

Sprayed FRP로 보강된 철근 콘크리트 전단기둥의 보강성능 평가

Structural Performance of Reinforced Concrete Shear Columns Strengthened with Sprayed Fiber Reinforced Polymers

이 강 석*
Lee, Kang Seok

변 인 희**
Byeon, In Hee

이 문 성***
Lee, Moon Sung

Abstract

In this study, a structural performance of R/C columns controlled by shear, strengthened with Sprayed FRP, was investigated. For this purpose, six 2/3-scaled column specimens were designed and tested by the pseudo-static reversed cyclic load under a constant axial load, which is 10% of the nominal axial strength of the column. Four specimens were strengthened by Sprayed FRP with different combinations of short fibers (carbon or glass) and resins (epoxy or vinyl ester). For comparison purpose, tests of a specimen strengthened with carbon fiber sheet (CFS) and a control specimen without strengthening were carried out, respectively. The result reveals that shear strengths and ductility capacities of columns strengthened with Sprayed FRP improved remarkably, compared to those of the control column, and the Sprayed FRP technique developed in this study is able to use the strengthening scheme of existing R/C columns.

요 지

본 연구에서는 Sprayed FRP 공법을 이용하여 보강된 철근 콘크리트 전단 파괴형 기둥의 구조성능을 평가하기 위하여 2/3 크기로 축소된 총 6개의 기둥 실험체를 제작하여, 일정한 축하중 (0.1Agfc')하에서 반복 횡하중을 가력한 구조 실험을 수행하였다. 4개의 실험체는 유리 및 탄소 단섬유와 에폭시 및 비닐에스테르 수지를 조합하여 Sprayed FRP로 보강하였으며, 또한 비교 목적을 위하여 고강도 탄소섬유시트(CFS)로 보강된 실험체 1개와 무 보강 실험체 1개를 포함하였다. 실험결과, Sprayed FRP로 보강된 실험체의 최대내력은 무 보강 실험체 대비 10~30%가 증가 하였을 뿐만 아니라, 연성은 약 1.15배 향상되어, 본 연구에서 제안한 Sprayed FRP 공법은 충분한 보강효과가 기대되는 신기술 이라고 판단된다.

Keywords : R/C columns, Sprayed FRP, Carbon & Glass fibers, Vinyl ester resin, Epoxy resin

핵심 용어 : 철근콘크리트 기둥, Sprayed FRP, 탄소 및 유리섬유, 비닐에스테르수지, 에폭시수지

* 정희원, 전남대학교 공과대학 건축공학과 교수, 교신저자

** 정희원, 한양대학교 건축대학 건축공학부 석사과정

*** 정희원, 한양대학교 BK21 사업단 박사후 과정

E-mail : kslnist@chonnam.ac.kr 062-530-1645

•본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

현재 국내의 콘크리트 구조물은 1970년대 이후 급격한 경제성장 과정에서 대량 공급되어 도시의 건축물은 대부분 콘크리트 구조물로서, 내구성은 반영구적인 것으로 인식되어 왔으며, 반세기 이상 경과된 콘크리트 구조물도 다수 존재한다. 그러나, 콘크리트 구조물은 시간이 경과함에 따라 노후화 및 각종 외부조건에 의해 구조물의 성능이 저하되는 심각한 문제가 발생하여 보수·보강을 필요로 하게 된다. 이러한 콘크리트 구조물의 재래식 보수·보강방법으로는 강판보강법, 철골 브레이스보강법, 단면증설법, 벽체신설법 등이 있으나, 보강으로 인한 중량증가, 시공조건 및 정밀시공 등이 요구되는 단점을 내포하고 있다. 이러한 재래 보수·보강법의 단점을 극복하기 위해서 최근 내구성이 우수한 탄소섬유·유리섬유·아라미드섬유 등의 경량의 복합 신소재를 이용한 FRP Sheet 보강법 등이 널리 사용되어 지고 있다. 그러나, FRP Sheet 보강법은 재료 자체가 갖는 이방성문제, 사전 표면처리 작업 및 접합부 적용 시 시공성 문제, 비교적 고가의 소재를 사용함에 따른 경제성 문제가 야기되고 있어 현재 시공성 및 경제성이 탁월한 새로운 보강기술의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구의 주목적은 유리 및 탄소 단섬유(short fiber)와 에폭시 및 비닐에스테르 수지(resin)를 외기에서 혼합하여 요철이 많은 콘크리트 표면에 고속의 압찰공기로 랜덤하게 분사하여 기존 콘크리트 구조물을 보강하는 새로운 공법, 즉 Sprayed FRP 보수·보강 공법을 개발하는 것으로서, 국내·외적으로 Sprayed FRP 공법에 관한 연구⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾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 비닐에스테르 수지의 배합비율 등을 주요변수로 설정하여 재료인장시험을 실시하였다. 또한, 상기 재료시험결과를 바탕으로 Sprayed FRP 공법을 이용하여 보강된 철근콘크리트 전단기둥의 보

강성능을 실험적 연구를 토대로 평가하였다.

1.2 연구 내용 및 방법

일반적으로 Sprayed FRP 공법에서는 분사 후 속경화가 이루어지는 비닐에스테르 수지가 사용되고 있으나,⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 비닐에스테르 수지에 비해 고강도인 에폭시 수지를 보강재료에 도입하여 분사두께를 낮추고 Sprayed FRP 공법의 시공성을 향상시키고자 하였다. 본 연구에서는 유리 및 탄소단섬유(Fig. 1 참조)와 에폭시 및 비닐에스테르 수지를 이용하여 현행 FRP Sheet 1겹의 강도를 발휘하는데 필요한 단섬유와 수지의 배합비율, 단섬유의 길이 등 각종 최적물성치 제안 및 Sprayed FRP 보수·보강 효과를 파악하기 위하여 재료시험 및 구조시험을 수행하였다. Sprayed FRP 보강용 기자재로는 Fig. 2에 나타낸 BINKS Poly Craft(주)의 제품을 사용하였다.

2. 재료 시험

2.1 사용 재료 및 시험편 계획

현재 Sprayed FRP 공법은 연구단계로 재료시험에 관한 규격이 따로 명시되어있지 않은 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 KS M 3381⁽⁴¹⁾ 유리섬유



Fig. 1 유리 및 탄소 단섬유 Fig. 2 Sprayed FRP 기자재

강화 플라스틱의 인장시험방법에 준하여 재료시험을 계획하였다. 재료시험에 사용된 보강재료에는 로빙(Roving)타입 유리 및 탄소섬유, 강도비교용 시트타입의 탄소섬유와 에폭시 및 비닐에스테르 수지로서 단섬유의 길이 및 섬유와 수지의 배합비율을 변수로 이용하였으며, 재료시험 변수와 각각의 물리적 특성은 Table 1 및 2와 같다. 변수 중 유리단섬유의 경우, 단섬유의 길이 및 배합비율의 조합에 따라 5개씩 총 120개의 시험편을 제작하였다. 탄소단섬유의 경우, 유리단섬유의 재료시험 경험을 바탕으로 시공성 및 성능을 고려하여 2.8 및 3.8cm의 단섬유 길이를 변수로 사용하여 총 40개의 시험편을 제작하였다. 시험편의 양생기간은 25℃의 외기에서 7일간의 경화를 완전경화로 가정하였으며, 시험편의 중심에 Strain Gauge를 붙여 5ton 용량의 소형만능시험기를 사용하여 인장강도를 측정하였다. 시험속도는 규준에서 명시한 $1 \pm 0.5 \text{ mm/min}$ 속도 A를 사용하였다.

2.2 시험 결과 및 분석

각 변수별로 동일한 5개의 시험편으로 인장시험을 수행한 결과, 파괴양상은 시험편의 중앙에서 양쪽으로

Table 1 재료 시험 변수

섬유	단섬유 길이 (cm)	배합비율(질량비)	
		섬유:VE	섬유:EP
유리섬유	1.4, 2.8, 3.8, 5.6	1:4, 1:3, 1:2	1:3, 1:2.5, 1:2
탄소섬유	2.8, 3.8	1:3, 1:2	1:2.5, 1:2

주) VE: 비닐에스테르 수지, EP: 에폭시 수지

Table 2 섬유 및 수지의 물리적 특성

종류	섬유			수지	
	로빙타입	시트타입		EP	VE
	탄소 섬유 (M사)	탄소 섬유 (S사)	유리 섬유 (C사)		
인장강도 (MPa)	4000	3622	510	46	31
탄성계수 (MPa)	2.4×10^5	2.4×10^5	2.6×10^4	-	-
설계두께 (mm)	-	0.167	1	-	-

주) VE: 비닐에스테르 수지, EP: 에폭시 수지

40mm 내에 위치하는 평행부분의 파단 및 물림부분의 압괴로 나타났으며, 평행부분 내에서 파단이 되는 시험편의 값을 최종 실험결과로 사용하였다. 대표적인 시험편 파괴형상을 Fig. 3에서 정리하였다. Sprayed FRP 공법의 최적재료물성을 파악하기 위한 재료시험을 수행한 결과, 단섬유의 길이가 길수록, 섬유와 수지의 배합비율에서 섬유의 양이 증가할수록 인장강도가 증가하였으나, Sprayed FRP 보강용 기자재의 Chopper Gun 성능 및 시공성을 고려하여, 고강도이면서 섬유의 엉킴이 가장 적다고 판단되는 Sprayed FRP 보강을 위한 최적 물성치로서는 단섬유 길이는 3.8cm, 배합비율은 1:2로 각각 평가하였다.

본 연구에서 평가된 대표적인 최적 재료시험 변수의 응력-변형도 곡선을 Fig. 4에 나타내었으며, 유리단섬유를 사용한 시험편은 연성능력이 우수하고, 탄소단섬



Fig. 3 시험편 파괴 형상 (3.8cm, 섬유:수지=1:2)

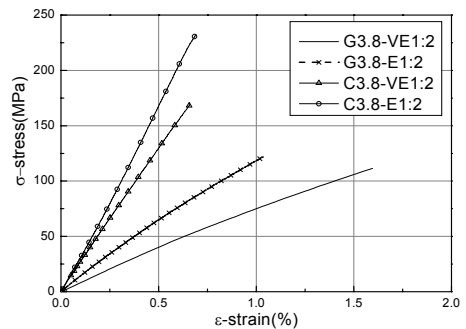


Fig. 4 시험편의 응력-변형도 곡선

Table 3 재료 시험 결과 (3.8cm, 1:2일때)

실험체	섬유	수지	변형률 (%)	인장강도 (MPa)	설계두께 (mm)
G3.8:E=1:2	유리	EP	0.833	121.7	4.2
G3.8:VE=1:2	유리	VE	1.036	119.4	4.4
C3.8:E=1:2	탄소	EP	0.488	186.1	3.0
C3.8:VE=1:2	탄소	VE	0.657	167.9	4.0

주) VE: 비닐에스테르, EP: 에폭시

유를 사용한 시험편은 유리단섬유에 비해 고강도인 것으로 판명되었다.

Table 3에는 Sprayed FRP 구조체 보강을 위한 재료시험의 결과 및 설계두께를 나타내었으며, 설계두께는 식(1)을 이용하여, Table 2의 FRP Sheet의 물성과 비교하여 FRP Sheet 1겹과 동일한 인장강도를 가지기 위한 Sprayed FRP의 분사두께를 계산하였다.

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

여기서, σ : 인장강도, T : 설계두께

3. 구조 실험 개요

3.1 실험체 계획

Sprayed FRP 공법을 이용하여 전단 보강된 기둥 실험체의 구조적 성능을 실험적으로 비교·평가하기 위하여 6개의 실험체를 무보강한 실험체와 동일하게 제작하였다. Fig. 5에는 표준 실험체의 상세를 나타낸 것으로서, 기둥 단면(D)은 가로와 세로 400mm인 정방형으로 계획하였으며, 기둥의 높이(H)는 1400mm로 계획하였고, 전단 스펬비(H/D)는 3.5이다. 기둥 상부에는 스티브를 설치하여 기둥의 구속 효과가 고려될 수 있도록 하였다. 스티브의 형상은 강성이 충분히 커서 기둥의 거동에 영향을 주지 않도록 형태를 결정하였고, 실험 시 집중하중에 의한 균열 및 국부 변형이 생기지 않도록 철근배근을 하였다.

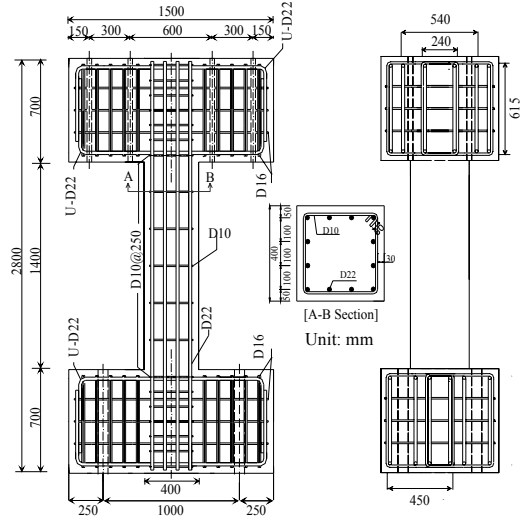


Fig. 5 실험체 상세



Fig. 6 Sprayed FRP 분사 모습(탄소단섬유)

한편, 제2장의 재료시험 결과를 바탕으로 산출된 설계두께를 고려하여, Fig. 6에 나타난 것처럼 Sprayed FRP 공법으로 실험체를 보강하였다. Table 4에는 보강 실험체 일람을 나타낸 것으로서, 무보강 표준 실험체 1개, 탄소섬유시트로 보강한 실험체 1개, Sprayed FRP로 보강한 비교 실험체 4개로, Sprayed FRP로 보강된 실험체는 섬유(탄소 또는 유리) 및 수지(에폭시 또는 비닐에스테르)의 종류를 조합한 ① C-S-GV ② C-S-GE ③ C-S-CV 및 ④ C-S-CE로 구성된다.

Table 4 실험체 일람

실험체	H (mm)	D (mm)	H/D	ρ_s (%)	ρ_w (%)	보강 종류	
						섬유 종류	수지 종류
C-RC	1400	400×400	3.5	0.97	0.14	-	-
C-S-GV	1400	400×400	3.5	0.97	0.14	유리 단섬유	비닐 에스테르
C-S-GE	1400	400×400	3.5	0.97	0.14	유리 단섬유	에폭시
C-CFS	1400	400×400	3.5	0.97	0.14	탄소 섬유시트	에폭시
C-S-CV	1400	400×400	3.5	0.97	0.14	탄소 단섬유	비닐 에스테르
C-S-CE	1400	400×400	3.5	0.97	0.14	탄소 단섬유	에폭시

주) 실험체 기호 (S: Spray, G: 유리섬유, C: 탄소섬유, CFS: 탄소 섬유 시트, V: 비닐에스테르, E: 에폭시)
 H: 기둥 높이, D: 기둥 단면 치수, H/D: 전단 스펙비, ρ_s : 휨철근비, ρ_w : 전단 철근비

3.2 재료 성질

실험에 사용된 콘크리트의 설계강도는 30MPa로 레미콘 제품을 사용하였고, 공시체 실험에 의한 28일 평균 압축강도는 33MPa이었다. 철근은 SD40의 주근 D22와 전단보강근 D10을 사용하였고, 인장강도 시험결과에 의한 철근의 역학적 성질을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 철근의 인장 강도 시험 결과

Type	항복강도 f_y (MPa)	변형률 ϵ_y	인장강도 f_u (MPa)	탄성계수 E_s (MPa)	연신율 (%)
D22	388.6	2.169×10^{-6}	509.9	1.79×10^5	19.9
D10	481.0	2.528×10^{-6}	547.6	1.90×10^5	17.9

3.3 실험체 설치 및 가력방법

실험체의 설치 및 측정 장치를 Fig. 7에 나타내었다. 축력은 $0.1f'_cA_g$ 인 48ton을 실험체 양쪽에 설치된 100t Actuator를 이용하여 가력 하였으며, 반력벽에 설치된 200t Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 수평하중을 가력 하였다.

한편, 실험체에 역대칭 모멘트가 발생하도록 횡력을 가하는 Actuator의 가력점을 실험체의 중심에 일치시켰으며, 횡 변위는 수평 부재각에 따라 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/20까지 각 3cycle(1/400은 1cycle)씩 단계별로 점증 가력 하였다. 실험체에 적용된 하중 가력 계획도를 Fig. 8에 나타내었다.

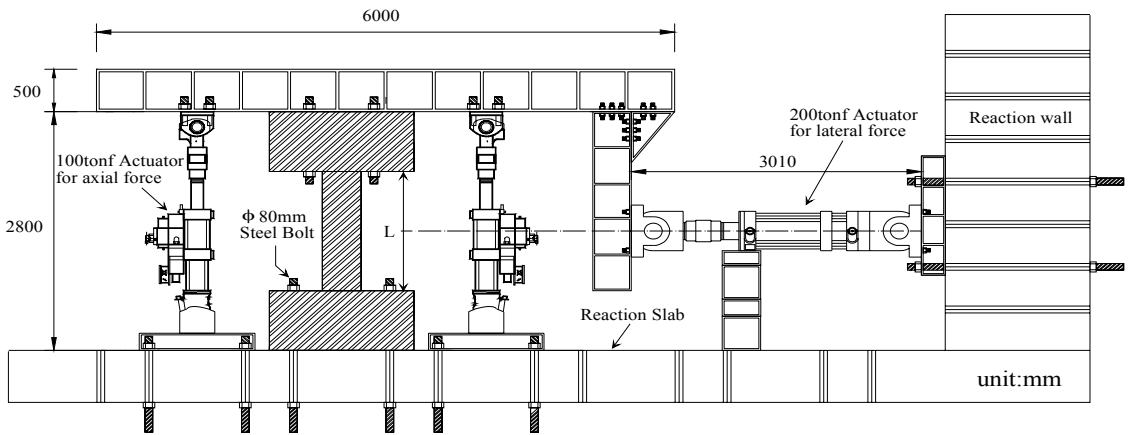


Fig. 7 실험체 설치 및 가력·측정장치

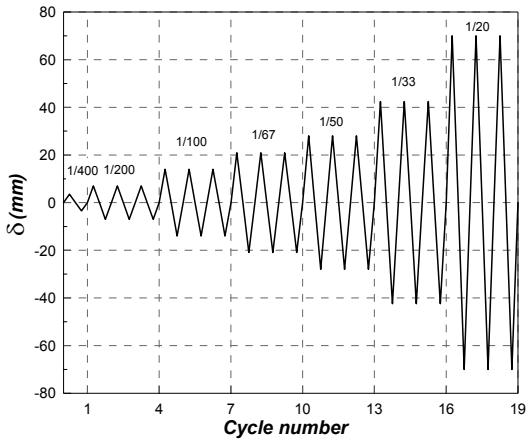


Fig. 8 하중 가력 계획도

4. 구조 실험결과

4.1 균열 상황 및 최종 파괴 형태

Fig. 9에는 각 실험체의 최종 파괴 상황을 나타낸다. 무보강 실험체(C-RC)는 1cycle($R=1/400$)의 부가력 19.6kN에서 좌측 기둥하단 접합부에서 미세한 휨균열이 발생하였고, 3cycle($R=1/200$)의 정가력 220.5kN에서 기둥 상부 중앙에 초기 전단균열이 발생하였다. 부재각이 증가 되면서 휨균열이 점점 커지고 폭 1mm를 넘는 전단 균열이 다수 발생하였다. 17cycle($R=1/20$)에서 단부로 이어진 전단 균열의 폭이 커지면서 콘크리트 피복이 박리되며 최종 파괴되었다.(Fig. 9(a))

Sprayed FRP 공법에 의해 보강된 실험체의 경우, 거의 모든 실험체가 5cycle($R=1/100$) 일 때 기둥 상하단 주두 및 주각부의 보강재 내부에서 섬유가 파단되는 소리가 발생하였다. 비닐에스테르 수지로 보강된 C-S-GV (Fig. 9(b)) 및 C-S-CV (Fig. 9(e)) 실험체가 8cycle($R=1/67$)에서 섬유 파단이 선행하였으며, 그 다음은 에폭시 수지로 보강한 C-S-GE (10cycle, $R=1/67$) (Fig. 9(c)) 및 C-S-CE (11cycle, $R=1/50$) (Fig. 9(f))순으로 섬유의 일부 부분이 파단하였다. 최초 섬유 파단 부위는 주로 정·부 가력시 인장 측면의 하부 모서리 부분에서 시작되었

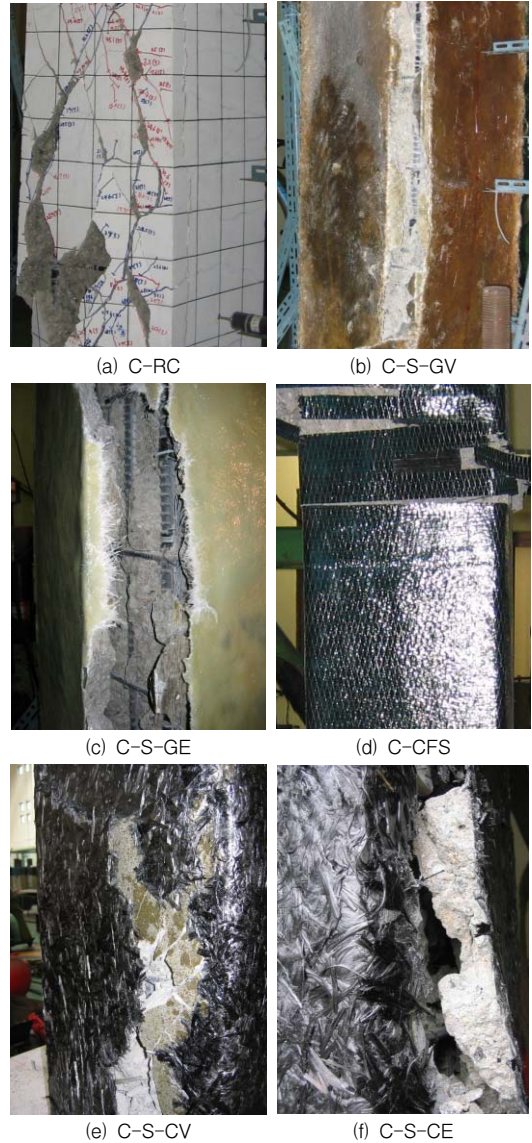


Fig. 9 최종 파괴 상황

고, 부재각이 점점 커짐에 따라 파단된 부위가 상부로 확대되어 최종 파괴 되었다.

C-CFS(고강도 탄소섬유시트 실험체)의 경우 기둥 상부 주두 부분에서 12cycle($R=1/50$) 일 때 콘크리트 압괴로 인하여 시트면에 굴곡이 발생하였고, 14 cycle($R=1/33$)에서 섬유가 취성적으로 박리되면서 최종파괴 되었다.(Fig. 9(d))

최종 파괴형태는 에폭시 수지로 보강된 C-S-GE 및 C-S-CE (Sprayed FRP 보강) 실험체의 경우, 섬유 보강재가 콘크리트와 동시에 박리되는 Rip-off 현상을 관찰 할 수 있었고, 다른 보강 실험체의 경우는 섬유 부분 파단이 두드러졌다.

4.2 하중-변위 이력 곡선

표준 실험체(C-RC) 및 비교 실험체(C-CFS)를 포함한 Sprayed FRP로 보강한 각 실험체의 하중-변위 곡선 및 실험 결과를 Fig. 10 및 Table 6에 각각 나타내었다. 또한, Fig. 11에는 부재 변형각 $R=1/33$ 까지의 정가력 포락선을 나타내었다. Table 6에 나타난 실험체의 항복변위(δ_y)는 기둥 주근이 항복하는 시점의 변위로, 최대 변위(δ_u)는 최대 강도점의 변위로 각각 정의 하였으며, 대부분의 보강 실험체는 5cycle ($R=1/100$) 부근에서 항복하였다.

한편, 기준 실험체(C-RC)는 5cycle에서 353kN의 최대 내력을 보였고, Sprayed FRP로 보강된 실험체 및 탄소섬유시트로 보강된 C-CFS의 경우, 최대하중에서의 변위가 8cycle($R=1/67$) 부근에서 나타났으며, 무 보강 실험체 대비 약 10%~50% 높은 최대 강도를 나타내었다. 또한, Table 6에 나타낸 바와 같이, 변위 연성비($\mu=\delta_u/\delta_y$)에서도 기준 실험체(C-RC) 보다 약 13.3% 높은 연성능력을 나타내었다.

4.3 기준 실험체 대비 보강효과 분석

Table 6, Fig. 10 및 Fig. 11에 나타낸 바와 같이, Sprayed FRP 실험체 및 C-CFS(탄소섬유시트)는 기준실험체(C-RC)에 비해 높은 최대강도를 나타내었다. 실험체 중 C-CFS가 가장 큰 최대강도를 나타내었으며, C-RC에 비해 약 50%의 강도 증가를 보여주었고, Sprayed FRP로 보강된 실험체 중 비닐에

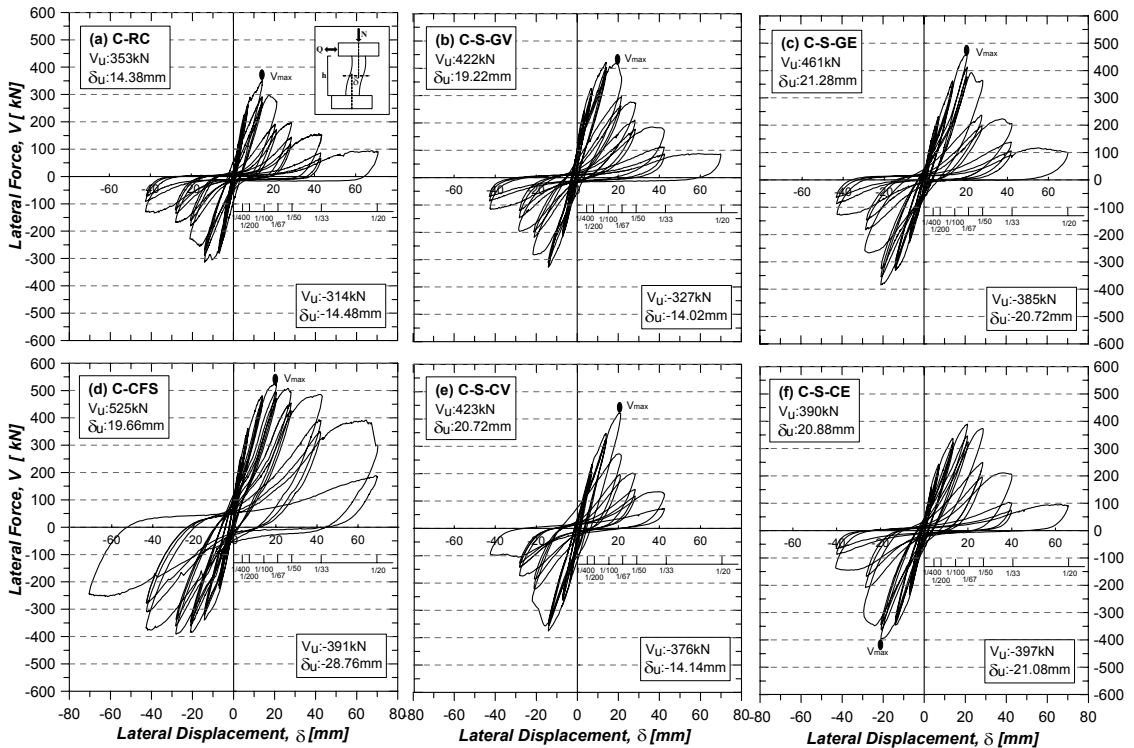


Fig. 10 하중-변위 곡선

Table 6 실험 결과

실험체		V_y [kN]	δ_y [mm]	V_u [kN]	δ_u [mm]	μ [δ_u/δ_y]	k_u [kN/mm]	최종 파괴양상
C-RC	+	287	9.04	353	14.38	1.59	21.69	-
	-			314	14.48			
C-S-GV	+	373	10.16	422	19.22	1.89	29.10	보강재박리
	-			327	14.02			
C-S-GE	+	321	11.9	461	21.28	1.79	25.72	실험체 + 보강재박리
	-			385	20.72			
C-CFS	+	452	11.7	525	19.66	1.68	33.16	시트박리
	-			391	28.76			
C-S-CV	+	306	11.28	423	20.72	1.84	24.70	보강재박리
	-			376	14.14			
C-S-CE	+	307	11.52	390	20.88	1.81	23.69	실험체 + 보강재박리
	-			397	21.08			

Note) V_y : 항복하중, δ_y : 항복변위, V_u : 최대하중, δ_u : 최대변위, μ : 변위 연성비,

k_u : 수평변위 14.48mm [기준 실험체 (C-RC)의 최대 내력시 변위점]에서의 원점에 대한 할선강성

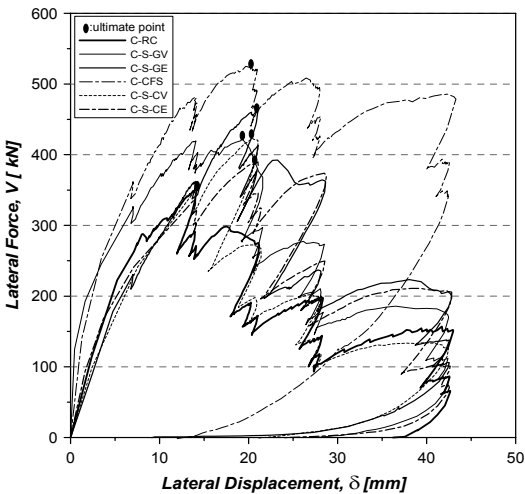


Fig. 11 하중-변위 곡선 포락선

스테르 수치로 보강된 C-S-GV와 C-S-CV 실험체의 경우는 기준 실험체에 비해 약 20%의 강도증가를 보였으며, 에폭시 수치로 보강된 C-S-CE 및 C-S-GE의 경우는 각각 10% 및 30%의 강도증진을 보여주었다. 이것은 Sprayed FRP로 보강된 실험체가 최대 강도 면에서 기준 실험체대비 평균 1.2배의 보강효과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한, Sprayed FRP로 보강된 실험체는 C-CFS의 최대 강도의 74%~88%를 확보하였으나, C-CFS의 탄소섬유시트가 고강도 시트(일반강도의 약 1.5배)임을 고려한다면, C-CFS

와 동등 수준의 보강효과를 나타낸 것으로 사료된다. 항복 강도(V_y)도 또한 Sprayed FRP로 보강된 모든 실험체가 기준 실험체(C-RC)에 비해 평균 1.14배 증가하여 Sprayed FRP 보강에 의한 부재의 전단 저항 성능이 향상된 것으로 사료된다.

한편, 항복변위(δ_y)에 대한 최대변위(δ_u)의 비로써 정의된 Table 6에 나타난 변위 연성비(μ)에서도 Sprayed FRP로 보강된 실험체 모두 기준 실험체에 비해 높은 연성비를 보여주었으며, 평균적으로 1.15배 (15%) 증가를 나타내었다.

5. 기존 FRP 시트 전단 설계식의 고찰 및 Sprayed FRP 보강법의 적용 가능성 검토

보강재 효과를 고려한 기둥의 최대전단내력에 대한 기존 제안식은 식(2)에 나타난 일본방재협회⁽⁸⁾ 및 식(3)에 나타난 Truss-Arch식⁽⁶⁾을 수정 제안한 일본건축학회 전단내력식⁽⁷⁾이 있으며, 식(3)의 일본건축학회 제안식에서는 강도저감계수(α)를 기존 실험결과를 바탕으로 통계·분석하여 $\alpha=0.67$ 을 제시하고 있다. 상기 두 식 모두 기존 철근콘크리트 기둥의 전단내력 평가식에서 섬유 보강량을 횡보강근으로 환산하여 수정되어진 것이다.

한편, 문헌⁽²⁾에서는 상기 기존 제안식에 의한 이론

값과 FRP Sheet로 보강한 실험값을 상호 비교 및 검토 하였다. 그 결과, 식(2)에 나타난 일본방재협회식에 의한 이론값($\alpha=1.0$)이 일본건축학회식(수정 Truss-Arch 식)에 의한 이론값($\alpha=0.67$) 보다 평균 18% 내외의 오차를 보여, 신뢰성이 높다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 일본방재협회의 내력식과 수정 Truss-Arch식을 바탕으로 Sprayed FRP로 보강한 전단기 등의 전단내력식을 비교·검토하여, Sprayed FRP 보강법 강도저감계수[식(4) 및 (5)의 α_1 및 α_2]를 제안하였다.

$$V_1 = \left\{ \frac{0.053P_t^{0.23} \cdot (17.6 + f_{ck})}{\frac{M}{Qd} + 0.12} + \right. \quad (2)$$

$$\left. 0.845\sqrt{{}_sP_w {}_s\sigma_w + \alpha {}_fP_w {}_f\sigma_w + 0.1\sigma_0}\right\} \cdot b \cdot j(N)$$

단, $M/Qd=(L/d)/2$ 가 1이하인 경우는 1로 하고, 3이상일 때는 3으로 한다.

여기서 P_t : 인장철근비(%), f_{ck} : 콘크리트의 압축 강도(MPa), $M/Qd=(L/d)/2$: 전단 스펬비, L : 기둥의 순 스펬(mm), d : 유효 춤(mm), ${}_sP_w$: 전단철근의 전단보강비, ${}_s\sigma_w$: 전단철근의 항복강도(MPa), ${}_fP_w$: CFS의 전단보강비, ${}_f\sigma_w$: CFS의 인장강도(MPa), α : 강도저감계수, σ_0 : 축응력(MPa), b : 기둥 단면의 폭(mm), j_t : 철근 중심 간의 거리(mm)

$$V_2 = b \cdot j_t \cdot \sum(P_w \cdot \sigma_w) \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot \nu \cdot f_{ck} \cdot b \cdot D/2 \quad (3)$$

단, $\sum(P_w \cdot \sigma_w) \leq \nu \cdot f_{ck}/2$ 일 경우는 $\sum(P_w \cdot \sigma_w)$ 을 적용하며, $0.3\% < {}_fP_w < 2.0\%$ 일 경우만 적용 가능하다.

여기서, $\sum(P_w \cdot \sigma_w) = {}_sP_w \cdot {}_s\sigma_w + \alpha \cdot {}_fP_w \cdot {}_f\sigma_w$, D : 기둥 단면 높이(mm), $\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$,

$\nu = 0.7 - f_{ck}/200$: 콘크리트 압축강도의 유효계수,
 $\cot \phi = \min\{2.0, j_t/(D \cdot \tan \theta), \sqrt{\nu f_{ck}/\sum(P_w \cdot \sigma_w)} - 1.0\}$
 $\beta = \{(1 + \cot^2 \phi) \cdot \sum(P_w \cdot \sigma_w)\}/(\nu \cdot f_{ck})$, ϕ : 트러스기구의 압축 속각도

$$\alpha_1 = \left[\left\{ \frac{V_1}{bj} - \frac{0.053P_t^{0.23}(17.6 + f_{ck})}{M/Qd + 0.12} - 0.1\sigma_0 \right\} / 0.845 \right]^2 - {}_sP_w {}_s\sigma_w / {}_fP_w {}_f\sigma_w \quad (4)$$

$$/ (b \cdot j_t \cdot \cot \phi) - {}_sP_w {}_s\sigma_w / {}_fP_w {}_f\sigma_w \quad (5)$$

식(2)의 일본방재협회식과 식(3)의 수정 Truss-Arch식에 Sprayed FRP를 적용함에 있어서, ${}_fP_w$ 에는 보강재의 설계두께를 고려한 Sprayed FRP의 전단보강비, ${}_f\sigma_w$ 에는 재료 시험을 통해 얻은 보강재의 인장강도(Table 7 참조)를 사용하여 단섬유와 수지의 배합에 따른 물성을 고려하였다.

실제 Sprayed FRP의 거동은 최대하중 내외에서 박리 및 부착파괴가 발생되므로 기존의 FRP Sheet 보강법⁽²⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾과 동일하게 Sprayed FRP의 전단설계식에 강도저감계수의 적용이 필요하다. 상기 Sprayed FRP용 전단 강도저감계수(α_1 , α_2)는 식(4) [일본방재협회식, α_1] 및 식(5) [수정 Truss-Arch식, α_2]를 이용하여 계산 가능하며, 본 연구에서는 Table 6의 실험결과(exp.V)와 식(2) 및 식(3)을 이용한 계산값(calc.V)을 비교하여, 식(4) 및 식(5)의 Sprayed FRP용 전단 강도저감계수(α)를 제안하였다.

Table 7 강도 저감 계수 제안

실험체	보강재 인장강도 (MPa)	α 강도저감계수	
		일본방재협회 α_1	수정 Truss-Arch α_2
C-RC	-	-	-
C-S-GV	119.4	2.18	0.49
C-S-GE	121.7	2.25	0.48
C-CFS	3622	-	-
C-S-CV	167.9	1.47	0.40
C-S-CE	186.1	0.73	0.33
평균값	-	1.66	0.43

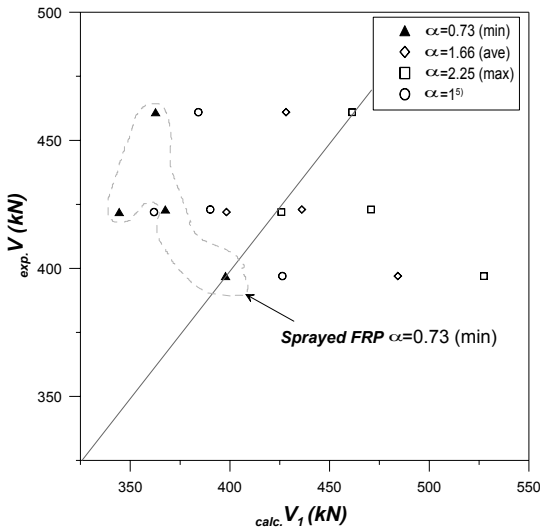


Fig. 12 실험값과 이론값(일본 방재협회식)의 비교

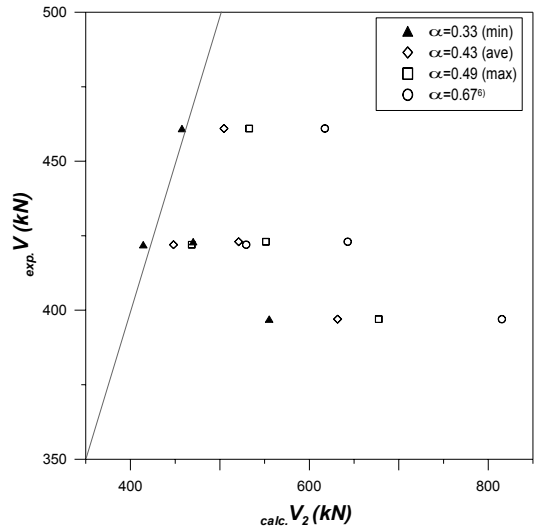


Fig. 13 실험값과 이론값(Truss Arch식)의 비교

Table 8 Sprayed FRP 실험체 이론식에 의한 내력 $calc. V$ 및 실험에 의한 결과 $exp. V$ 비교

실험체	$exp. V$ (kN)	$calc. V$ (일본방재협회식) (kN)				$calc. V$ (수정 Truss-Arch식) (kN)			
		$\alpha=0.73$ [하한치]	$\alpha=1.00$ [문헌 5제한]	$\alpha=1.66$ [평균]	$\alpha=2.25$ [상한치]	$\alpha=0.33$ [하한치]	$\alpha=0.43$ [평균]	$\alpha=0.49$ [상한치]	$\alpha=0.67$ [문헌 7제한]
C-RC	353	280	280	280	280	303	303	303	303
C-S-GV	422	344	362	398	426	414	448	468	529
C-S-GE	461	363	384	428	461	458	505	533	617
C-S-CV	423	368	390	436	471	470	521	551	643
C-S-CE	397	398	426	484	527	555	632	678	815

Table 7에 나타난 바와 같이 식(4) [일본방재협회식]에서는 Sprayed FRP용 강도저감계수(α_1)는 0.73~2.25범위로 분포되며, 평균값은 1.66이다. 한편, 식(5) [수정 Truss-Arch식, α_2]에서는 하한값 0.33, 상한값 0.49 및 평균값 0.43을 얻었다.

Fig. 12와 Fig. 13 및 Table 8에는 본 연구에서 유도한 Sprayed FRP 강도감소계수 및 일본방재협회 ($\alpha=1.0$)와 수정 Truss-Arch식에서 제안한 강도 감소계수 $\alpha=0.67$ 을 각각의 전단내력식에 적용한 이론값($calc. V$)과 실험 결과값 ($exp. V$)을 비교하여 나타내었다. 식(5)에 나타난 수정 Truss-Arch식은 식(4)의 일본방재협회식에 비교하여 다소 Sprayed FRP 실험값을 과소 평가하는 경향을 나타내었다.

전단설계의 안전성능을 고려한다면 Sprayed FRP 보강법에서는 일본방재협회식에 강도저감계수 $\alpha=0.73$ (하한치)을 이용한 전단 내력식이 가장 유용한 이론식이라고 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 시공성 및 현장적용이 우수한 Sprayed FRP 공법을 개발하는 것을 목적으로 최적물성을 제안하기 위한 재료시험 및 구조실험을 실시하였다. 선행연구인 재료시험을 통하여 기존 FRP Sheet 1겹의 보강강도를 발휘하는데 필요한 최적의 물성치를 제안하였으며, 이를 바탕으로 전단 파괴형 기동의 구조설

험에 적용하여 Sprayed FRP의 보강성능을 파악하였다. 최종적으로 기존 FRP 보강 설계식의 적용 가능성을 분석하여 Sprayed FRP 보강용 설계식을 검토하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재료시험결과, 최적물성치로써 유리 및 탄소단섬유의 길이는 3.8cm, 섬유와 수지의 배합비율은 1:2로 제안하였다. 또한 Sprayed FRP의 설계두께는 유리단섬유와 에폭시 및 비닐에스테르 수지의 경우 4.2mm, 4.4mm, 탄소단섬유의 경우 3.0mm, 4.0mm로 각각 나타났다.
- 2) Sprayed FRP로 보강된 실험체는 최대강도에서 무보강 실험체 대비 10%~30%의 강도 증가를 보였고, 변위 연성비에서 평균 1.15배(15%)의 연성 증가를 나타내었다.
- 3) 기존 FRP 보강 설계식의 적용 가능성을 분석한 결과, 전단설계의 안전성능을 고려한다면 Sprayed FRP 보강법에서는 일본방재협회식에 강도저감계수 $\alpha=0.73$ 을 이용한 전단 내력식이 가장 유용한 이론식이라고 사료된다.
- 4) 향후, Sprayed FRP 공법의 실용성을 위하여 시공두께 및 설계두께 오차의 영향, 경화시간 및 보강재의 불완전 경화로 인한 조기박리에 관한 연구 등이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 GS건설(주)의 연구비 지원 및 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의

지원을 받아 수행된 연구임 (지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단). 또한, 연구에 많은 협조를 주신 상영엔지니어링(주), 정도이앤피(주)에 감사드립니다.

참고문헌

1. KS M 3381 "유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법", 한국표준협회, 2004.
2. 강경환, "탄소 섬유 시트로 전단 보강된 철근 콘크리트 기둥의 성능 평가", 한양대학교 석사학위논문, 1999.
3. Kent A. Harries and Stanle C. Young "Sprayed Fiber Reinforced Composite Materials for Infrastructure Rehabilitation", Concrete international 2003, pp. 47-51.
4. Tomoki Furuta and et al., "Study on Sprayed FRP System for Strengthening RC Structures", Proceedings of AIJ 2000, No. 23171, 2000, pp. 341-342.
5. Nemkumar Banthia, Natarajan Nandakumar and Andrew Boyd "Sprayed Fiber Reinforced Polymers: From Laboratory to a Real Bridge", Concrete international, Nov. 2002, pp. 47-52.
6. ACI318-05: Building code requirements for structural concrete (318-05) and Commentary (318R-05). ACI, 2005.
7. 日本建築學會・構造委員會, "連續纖維補講材のコンクリート構造への應用", 日本建築學會, 1998年 9月 11日.
8. (財)日本建築防災協會, "耐震 改修 設計·施工指針", 日本建築學會, 1999.

금행 (접수일자 : 2006년 11월 2일)