구에서는 강도저감계수를 고려하여 ACI 식을 수정한 신성우의 제안식을 바탕으로 sprayed FRP로 보강한 전단보의 전단내력식을 비교 · 검토하여 강도저감계수를 제안하였다.

$$V_n = \left(0.5\sqrt{f_c} + 176\rho\frac{V_u}{M_u}d\right)b_w d + A_v f_y \frac{d}{s} \quad (7)$$

$$V_n = \left(0.5\sqrt{f_c} + 176\rho\frac{V_u}{M_u}d\right)b_w d + A_v f_y \frac{d}{s} + V_{cfs}$$

$$V_{cfs} = \alpha \frac{2t_{cfs}s'f_{cfs}h}{S} \quad (8)$$

여기서, t_{cfs} : CSF의 설계두께, s' : CSF의 보강길이

f_{cfs} : CSF의 설계강도, h : 보 단면의 깊이

S : CFS의 보강간격

α : 강도저감계수로서, $\alpha = \frac{(\text{exp.})V_{cfs}}{(\text{calc.})V_{cfs}}$

신성우의 제안식¹³⁾에 sprayed FRP를 적용함에 있어서 t_{cfs} 에는 보강재의 설계 두께 (t_{sfrp}), f_{cfs} 에는 재료 시험을 통해 얻은 보강재의 강도 (f_{sfrp}) (Table 3 참조)를 사용하여 단섬유와 수지의 배합에 따른 물성을 고려하였다. 또한, 보강 길이 s 및 보강 간격 S 의 경우 본 연구에서는 전면 보강이므로 보강 길이와 보강 간격은 동일한 값을 사용하였다. 강도저감계수를 고려하지 않고 상기의 조건을 바탕으로 sprayed FRP의 전단 보강 내력을 계산할 경우, sprayed FRP 보강재가 부재와 함께 거동한다는 가정하의 계산 결과이므로 전단 내력이 과대평가되는 것으로 나타났다. 실제 sprayed FRP의 거동은 최대 하중 내외에서 박리 및 부착 파괴가 발생되므로 기존의 FRP sheet 보강법^{7,13)}과 마찬가지로 sprayed FRP의 설계강도에 대한 전단강도저감계수의 적용이 필요하며, Table 8의 실험 결과와 식 (7) 및 (8)을 이용한 계산값을 비교하여 식 (9)의 sprayed FRP용 전단 강도저감계수 α 를 제안하였다.

Fig. 20 및 Table 10에 나타난 바와 같이 제안한 전단강도저감계수 $\alpha = 0.18$ (Table 10의 α 평균값), 하한치인 $\alpha = 0.11$ 및 최대값이면서 동시에 기존 연구 신성우의 제

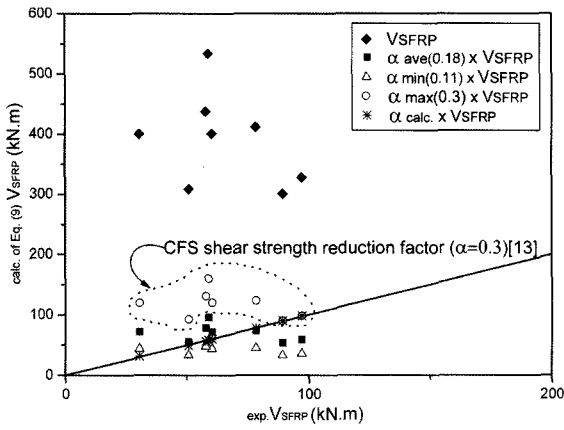


Fig. 20 Comparison between calculated αV_{SFRP} and V_{SFRP}

Table 10 Comparisons of $exp.V_{SFRP}$ and $calc.V_{SFRP}$ (unit: kN)

Specimen	V_{SFRP}		α
	Test	Eq. (7)	
SB-EG-SI	89.3	300.6	0.30
SB-EG-SU	60.4	400.9	0.15
SB-VG-SI	50.7	309.0	0.16
SB-VG-SU	78.4	412.0	0.19
SB-EC-SI	97.2	328.3	0.30
SB-EC-SU	57.8	437.7	0.13
SB-VC-SI	30.5	400.4	0.08
SB-VC-SU	58.9	533.8	0.11
Average	-	-	0.18

안값인 $\alpha = 0.3$ 을 각각 적용한 V_{SFRP} 와 실험을 통해 얻어진 $exp.V_{SFRP}$ 의 관계를 나타내었다.

$$\alpha = (V_{exp.} - V_{c[ACI]} - V_{s[ACI]}) / V_{calc.SFRP} \quad (9)$$

전단강도저감계수에 따른 sprayed FRP 전단 보강 실험 결과를 비교해본 결과 기존연구의 전단강도저감계수는 과대평가되는 경향이 나타났으며, 본 연구에서 제안한 평균값 $\alpha = 0.18$ 을 이용하여 얻어진 결과가 실험값과 유사한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 시공성 및 현장 적용이 우수한 sprayed FRP 공법을 개발하는 것을 목적으로 최적 물성을 제안하기 위한 재료 시험 및 구조 실험을 실시하였다. 선행 연구인 재료 시험을 통하여 기존 FRP sheet 1겹의 보강 강도를 발휘하는데 필요한 최적의 물성치를 제안하였으며, 이를 바탕으로 휨 및 전단 보의 구조 실험에 적용하여 sprayed FRP의 보강 성능을 파악하였다. 또한, 손상을 준 실험체에 보강을 함으로써 실제 구조적 결함이 있는 구조물에 보강하였을 경우 보강 효과의 가능성을 제시하였다. 최종적으로 기존 FRP 보강 설계식의 적용 가능성을 분석하여 sprayed FRP 보강용 설계식을 검토하였다. 본

연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재료 실험 결과, 최적 물성치로써 유리 및 탄소단섬유의 길이는 38 mm, 섬유와 수지의 배합 비율은 1:2로 제안하였다.
- 2) Sprayed FRP의 설계두께는 유리단섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지의 경우 4.2 mm, 4.4 mm, 탄소단섬유의 경우 3.0 mm, 4.0 mm로 나타났다.
- 3) Sprayed FRP의 휨 및 전단보의 보강 효과는 기존 FRP sheet와 유사한 보강 효과를 나타내었으며, 손상보의 경우 최대 강도의 결과를 비교해보면 보강보와 동등한 보강 효과가 나타났다.
- 4) 기존 FRP 설계식의 적용 가능성을 분석한 결과, 휨 실험체의 경우는 기존 설계식의 적용이 가능한 것으로 판단된다. 한편, 전단 실험체의 경우는 전단강도저감계수 $\alpha = 0.18$ 이 실험값과 근접한 범위 내에서 안전 측으로 설계가 되는 것으로 판단된다.
- 5) 향후 sprayed FRP 공법의 실용성을 위하여 시공 두께 및 설계 두께 오차의 영향, 경화 시간 및 보강재의 불완전 경화로 인한 조기 박리에 관한 연구 등이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단지원을 받아 수행된 연구(지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단)이며, 또한 GS건설(주)의 연구비 지원으로 수행됨. 연구에 협조를 주신 상영엔지니어링(주), 정도이앤피(주), (주)콘크리닉에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nemkumar Banthia, Natarajan Nandakumar, and Andrew Boyd, "Sprayed Fiber Reinforced Polymers: From Laboratory to a Real Bridge", *Concrete International*, Nov. 2002, pp.47~52.
2. Kent A. Harries and Stanle C. Young, "Sprayed Fiber Reinforced Composite Materials for Infrastructure Rehabilitation", *Concrete International*, 2003, pp.47~51.
3. Tomoki Furuta and et al., "Study on Sprayed FRP System for Strengthening RC Structures", *Proceedings of AIJ*, 2000, No.23171, 2000, pp.341~342.
4. KS M 3381, 유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법, 한국표준협회, 2004, 7pp.
5. (財)日本建築防災協, 震災建築物の被災度区分判定基準および復舊技術指針, 三榮社, 東京, 1991 (2001 개정), 360pp.
6. 나정민, 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 부재의 구조성능 평가에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, 2001, 480pp.
7. 남정희, 탄소섬유쉬트로 보강한 R/C보의 전단내력에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 한양대학교, 1998, 87pp.
8. ACI Committee 440 (2R-02), *The Design and Construction*

- of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 24 Jan., 2002, 45pp.
9. Mahmoud T. Ei-Mihimy and Joseph W. Tedesco, "Deflection of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer(FRP) Plates", *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.5, 2000, pp.679~688.
 10. 한만엽, "보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동", 콘크리트학회지, 10권 3호, 1998, pp.197~208.
 11. 이원호, 임재형, 박인수, "탄소섬유시트에 의한 철근콘크리트 보의 휨보강 효과", 대한건축학회 구조계 논문집, 17권 1호, 2001, pp.11~19.
 12. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*, ACI 318-05, 2005, 430pp.
 13. 신성우, 반병렬, 이광수, 조인철, 남정희, "탄소섬유시트로 보강한 R/C보의 전단거동에 관한 연구", 한국구조물진단학회, 2권 3호, 1999, pp.206~211.
 14. 신영수, "탄소섬유 시트에 의한 철근콘크리트 보의 전단보강 효과", 대한건축학회논문집 구조계, 15권 9호, 1999, pp.11~18.
 15. 이용택, 이리형, "탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 제16권 1호, 2000, pp.11~17.
 16. 백승민, 김우석, 곽윤근, "구조적 손상을 받은 RC보의 전단보강 효과에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 구조계 논문집, 20권 2호, 2004, pp.47~54.

요 약 본 연구의 주 목적은 유리 및 탄소단섬유 (chopped fiber)와 에폭시 및 비닐에스터수지 (resin)를 의기에서 혼합하여 요철이 많은 콘크리트 표면에 고속의 압찰 공기로 랜덤하게 분사하여 기존 콘크리트 구조물을 보강하는 새로운 공법, 즉 sprayed FRP 보수보강 공법을 개발하는 것으로서, 본 연구에서는 sprayed FRP 보강을 위한 최적의 재료 물성치를 제시하고자 유리 및 탄소단섬유의 길이, 단섬유와 에폭시 및 비닐에스터수지의 배합 비율 등을 주요변수로 설정하여 재료 인장시험을 실시하였다. 또한 상기 재료 시험 결과를 바탕으로 sprayed FRP 공법을 이용하여 보강된 철근콘크리트 휨 보, 전단 보 및 손상 보의 보강 성능을 실험적 연구를 토대로 평가하였다. 그 결과, 유리 및 탄소단섬유의 길이 38 mm, 섬유와 수지의 배합 비율 1:2가 최적 물성치로 제안되었으며, sprayed FRP의 휨 및 전단 보의 보강 효과는 기존 FRP sheet와 유사한 보강 효과를 나타냈으며, 손상 보의 경우 최대 강도의 결과를 비교해보면 보강 보와 동등한 보강 효과가 나타났다. 기존 FRP 설계식의 적용 가능성을 분석해본 결과, sprayed FRP 휨실험체의 경우 기존설계식의 적용이 가능한 것으로 드러났으며, 전단실험체의 경우는 전단강도 저감계수 $\alpha = 0.18$ 이 실험값과 근접한 범위 내에서 안전 측으로 설계가 되는 것으로 사료된다.

핵심용어 : sprayed FRP, FRP 시트, 유리섬유, 탄소섬유, 에폭시