



탄소섬유판 (CFRP Strip)으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단거동

임동환^{1)*} · 남민희¹⁾

¹⁾동서대학교 건축토목공학부 토목공학전공

Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Strips

Dong-Hwan Lim^{1)*} and Min-Hee Nam¹⁾

¹⁾Dept of Civil Engineering, Dongseo University, Busan 617-833, Korea

ABSTRACT The main goal of this study was to examine the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP strips. Seven rectangular beams were tested. The test variables were the configuration types, spacing length of CFRP strips and the amount of reinforced stirrups bars. From this experimental study, the shear capacity of beams strengthened with CFRP increased significantly compared to the beam without CFRP strip. Maximum increase of ultimate shear strength was found about 100% more than that of the beam without a CFRP strip and the CFRP strips attached in the shear region can resist the occurrence of the initial shear cracks and the propagation of major shear cracks. In this test, most of the shear strengthened beams failed suddenly due to the debonding of CFRP strips. A calculation of the shear strength of reinforced beams strengthened with CFRP strips based on the effective stresses was conducted and the comparisons were made with the test results.

Keywords : carbon fiber reinforced plastic (CFRP) strips, shear behavior, failure modes, stress-strain relation

1. 서 론

섬유보강 폴리머 (fiber reinforced polymer, FRP)는 역학적 특성, 화학저항성 및 내구성능이 우수하여 철근콘크리트구조물의 보강 신소재로 널리 인식되고 있다. 또한 탄소섬유판 (carbon fiber reinforced plastic (CFRP) strips)을 철근콘크리트구조물의 표면에 부착하는 보강 방식은 그 시공 성능 및 제반 역학적 성능이 우수하여 구조물의 보강에 매우 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 최근 들어 국내외에서는 탄소섬유판 (CFRP strips)으로 보강된 철근콘크리트 부재에 대한 실험 및 해석적인 연구가 다양하게 수행되어져 왔으며,¹⁻¹³⁾ 탄소섬유판 (CFRP strips)으로 보강된 철근콘크리트 부재는 휨 및 전단 강성 등의 역학적 성능을 현저하게 개선하는 효과가 있다. 탄소섬유판으로 보강된 콘크리트 부재의 전단거동 연구는 국내 및 유럽을 중심으로 다양하게 진행되고 있다.

특히 탄소섬유판 부착 콘크리트 보의 파괴형태에 따른 전단강성의 효과 및 이에 대한 설계 기준 개발 및 해석 모델 등이 외국의 연구자들에 의해 보고되고 있으며,^{4,6,8)} 또한 전단균열각과 전단경간비를 고려한 전단강도 예측

모델 등에 대한 연구가 수행되어져 왔다.^{2-3,10,11,13)} 탄소섬유판은 전단보강 효과가 매우 우수하여, 기존의 탄소섬유 쉬트에 의한 보강방식에서 탄소섬유판 보강 방식이 적극적으로 채택되고 있다. 또한 외국에서는 전단보강용 탄소섬유판 제품을 출시하여 유럽을 중심으로 이에 대한 활용이 증가되고 있는 실정이다.

탄소섬유판을 부착한 철근콘크리트 부재의 전단거동은 전단철근과 탄소섬유판의 상이한 재료특성 및 부착된 탄소섬유판의 콘크리트 내부에 배근된 전단철근에 미치는 영향 등으로 인하여 그 거동이 복잡하며, 부재의 기하학적 형상, 재하 형태 및 배근 전단 철근비 등의 다양한 인자로 인하여, 전단거동 특성 구명을 어렵게 하고 있다.

본 연구는 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단거동 특성 및 파괴 양상을 구명함에 그 목적이 있다. 이를 위하여 다양한 변수를 포함하는 실험 연구가 수행되어졌으며, 탄소섬유판 보강 면적 및 보강 간격에 따른 전단보강 효과를 구명하였다. 또한 전단철근의 배근에 따른 탄소섬유판의 전단에 대한 기여 효과를 분석하기 위하여 전단철근 및 탄소섬유판의 동일 위치에 발생하는 변형률을 고찰 분석 하였으며, 전단파괴 시 탄소섬유판에 발생하는 응력을 기초로 한 전단강도를 계산하였다.

*Corresponding author E-mail: limdh@dongseo.ac.kr

Received August 7, 2007, Revised January 15, 2008, Accepted February 28, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

2. 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 실험

2.1 실험 부재

본 실험에서 사용된 콘크리트는 28일 압축강도가 40 MPa 이 발현될 수 있도록 배합설계 되었으며, 길이 3,000 mm, 폭 200 mm, 높이 350 mm의 직사각형 보 7개를 제작하여 실험을 수행하였다. 주 실험변수는 보강 탄소섬유판의 설치 간격, 탄소섬유판 면적 및 전단철근의 배근량 등을 채택 하였다. Table 1은 본 실험에서 채택한 실험 시편의 종류와 실험 변수를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 보의 전단 파괴를 유도하기 위하여, 인장철근비를 균형철근비 보다 크게 배근하였으며, 사용된 인장철근은 2D16 (SD400)이다. 전단철근은 D13을 150 mm 및 300 mm 간격으로 배근하여 전단철근 보강 상태에 따른 탄소섬유판의 전단기여 정도를 파악하고자 하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험부재의 배근도를 각각

Table 1 Test specimens and test variables

Specimens	CFRP		Steel bars	
	Shear		Flexural	Stirrup
	Type	Spacing		
CONT	-	-	3D22	-
SCF-15U-NO	A1(U) (B = 50 mm)	150 mm	3D22	-
SCF-25U-NO	A1(U) (B = 50 mm)	250 mm	3D22	-
SCF-25I-NO	A1(I) (B = 50 mm)	250 mm	3D22	-
SCF-12.5I-NO	A1(I) (B = 50 mm)	125 mm	3D22	-
SCF-25I-A	A1(I) (B = 50 mm)	250 mm	3D22	D13@150
SCF-25I-B	A1(I) (B = 50 mm)	250 mm	3D22	D13@300

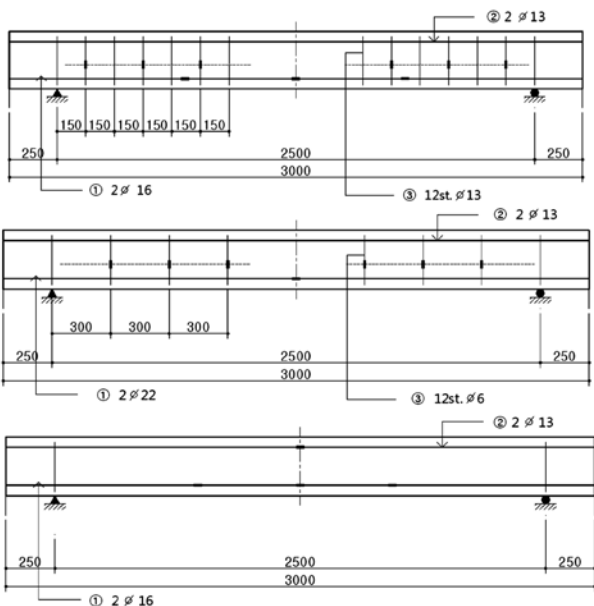


Fig. 1 Reinforcement details for test specimens

나타낸 것이다.

2.2 탄소 섬유판 (CFRP strip)

본 실험에서 사용된 탄소섬유판은 유럽 등지에서 널리 사용되고 있는 두께 1.2 mm 폭 50 mm의 SIKA CarborDur S strip이며, 위 탄소섬유판을 전단구간에 수직으로 부착하여 부재의 전단 효과를 분석하였다. 탄소섬유판의 재료물성 및 인장강도는 Table 2와 같다.

또한 전단철근 배근양에 따른 탄소섬유판의 보강 효과를 구명하기 위하여, 스테럽이 전혀 배근되지 않은 부재 및 스테럽이 150 mm 간격 및 300 mm 간격으로 배근된 부재를 제작 하였다. 그리고 탄소섬유판 보강 형태에 따른 효과를 구명하기 위하여, 전단보강 방식으로 널리 쓰이고 있는 U자 형태 (전단철근 형태와 동일하게 탄소섬유판을 바닥까지 연결하는 형태)와 부재의 측면부만 보강하는 I자 형태로 탄소섬유판을 보강하여 실험을 수행하였으며, 경제성 및 시공성을 만족하는 보강 효율이 좋은 전단보강 방식을 구명하고자 하였다. Fig. 2는 실험부재의 탄소섬유판 부착 형상 및 부착 스트레인지지를 나타낸 것이다.

2.3 실험 방법

본 전단 실험에서는 500 kN 용량의 유압 액추에이터 (hydraulic actuator)를 사용하여 4점 제하방식으로 하중을 단계적으로 제하하였으며 (Fig. 3), 각 실험 부재에는 변위계 (LVDT), 콘크리트 스트레인지지, 철근 스트레인지지, 탄소섬유판 스트레인지지 및 다이얼게이지를 부착하여 변형을 및 변위 등을 분석하였다. 위 측정값은 데이터저장소프트웨어(data acquisition software)를 통해 처리 분석되었다.

Table 2 Characteristics of SIKA CarborDur strips

Density	Tensile strength (N/mm ²)	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Elongation at break (%)
1.6	2,800	165,000	16.9

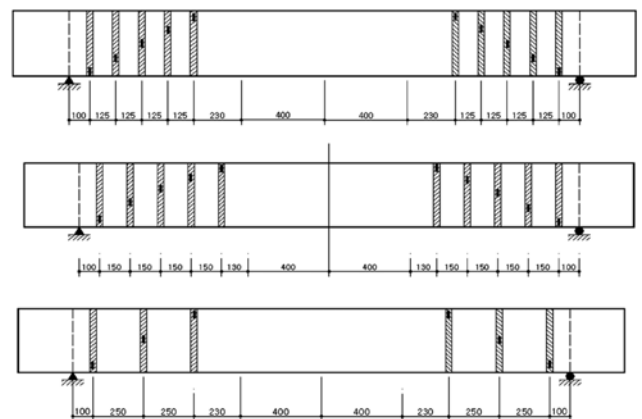


Fig. 2 CFRP strip configurations and locations of strain gages

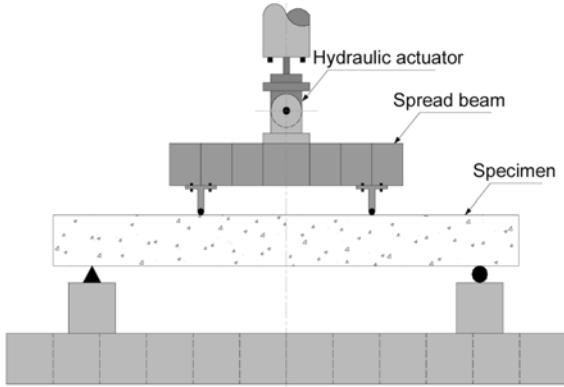


Fig. 3 Test setup

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 전단강도

Table 3은 탄소섬유판으로 전단 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도를 나타낸 것이다. 위 표 및 그림에서 알 수 있듯이, 전단 구간에 부착된 탄소섬유판은 전단균열 발생 및 진전을 구속하여 전단강도의 증진에 탁월한 효과를 보이고 있으며, 극한 전단강도는 보강되지 않은 보 (CONT-S)에 비하여 현저하게 증진하는 것으로 나타났다. 탄소섬유판으로 보강된 부재의 전단강성은 탄소섬유의 부착면적이 증가할수록 또한 부착 간격이 좁을수록 높게 나타났으며, 전단철근이 배근되지 않은 탄소섬유판 철근 콘크리트 부재 (SCF-12.5I-NO)의 전단강도는 탄소섬유판이 없는 부재보다 84% 이상이 증진되는 것으로 나타났다. 전단철근이 보강된 보 (SCF-25I-*)의 경우에는 탄소섬유판의 부착으로 인한 전단강도의 증진율은 부착되지 않은 기준보 (CONT-S) 보다 160% 이상의 증진 효과가 있음이 나타났다. 따라서 탄소섬유판은 노후화된 기존 부재의 전단강성을 증진시키기 위한 적합한 보강재로 판단된다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이, 최적의 탄소섬유판 보강 형태를 구명하기 위하여, 대표적인 전단보강 방식으로 널리 쓰이고 있는 U자 형태 및 I자 형태로 탄소섬유판을 보강하여 실험을 수행하였다. 본 실험 결과, 극한 전단강도는 탄소섬유판 전단보강 형태 (U 및 I형태)에 크게 의존되지 않은 것으로 나타났으며, 따라서 탄소섬유판을 측면부에 I자 형태로 붙여 보강하는 것이 경제

Table 3 Cracking and ultimate strength

Specimens	CFRP strip		Stirrups	Ultimate strength (kN)	Increase (%)
	Type	Spacing (mm)			
CONT-S	-	-	-	137.35	-
SCF-15U-NO	U	150	-	248.51	81
SCF-25U-NO	U	250	-	223.62	63
SCF-25I-NO	I	250	-	222.96	62
SCF-12.5I-NO	I	125	-	253.21	84
SCF-25I-A	I	250	D13 @150	366.78	167
SCF-25I-B	I	250	D13 @300	362.73	164

성 및 시공성에 유리한 것으로 사료된다.

3.2 하중-처짐 관계 특성

탄소섬유판으로 전단보강된 철근콘크리트 부재는 보강되지 않은 철근콘크리트 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형 구간이 확대되며, 강성 및 극한 내력이 크게 증진되는 것으로 나타났다. Fig. 4는 전단철근이 없는 철근콘크리트 부재의 하중-처짐 관계 특성을 나타내는 그림으로서, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 전한 바와 같이 극한 강성이 크게 증진되는 것으로 보여주고 있다. CONT-S 부재는 전단철근 및 탄소섬유판이 전혀 보강되지 않은 부재로서, 위 부재는 하중이 증가 하면서 거의 선형적인 하중-처짐 특성을 보이다가 전단균열이 일부 발생하면서 처짐이 급격히 증가 하다가 취성적인 전단파괴가 일어나고 있음을 보이고 있다. 그러나 탄소섬유판으로 전단 보강된 철근콘크리트 부재는 매우 높은 수준에 이르기까지 거의 선형적인 특성을 나타내고 있으며, 극한상태에서 부재는 섬유판의 탈락과 동시에 급격히 전단파괴가 발생하였다. 또한 탄소섬유판을 보의 바닥부까지 보강한 U자 형태 및 보의 측면부만 보강한 I자 형태로 보강된 경우 모두 극한강도는 비슷하게 나타났다. 따라서 전단보강 시 측면부에만 I자 형태로 붙여 보강하는 것이 경제성 및 시공성에 유리한 것으로 사료된다. Fig. 5는 전단철근이 배근된 보에 탄소섬유판으로 보강한 철근콘크리트 부재의 하중-처짐 관계 특성을

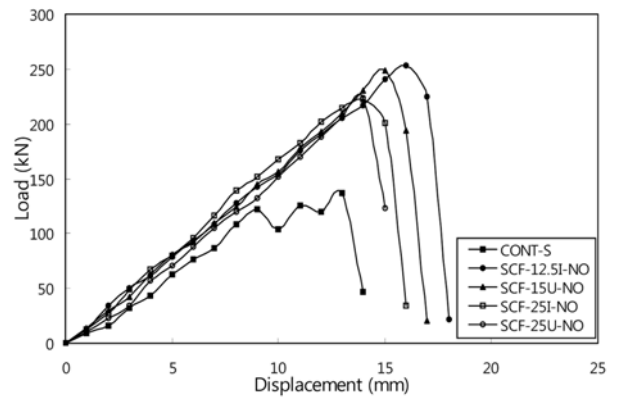


Fig. 4 Load-deflection characteristics for the SCF-*-NO specimen series

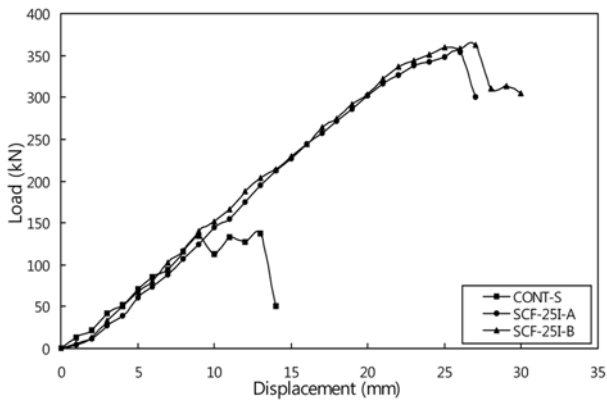


Fig. 5 Load-deflection characteristics for the SCF-*-NO specimen series

나타내는 그림으로서, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 전한 바와 같이 극한 강성이 크게 증진되는 것으로 보여주고 있으며, 극한강도는 약 160% 이상의 강도 증진 효과를 나타내며, 따라서 탄소섬유판의 전단부착 효과는 매우 탁월한 것으로 나타났다.

3.3 탄소섬유판의 변형률

Fig. 6은 주 전단 균열 발생이 예측되는 지점, 즉 지점으로부터 550 mm 떨어진 전단 구간 내에 위치한 탄소섬유판의 변형률을 도시하고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 초기 전단균열이 발생한 이후, 탄소섬유판의 변형률은 증진하나 탄소섬유판은 전단균열 진행을 억제하고, 보에 작용하는 전단력에 대한 지지 능력의 우수함이 실험 결과 나타났다. 또한 탄소섬유판의 부착 탈락으로 인해 전단 능력이 소실될 때 까지 전단보강된 탄소섬유판의 인장 변형률은 약 $700 \mu\epsilon$ 에서 $1,200 \mu\epsilon$ 의 범주에 존재하고 있으며, 평균 약 $1,000 \mu\epsilon$ 수준인 것으로 나타나고 있다. 이를 통하여, 탄소섬유판이 전단력을 지지하는 능력을 도출할 수 있으며, 따라서 탄소섬유판으로 전단 보강된 철근콘크리트 부재의 극한 전단 내력을 도출할 수 있다. Fig. 7은 스티럽이 배근된 탄소섬유판

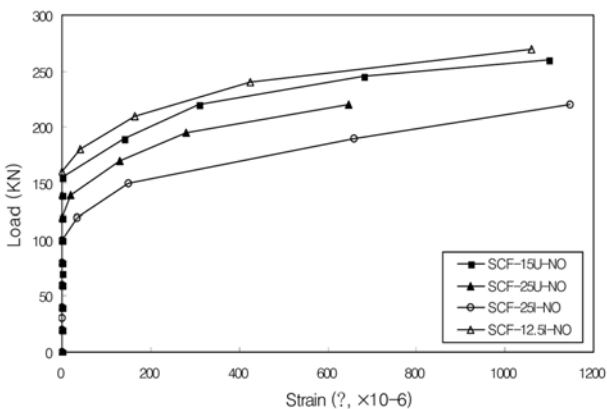


Fig. 6 Load-strain characteristics for CFRP strip (SCF-*-NO specimen series, 550 mm from left support)

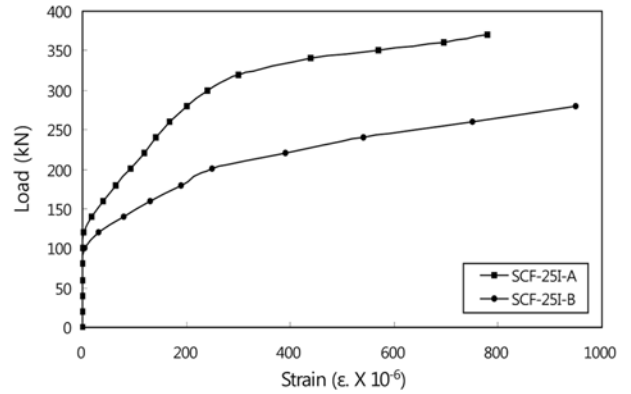


Fig. 7 Load-strain characteristics for CFRP strip (SCF-25I-* specimen series, 550 mm from left support)

보강 철근콘크리트 보의 경우 주 전단 균열이 예측되는 지점으로부터 550 mm 떨어진 전단 구간 내에 위치한 탄소섬유판의 변형률을 도시 하고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 탄소섬유판은 전단 저항 능력이 우수하여 100 kN에서 120 kN에 이르기까지 전단균열발생을 억제하고 있으며, 또한 전단철근이 150 mm 간격으로 배근된 부재 (SCF-25I-A)가 300 mm로 배근된 부재 (SCF-25I-B)보다 초기 전단균열을 억제하는 능력이 훨씬 우수함을 알 수 있다. 또한 탄소섬유판의 극한 변형률은 $800 \mu\epsilon$ 및 $954 \mu\epsilon$ 으로 나타났다.

3.4 전단 철근의 변형률

Figs. 8,9는 위 부재의 전단철근 응력-변형률 관계를 도시한 것으로써, Fig. 8은 지점으로부터 900 mm 떨어진 곳의 변형률을 측정된 것이며, Fig. 9는 600 mm 떨어진 위치의 전단철근 변형률이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 부재 지점으로부터 900 mm 떨어진 곳의 초기 전단균열은 약 100 kN에서 발생하고 있으며 전단철근이 150 mm로 배근된 SCF-25I-A 부재가 SCF-25I-B 부재보다 전단철근의 인장 변형률이 적게 발생하고 있다. 또한 지점으로부터 600 mm 떨어진 위치 (Fig. 9)에서는 초기 전단균열이 약 80 kN에서 발생하였으며, 초기 전단균열은 위 실험 결과 지점에서 600 mm 떨어진 곳에서 최초로 발생

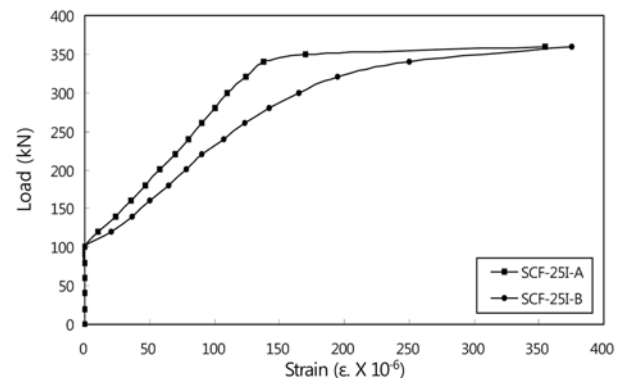


Fig. 8 Load-strain characteristics for stirrups (SCF-25I-* specimen series, 900 mm from support)

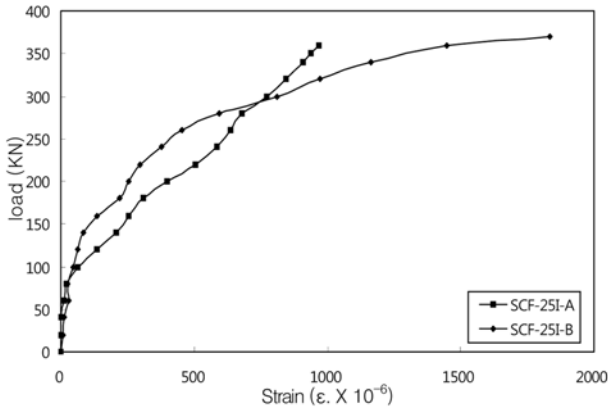


Fig. 9 Load-strain characteristics for stirrups (SCF-25I-* specimen series, 600 mm from support)

하고 있음을 알 수 있었다.

Table 4는 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 초기 균열 및 극한 상태에서의 전단철근 및 탄소섬유판의 변형률을 나타낸 것이다. 본 실험 결과, 탄소섬유판에 발생하는 인장 변형률은 탄소섬유판의 형상 및 부착 길이에 관계없이 720 $\mu\epsilon$ 에서 1,094 $\mu\epsilon$ 의 범주에 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터, 탄소섬유판으로 전단 보강된 철근콘크리트 부재는 탄소섬유판의 부착 간격 및 부착 면적에 관계없이 부재가 파괴될 때 발생하는 탄소섬유판의 변형률은 탄소섬유판 파괴인장 강도의 10% 수준에도 도달하지 못한다는 사실을 알 수 있다. 위 결과로부터, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보가 계면부착으로 전단파괴가 일어날 시점의 유효 탄소섬유판 응력을 계산 할 수 있으며, 따라서 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단강성을 도출할 수 있다.

3.5 파괴 형상

실험 결과 콘크리트의 초기 균열은 휨 인장 응력에 지배되고, 약 40~50 kN의 하중 단계에서 초기 휨 균열이 발생하였다. 탄소섬유판 보강 콘크리트의 종류에 따라 다소 차이는 있으나, 그 이후 전단균열이 지점부에서 유효 길이 만큼 떨어진 곳에서 약 80~100 kN의 하중 단계에서 발생하였으며, 그 하중 전단부에 탄소섬유판에 배근

Table 4 Strains for the steel bars and CFRP strip

Sp.ID	Cracking		Ultimate	
	Stirrup ($\mu\epsilon$)	CFRP ($\mu\epsilon$)	Stirrup ($\mu\epsilon$)	CFRP ($\mu\epsilon$)
CONT	99.22	-	-	-
SCF-15U-NO	177	-	-	1,094
SCF-25U-NO	-	-	-	721
SCF-25I-NO	127	-	-	1,147
SCF-12.5I-NO	103	-	-	1,060
SCF-25I-A	139.2	-	1,254	954
SCF-25I-B	175.1	-	1,834	800

된 경우 전단 강성이 매우 높고 균열형상도 매우 고르게 분포하는 것으로 나타났다. 또한 최종적으로 탄소섬유판이 본체와 계면 탈락하면서 매우 취성적인 전단파괴를 일으키는 것으로 나타났다. Fig. 10은 탄소섬유판 보강 철근콘크리트 부재의 파괴형상을 도시한 것이다.

4. 탄소섬유판 보강 철근콘크리트 보의 전단 강도

Fig. 11은 탄소섬유가 보강된 전단균열부의 내력을 도시한 것이다. 탄소섬유 보강 콘크리트의 전단강도는 콘크리트의 전단강도, 전단철근의 전단강도 및 탄소섬유판의 전단강도의 합으로 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 V_c 는 콘크리트의 극한 전단강도, V_s 는 전단철근의 전단강도, V_f 는 탄소섬유판의 전단강도, ψ_f 는 탄소섬유판의 강도감소계수이다. 철근의 전단강도 V_s 는 다음과 같이 같다.

$$V_s = n_s A_v f_y \sin \alpha \quad (2)$$

여기서 n_s 는 전단균열부의 스트립의 개수, A_v 는 스트립의

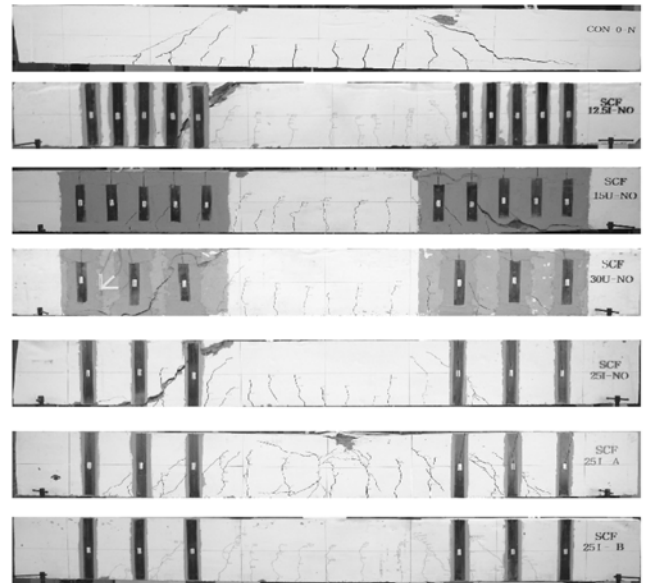


Fig. 10 Failure modes

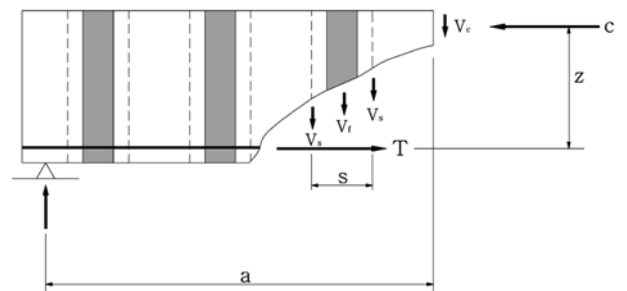


Fig. 11 Internal forces in CFRP strip and RC beam

면적, f_j 는 철근의 항복강도이다. 또한 탄소섬유판의 전단 기여 강도 (V_f)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe}(\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{S_f} \quad (3)$$

여기서 A_{fv} 는 탄소섬유판의 면적, f_{fe} 는 탄소섬유판의 유효응력, S_f 는 탄소섬유판의 간격, d_f 는 탄소섬유판의 유효깊이이다. 탄소섬유판의 면적 A_{fv} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_{fv} = 2n t_f \cdot w_f \quad (4)$$

여기서 t_f 는 탄소섬유판 두께이며 w_f 는 탄소섬유판 폭의 길이이다. 또한 부재의 극한 상태에서의 탄소섬유판의 인장응력 f_{fe} 는 다음과 같다.

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} \cdot E_f \quad (5)$$

여기서 ϵ_{fe} 는 부재의 극한상태에서 나타나는 탄소섬유판 변형률이며, E_f 는 탄소섬유판의 탄성계수이다.

본 연구에서는 탄소섬유판 철근콘크리트 부재에 대한 실험을 실시하여, 보의 극한상태에서의 탄소섬유판 변형률을 도출하였으며, 그 결과는 전술한 바와 같이 Table 4와 같다. 본 연구에서는 실험에서 도출된 탄소섬유판 유효응력을 기본으로 하여 극한 전단강도를 도출하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

위 표에서 알 수 있듯이, 실험에서 도출된 탄소섬유판 유효응력을 기본으로 하여 식 (5)로부터 도출된 전단강도는 실험으로부터 도출된 전단강도와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 전단강도비 (V_{exp}/V_{anal})는 평균 0.97로 나타났다.

5. 결 론

- 1) 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단 강성도 보강 되지 않은 그것에 비해 현저하게 증가

Table 5 Comparisons with experimental and calculated shear strength

Specimens	V_{exp} (kN)	V_{ana} (kN)				V_{exp}/V_{anal}
		V_c	V_s	V_f	Total	
CONT	68.7	73.8	-	-	73.8	0.931
SCF-15U-NO	124.2	-	-	86.6	160.4	0.774
SCF-25U-NO	111.8	-	-	27.0	100.8	1.109
SCF-25I-NO	111.5	-	-	22.7	96.5	1.155
SCF-12.5I-NO	126.6	-	-	83.9	157.7	0.803
SCF-25I-A	183.4	-	117.6	22.7	213.5	0.859
SCF-25I-B	181.3	-	58.8	21.8	154.4	1.174
					average	0.97

하며, 그 증대 폭은 전단철근이 배근되지 않은 부재의 경우 약 80% 이상, 전단철근이 배근된 콘크리트 부재의 경우 160% 이상의 증진효과가 있는 것으로 본 연구결과 나타났다. 또한 탄소섬유판의 전단 보강 간격 및 보강 면적은 강도 증진 효과에 직접적으로 비례하지 않으며, 적은 량의 탄소섬유판으로 보강했을 경우에도 전단강도의 증진효과는 매우 좋은 것으로 나타났다.

- 2) 탄소섬유판을 부재의 하단 부까지 연결하여 부착하는 U자 형태 및 부재의 측면부에만 부착하는 I자 형태의 경우 모두 부재의 전단강도는 비슷하게 나타났다. 따라서 탄소섬유판으로 전단보강을 할 경우, 부재의 측면부에만 부착하는 것이 경제성 및 시공성을 고려할 때 유리할 것으로 사료된다.
- 3) 탄소섬유판 보강 콘크리트 부재가 극한 상태에 도달했을때, 섬유판의 극한 인장 변형률을 약 1,000정도 발생하는 것으로 본 연구에서 나타났으며, 이는 탄소섬유판의 최대변형률의 10%에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 탄소섬유판이 부재와 일체거동을 할 수 있는 새로운 보강방식을 개발한다면, 전단 보강 능력을 획기적으로 향상 시킬 수 있는 것으로 사료된다.
- 4) 본 연구에서는 탄소섬유판에 발생하는 변형률을 기본으로 하여 유효응력을 도출하였으며, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단강도를 계산하였다.

참고문헌

1. Lim, D. H. and Oh, B. H., "Experimental and Theoretical Investigation on the Shear of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 937~944.
2. 심종성, 오홍섭, 문도영, 박경동, "FRP로 전단보강된 철근콘크리트 보의 전단강도 예측(I)-전단강도 예측 모델제안 및 검증-", 콘크리트학회 논문집, 17권, 3호, 2005, pp. 343~351.
3. 심종성, 박철우, 문도영, 심제원, "FRP로 전단보강된 철근콘크리트 보의 전단강도 예측(II)-모델검증 및 변수연구-", 콘크리트학회 논문집, 17권, 3호, 2005, pp. 353~359.
4. Chen, J. F. and Teng, J. G., "Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 5, 2003, pp. 615~625.
5. Bousselham, A. and Chaallal, O., "Shear Strengthening Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 2, 2004, pp. 219~227.
6. Colotti, V. and Spadea, G., "Shear Strengthened with Bonded Steel or FRP Plates," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 4, 2001, pp. 367~373.
7. Diagona, C., Li, A., Gedalia, B., and Delmas, Y., "Shear Strengthening Effectiveness with CFF Strips," *Engineering*

- Structures*, Vol. 25, 2003, pp. 507~516.
8. Colotti, V. and Spadea, G., "Shear Strength of RC Beams Strengthened with Bonded Steel or FRP Plates," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 4, 2001, pp. 367~380.
 9. Whitehead, P. A. and Ibell, T. J., "Novel Shear Reinforcement for Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced and Prestressed Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 2, 2005, pp. 286~294.
 10. Zhang, Z. and Hsu, C. T. T., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer laminates," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 158~169.
 11. Zhang, Z., *Shear Strengthening Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates*, PhD Dissertation, Dept. of Civil and Env. Engineering, NJIT, Newark, N.J., 2003.
 12. Whitehead, P. A. and Ibell, T. J., "Rational Approach to Shear Design in Fiber Reinforced Polymer-Prestressed Concrete Structures," *Journal of Composite for Construction*, Vol. 9, No. 1, 2005, pp. 90~100.
 13. Zhang, Z. and Hsu, C. T. T., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates," *Journal of Composite for Construction*, Vol. 8, No. 5, 2004, pp. 403~414.

요 약 본 연구는 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단거동 특성 및 파괴형상을 구명함에 그 목적이 있다. 이를 위하여 탄소섬유판의 형상, 섬유판 부착 간격 및 전단보강 철근량 등의 변수를 포함하는 실험 연구가 수행되었다. 본 실험 결과 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단 강성은 보강되지 않은 보에 비해 현저하게 개선되며 최대 전단강도 증진율은 100% 이상인 것으로 나타났다. 또한 탄소섬유판은 전단균열의 발생 및 진전을 억제하며, 적은 량의 탄소섬유판으로 보강했을 경우에도 전단강도의 증진 효과는 매우 좋은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 탄소섬유판에 발생하는 변형률을 기본으로 하여 유효응력을 도출하였으며, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단강도를 계산하였다. 이는 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 탄소섬유판, 전단거동, 파괴형상, 응력-변형률 관계