



표면매입 및 외부부착 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단 거동에 관한 실험적연구

임동환^{1)*} · 권영순²⁾

¹⁾동서대학교 건축토목공학부 토목공학전공 ²⁾재신건설(주)

An Experimental Study on the Shear Behavior of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted and Externally Bonded CFRP Strips

Dong-Hwan Lim^{1)*} and Yeong-Soon Kwon²⁾

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

²⁾Jae Shin Construction, Ltd., Seoul 137-130, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to investigate the shear strengthening effectiveness of the beams strengthened with near surface mounted (NSM) and external bonded (EB) CFRP strips. A total of nine concrete beams were made and tested. From this study, it was found that the shear stiffness and strength of the beams strengthened with NSM and EB strips were significantly improved compared to the control beam. Failure of the beam strengthened with NSM and EB strips was initiated by shear cracks, propagated diagonally to the adjacent epoxy grooves without crossing the epoxy and finally sudden diagonal crack connecting the point of application of load and flexural crack was occurred. For the beam strengthened combined with NSM and EB CFRP strips, the tensile strains in the NSM CFRP strips were observed in the range of 0.35% to 0.45% and strains with EB strips were measured about 0.3%.

Keywords : shear, near surface mounted (NSM), external bonded (EB), CFRP

1. 서 론

탄소섬유판 (carbon fiber reinforced plastic (CFRP) strips) 을 철근콘크리트 구조물의 표면에 부착하는 보강방식은 그 시공성능 및 제반 역학적 성능이 우수하여 구조물 보강에 매우 효과적인 방법으로 인식되고 있으며, 콘크리트 구조물의 휨 및 전단 보강에 널리 사용되고 있다. 그러나 탄소섬유판으로 외부 부착 보강된 콘크리트 부재는 일반적으로 계면 부착 파괴로 인한 탄소섬유판의 탈락 및 콘크리트 피복 탈락 (concrete cover separation)으로 인한 파괴가 발생하며, 따라서 탄소섬유판과 콘크리트 부재와의 합성거동을 유도할 수 없다.

이러한 단점을 보완하고, 탄소섬유판의 효용을 극대화하기 위하여 탄소섬유판을 표면에 수직으로 매입하는 공법 (near surface mounted)이 소개되고 있다. 이 공법은 시공성이 우수하며, 탄소섬유판이 콘크리트 속에 매입되어 화재, 외부 및 기계적인 손상 등 외부환경에 민감하지 않은 등의 장점으로 인하여, 매우 좋은 콘크리트 구

조물 보강 방법으로 인식되고 있다.¹⁾ 최근 들어 탄소섬유판이 표면에 매입된 (near surface mounted) 철근콘크리트 부재에 대한 휨 거동 및 부착기구 등에 관한 다양한 실험 연구가 수행되고 있으며,¹⁻⁸⁾ 탄소섬유판 표면 매입으로 보강된 철근콘크리트 부재는 탄소 섬유판과 콘크리트 구조체의 합성 거동이 유도되어 휨 강성 등의 역학적 성능이 현저하게 개선되고, 매우 효율적인 보강방법으로 보고되고 있다.⁹⁻¹²⁾

그러나 탄소섬유판이 매입된 RC보의 전단거동에 관한 연구는 매우 제한적으로 수행되어 왔으며, 일부 연구자들에 의해 파괴거동 및 전단강성에 대한 연구가 수행되고 있다. 최근 들어 Barros & Dias¹³⁾는 NSM공법의 전단에 대한 효용성을 규명하기 위하여 NSM 보강보의 전단 거동 실험을 수행하였으며, Nanni¹⁴⁾ 등이 제시한 해석 모델을 수정하여 표면매입 보강보의 전단강도를 예측하였다. 또한 Rizzo & De Lorenzis¹⁵⁾는 NSM 보강보 전단실험을 통하여 NSM 섬유판 보강은 철근콘크리트 부재의 전단강성을 크게 향상시키며, NSM 섬유판 보강 RC보는 전단철근 외부에 측면피복이 분리되는 파괴양상을 나타내고 있다고 보고하고 있다. 이상을 종합할 때, 탄소섬유판으로 표면 매입된 철근콘크리트 부재의 전단거동에 관한 연구는 미미한 실정이며, 파괴거동 및 역학적 특성

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

Received January 28, 2009, Revised March 12, 2009

Accepted April 17, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

을 규명하기 위한 실험 및 해석 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 탄소섬유판 표면 매입 공법 및 외부 부착 공법의 장점을 활용하기 위하여, 탄소섬유판이 외부 부착, 표면 매입 그리고 외부부착 및 표면매입이 혼합된 보강 방식의 철근콘크리트 부재에 대한 전단 거동을 분석 하였으며, 전단 보강 효과를 규명하고자 하였다. 이를 위하여, 탄소섬유판 보강방식에 대한 구조 실험을 수행하였으며, 기존 해석 모델등과 비교 하였다.

2. NSM 및 EB 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단 실험

2.1 실험 부재

본 연구에서는 길이 3,000mm, 폭 200mm 및 높이 300mm의 직사각형 보 9개가 제작되어 실험이 수행되었다. 사용된 콘크리트는 28일 압축강도가 40 MPa이 발현될 수 있도록 배합설계 되었으며, 탄소섬유판의 전단보강 방식 즉 외부부착 (SCF series), 표면매입 (NSM series) 및 외부부착과 표면매입을 혼용한 보강 방식 (NER series) 등이 주된 실험변수로 채택되었다. 전단보강에 따른 전단강성 효과를 규명하기 위하여 본 연구에서는 탄소섬유판 전단보강 간격이 150mm인 외부부착, 표면매입, 혼용방식의 부재 (SCF-15-NO, NSM-15-NO, NER-15-NO)를 제작하였다. SCF-15-NO부재는 폭 50mm 탄소섬유판을 전단을 받는 콘크리트 표면에 150mm 간격으로 부착하였으며, NSM-15-NO 부재는 전단부에 홈을 절취하고, 탄소섬유판을 수직으로 25mm 깊이로 매입하였으며, NER-15-NO 부재에서는 25mm폭의 탄소섬유판을 콘크리트 표면에 부착하고, 또한 탄소섬유판을 25mm 깊이로 표면부에 매입하는 혼용방식의 전단보강을 수행되었다. 그리고, 탄소섬유판의 외부 부착 간격에 따른 전단효과를 규명하기 위하여, 섬유판 부착간격을 150, 125 및 250mm로 달리하여 보를 제작하여 (SCF series) 실험을 수행하였다. Table 1은 본 실험에서 채택한 실험 시편의 종류와 변수를 나타낸 것이다.

Table 1 Test specimens and test variables

Specimens	CFRP strip			Steel bars	
	Application type	Spacing (mm)	Width (mm)	Flexural	Stirrup
CONT	-	-	-	2D16	
SCF-12.5-NO	EB	125	50	2D16	
SCF-15-NO	EB	150	50	2D16	
SCF-25-NO	EB	250	50	2D16	
SCF-25-A	EB	250	50	2D16	D13@150
SCF-25-B	EB	250	50	2D16	D13@300
NSM-15-NO	NSM	150	25	2D16	
NER-15-NO	NSM+EB	150	25+25	2D16	
NER-25-B	NSM+EB	250	25+25	2D16	D13@300

본 실험에서 사용된 탄소섬유판은 유럽 등지에서 널리 사용되고 있는 두께 1.2mm 폭 50mm의 S사 탄소섬유판이며, Table 2는 탄소섬유판의 재료물성 및 인장강도를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 보의 전단 파괴를 유도하기 위하여, 인장철근비를 균형철근비 보다 크게 배근하였으며, 사용된 인장철근은 2D16(SD400)이다. 전단철근은 D13 철근을 150 및 300mm 간격으로 배근하여 전단철근 보강상태에 따른 탄소섬유판의 전단기여 정도를 파악하고자 하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험부재의 배근도를 나타낸 것이다.

2.2 보강 방법

본 실험에서는 탄소섬유판을 표면에 매입하기 위하여, 부재 측면부 콘크리트 피복 부위에 폭 6.5mm, 깊이 25mm의 홈 (groove)을 150mm 간격으로 절취하여, 에폭시레진을 충전하고, 탄소섬유판을 홈에 매입하였다. 에폭시레진은 스위스 S사 제품을 사용하였으며, 에폭시와 경화제를 2:1로 배합하여 사용하였다. 사용에폭시 레진의 압축강도는 71.7MPa, 인장강도 48MPa 그리고 탄성계수는 1,00MPa이다.

본 실험에서는 표면매입 탄소섬유판 뿐 아니라, 표면매입 (NSM) 및 외부부착 (EB) 탄소섬유판 (CFRP strip)의 상호 구속효과를 극대화하여 표면부착 탄소판 탈락 억제 및 하중 저항 효과를 유도하기 위하여, 에폭시로 접합된 T자 형태의 탄소섬유판이 제작되었으며, 위 섬유판을 매입 부착 하였다.

2.3 실험 방법

본 전단실험에서는 500kN 용량의 유압 액추에이터

Table 2 Characteristics of CFRP strips

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

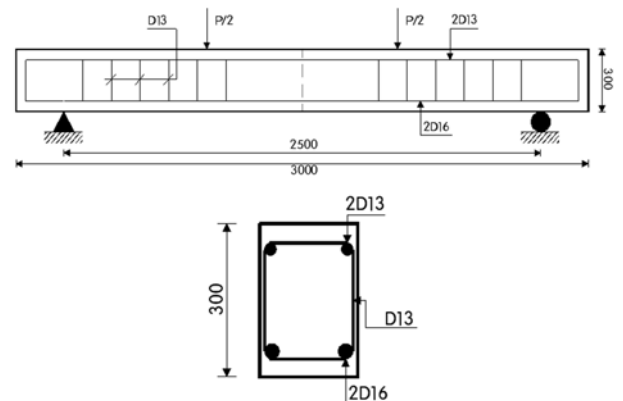


Fig. 1 Reinforcement details of test specimens

(hydraulic actuator)를 사용하여 4점 재하방식으로 하중을 단계적으로 재하하였다 (Fig. 2). 각 실험부재에는 변위계 (LVDT), 콘크리트 변형률게이지, 철근 변형률게이지, 탄소 섬유판 변형률게이지 및 다이얼게이지 부착하여 변형률 및 변위 등을 분석하였다. 위 측정값은 data acquisition software를 통해 처리 분석되었다. 특히 표면매입 (NSM) 및 외부부착 (EB) 섬유판의 변형률을 측정하기 위하여, 전단균열이 예상되는 지점에 변형률게이지를 부착하였으며, 설치된 탄소섬유판의 형상 및 부착 센서는 Fig. 3과 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 전단 거동

Fig. 4는 탄소섬유판 보강 방식 (외부부착, 표면매입 및 혼합방식)에 따른 보강된 철근콘크리트 보의 하중-처짐 특성을 나타낸 것이다. 탄소섬유판이 부착 및 매입 보강된 철근콘크리트 보의 보강되지 않은 콘크리트 부재에 비하여 더 높은 하중에 이르기 까지 선형구간이 확대 되며, 전단강성이 현저하게 향상되는 것으로 나타났다.

CONT-S 부재는 전단철근 및 탄소 섬유판이 전혀 보강되지 않은 부재로서, 위 부재는 하중이 증가 하면서

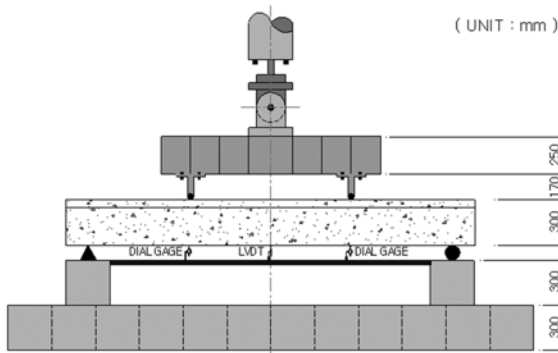


Fig. 2 Test setup

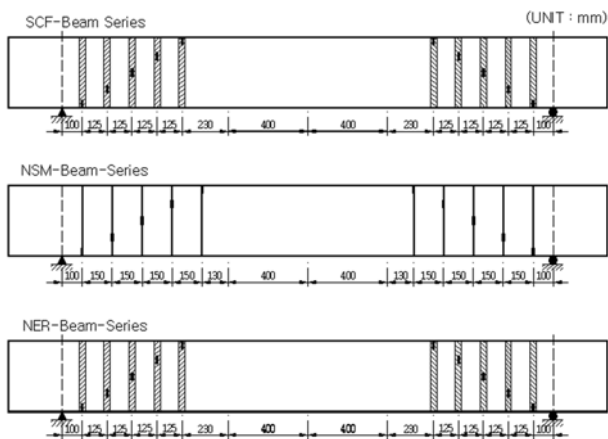


Fig. 3 Configuration of CFRP strips and sensors

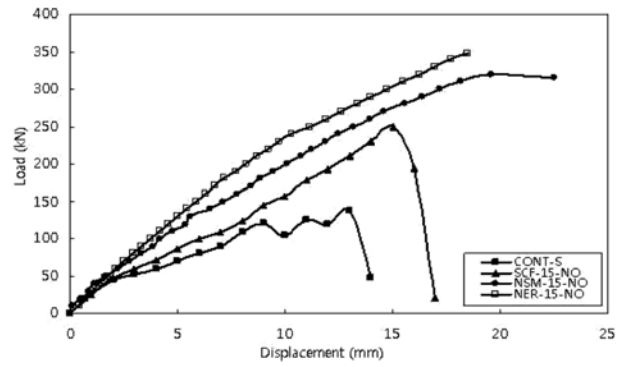


Fig. 4 Load-deflection curves of EB, NSM, and combined strips

선형적인 하중-처짐 특성을 보이다가 전단 균열이 일부 발생하면서 처짐이 급격히 증가 하며 취성적인 전단 파괴가 일어났다. 그러나 탄소섬유판으로 전단 보강된 철근콘크리트 부재는 매우 높은 수준에 이르기 까지 선형적인 힘과 처짐의 관계 특성이 유지되며, 탄소섬유판이 외부에 부착된 RC 부재는 극한상태에서 섬유판의 탈락과 동시에 취성적인 전단파괴가 발생하였다. 그러나 탄소섬유판이 매입 보강된 부재 (NSM-15-NO, NER-15-NO)는 탄소섬유판이 부착 탈락하는 것이 아니라 콘크리트 모체와의 합성거동으로 인하여, 극한 전단 내력을 크게 향상하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 전단철근이 배근되지 않은 탄소섬유판 외부 부착 철근콘크리트 부재 (SCF series)의 하중-처짐 관계 특성을 나타내는 그림으로서, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재는 전술한 한 바와 같이 극한 강성이 크게 증진되는 것으로 보여주고 있다. 그러나 탄소섬유판의 전단 보강 간격 및 보강 면적은 강도 증진 효과에 직접적으로 비례하지 않으며, 전단보강량을 증가시켜도 전단보강효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 위 섬유판 외부부착 콘크리트 부재는 극한상태에서 섬유판의 탈락과 동시에 급격한 전단파괴가 발생하였다.

Fig. 6은 전단철근이 배근된 보에 탄소섬유판으로 보강한 철근콘크리트 부재의 하중-처짐 관계 특성을 나타내는 것으로서, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부

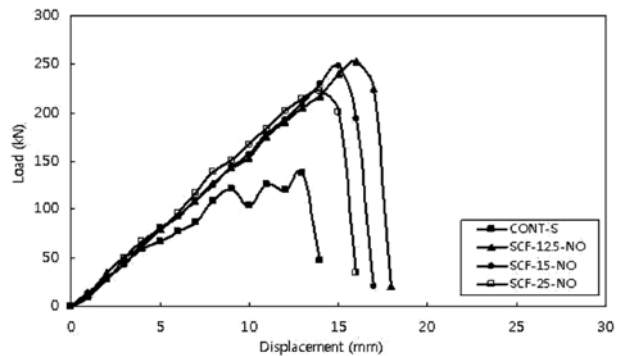


Fig. 5 Load-deflection curves of specimens strengthened with EBR strips

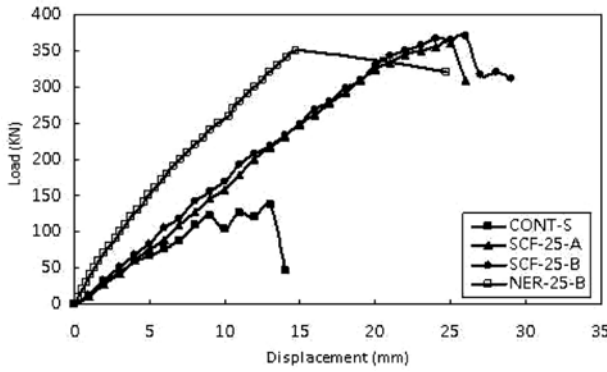


Fig. 6 Load-deflection curves of the strengthened of SCF series and NER-25-B

재는 극한 전단 강성이 크게 증진되는 것으로 보여주고 있으며, 약 160% 이상의 강도 증진 효과를 나타내고 있다. 특히 탄소섬유판 외부부착 및 표면매입이 혼합된 보강보 (NER-15-NO) 부재는 전단 초기강성 및 탄성 계수가 다른 보강보에 비하여 크게 향상되고 있으며, 그 극한 강성도 매우 크게 예견되고 있다. 그러나 본 실험체 (NER-15-B)의 극한 전단내력이 매우 우수하여, 본 시험기기의 용량을 초과하여 탄소섬유판이 외부에 부착되고 표면에 매입된 RC보 (NER-15-NO)의 보강 효과를 규명할 수 없었다.

Table 3은 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한 전단 강도를 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이, 탄소섬유판이 매입 보강된 철근콘크리트 보는 섬유판으로 보강되지 않은 보 및 외부부착보에 비하여 극한 강도가 크게 증진되고 있음을 알 수 있으며, 이는 표면 매입 탄소섬유판의 하중 저항 능력이 우수함을 입증하고 있다.

탄소섬유판 매입 보강보 (NSM-15-NO) 및 탄소섬유판 외부부착 및 표면매입이 혼합된 보강보 (NER-15-NO) 부재의 극한강도 증진율은 보강되지 않은 보에 비해 각각 133 및 153%로 나타났다.

Table 3 Summary of test results

Specimens	CFRP strip		Shear strength	Increase (%)
	Application type	Spacing (mm)	Ultimate (kN)	
CONT	-	-	137.35	-
SCF-12.5-NO	EB	125	253.21	84.3
SCF-15-NO	EB	150	248.51	80.9
SCF-25-NO	EB	250	223.62	62.8
SCF-25-A	EB	250	366.78	167.04
SCF-25-B	EB	250	362.73	164.09
NSM-15-NO	NSM	150	320	132.98
NER-15-NO	NSM+EB	150	348	153.36
NER-25-B	NSM+EB	250	350	154.82

3.2 균열 및 파괴 양상

Fig. 7은 기준보 (control beam) 및 탄소섬유판이 외부 부착된 SCF Series 보의 파괴양상을 도시한 것이다. 탄소섬유판으로 보강되지 않은 기준보는 초기전단균열이 약 110 kN에서 나타나기 시작하여, 137 kN에 이르러 큰 폭의 사인장 균열의 발생과 함께 취성적으로 파괴되는 것으로 나타났다. 그리고 탄소섬유판으로 외부 부착된 철근콘크리트 보 (SCF series)는 탄소섬유판의 부착탈락으로 인한 취성파괴가 발생하였으며, 극한 전단 하중은 탄소섬유판의 부착면적에 따라 223 kN에서 253 kN의 범주로 나타났다. 콘크리트 표면에 부착된 탄소섬유판은 RC 부재의 추가적인 균열발생 및 균열진전을 억제하는 구속 효과가 뛰어나 기준보보다 현저하게 높은 전단강성을 나타내고 있다. 전단철근으로 보강된 탄소섬유판 부착 콘크리트 부재 (SCF-25-A, SCF-25-B)의 파괴는 전단 철근이 보강되지 않은 부재와 비슷한 파괴형상을 나타내고 있으나, 본 실험에서는 최종파괴양상을 관측할 수 없었다. 이는 본 실험부재의 단면이 다소 적고 전단보강이 과다하여 전단파괴가 아닌 하중 재하점 하단의 콘크리트 지압파괴가 유도 되었기 때문이다.

Fig. 8은 탄소섬유판이 150 mm 간격으로 매입 보강된 철근콘크리트 부재 (NSM-15-NO)의 파괴양상을 도시한 것이다. 위 부재의 초기 전단 균열은 기준보와 비슷한 하중 수준인 110 kN에서 발생하였으며, 하중 증가에 따라 표면 매입된 탄소섬유판 사이 구간에서 미세 전단균열이 다량 발생하였다. 위 균열은 초기 휨 균열과 같이 부재하단부에서 발생하여 인접하고 있는 탄소섬유판 인근까지 진전되고 있으나, 매입 탄소섬유판을 관통하지 못하고 있다. 이는 매입된 탄소섬유판이 전단균열 진전을 억제하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

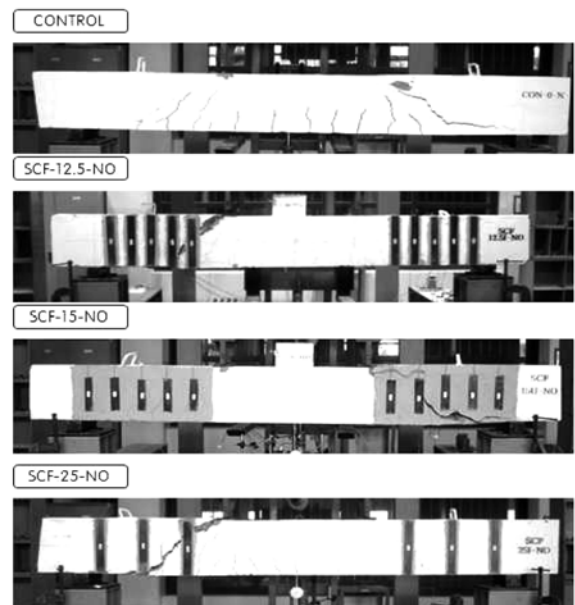


Fig. 7 Crack patterns of SCF beam series

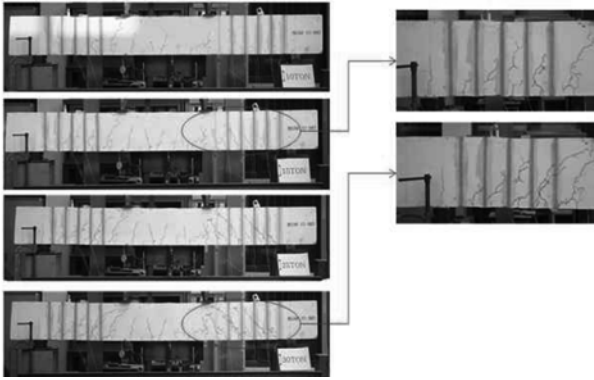


Fig. 8 Crack patterns beam NSM-15-NO

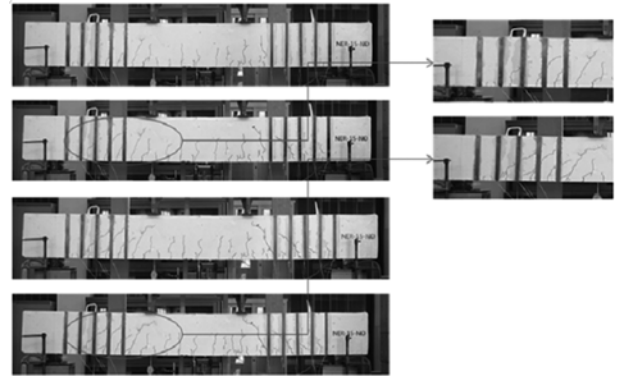


Fig. 10 Crack patterns of beam NER-15-NO

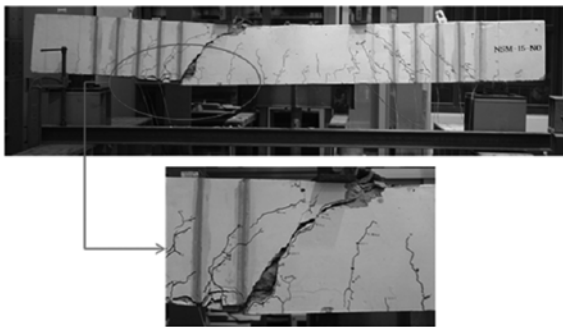


Fig. 9 Failure mode of the beam NSM-15-NO

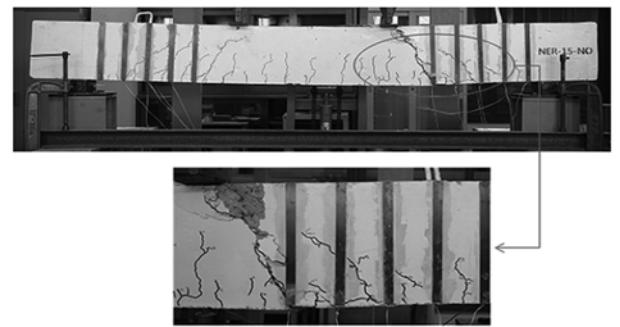


Fig. 11 Failure mode of the beam NER-15-NO

Fig. 9는 위 부재 (NSM-15-NO)의 파괴형상을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 하중이 계속 증가하여 파괴시점에 도달함에 따라, 하중 재하점과 가장 인접한 매입 탄소섬유판 하단 모서리에서 발생한 균열은 하중 재하점 방향으로 급격하게 진행되었으며, 그 결과 하중 재하점과 휨 균열을 연결하는 경사압축파괴 (diagonal compression failure)가 발생되었다. 이러한 사실은 매입 섬유판의 전단보강 효과가 매우 우수하여 보가 전단으로 파괴되지 않고 섬유판이 매입 보강되지 않은 휨 구역에서 압축파괴가 발생하고 있음을 설명하고 있다. 또한 파괴 시 탄소섬유판의 부착탈락은 발생되지 않았고, 매입 탄소섬유판과 콘크리트와의 부착상태는 매우 양호한 것으로 관찰되었다. 이는 탄소섬유판을 매입하는 공법이 전단보강에 매우 효과적임을 시사하고 있다.

Fig. 10은 탄소섬유판을 부착하고 동시에 매입한 부재 (NER-15-NO)의 균열 양상을 도시한 것이며, Fig. 11은 위 부재의 파괴양상을 나타낸 것이다. 위 부재의 균열양상 역시 매입 탄소섬유판 보강 부재(NSM-15-NO)와 비슷한 양상을 보이고 있으며, 파괴양상 역시 NSM-15-NO 보와 같이 휨 구간의 압축파괴가 발생되고 있음을 알 수 있다. 그러나 위 보의 전단강도 및 전단강성은 매입 섬유판 부재(NSM-15-NO)에 비해 크게 나타났으며, 따라서 섬유판 부착 및 매입을 혼용하는 전단보강 방식은 균열을 제어하고 기존부재의 전단강성을 향상시키기 위한 효율적인 방식으로 판단된다.

3.3 탄소섬유판 변형률

Fig. 12는 전단철근이 배근되지 않은 부재들의 부착 탄소섬유판 및 매입 탄소섬유판의 변형률을 도시한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이, 거의 모든 부재의 초기전단 균열은 150 kN의 하중수준에서 발생하고 있으며, 이는 탄소섬유판의 보강형식 및 보강면적과 크게 관계없는 것으로 나타났다.

그러나 초기균열이 발생한 이후 하중이 증가함에 따라, 탄소섬유판의 변형률은 급격하게 증가하며, 상당량의 전단하중을 탄소섬유판이 지지하고 있다. 극한상태에서의 외부부착 탄소섬유판 변형률 (SCF beam series)은 탄소섬유판 보강량에 관계없이 약 $700 \mu\epsilon$ 에서 $1,200 \mu\epsilon$ 범주

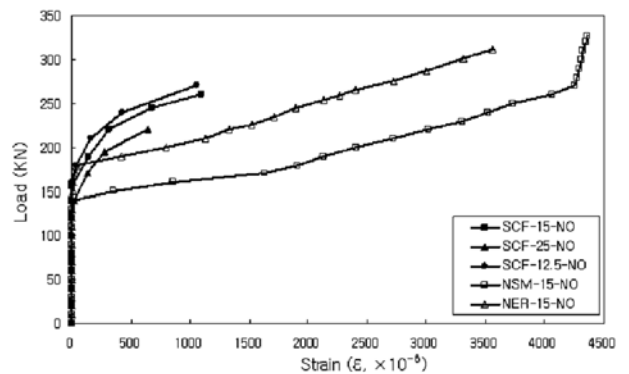


Fig. 12 Load-strain curves of EB and NSM CFRP strips for *-NO beam series

로 평균 1,000 $\mu\epsilon$ 수준으로 나타났다. 이것은 탄소섬유판의 극한 변형률과 비교하여 매우 낮은 수준으로 외부부착 방식은 전단강성을 크게 개선하지 못함을 나타내고 있다. 그러나 매입 탄소섬유판 보강부재 (NSM-15-NO) 및 탄소섬유판 부착 및 매입을 혼용한 부재 (NER-15-NO)에서는 매입 탄소섬유판의 변형률이 각각 4,500 $\mu\epsilon$ 및 3,500 $\mu\epsilon$ 으로 나타나고 있다. 또한 전단철근이 배근된 부재(NER-25-B)에서는 외부 부착 탄소섬유판의 변형률이 약 3000으로 나타났다 (Fig. 13). 이러한 사실은 매입 탄소섬유판 전단하중 지지능력이 매우 탁월하여, 매입 및 부착을 혼용해서 섬유판을 보강할 시, 균열 억제 능력이 크게 향상되고 있음을 나타내고 있다.

3.4 실험 결과와 해석 모델의 비교

본 연구에서는 탄소섬유판이 외부에 부착된 철근콘크리트 부재(SCF beam series)의 실험 결과를 ACI 및 fib에 의해 제안된 해석모델과^{16,17)}비교 검토하였다. 그러나 탄소섬유판이 매입 보강(NSM)된 철근콘크리트 보에 대한 해석 모델은 아직 제시되지 않고 있기 때문에, 본 연구에서는 Nanni 등에¹⁴⁾의해 제안된 해석모델을 본 실험 결과 및 타 연구자의¹³⁾ 실험 결과와 비교함으로써 위 해석모델식의 적용성을 검토하였다.

3.4.1 외부 부착 탄소섬유판 보강보에 대한 ACI 규정

ACI에서는 탄소섬유판으로 인한 전단 보강효과를 다음과 같이 규정하고 있다.¹⁶⁾

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} \quad (1)$$

여기서, s_f 는 섬유판의 간격이다.

또한 탄소섬유 보강면적 A_{fv} 는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (2)$$

여기서, n , t_f , w_f 는 섬유판의 도포개수, 섬유판의 두께 및

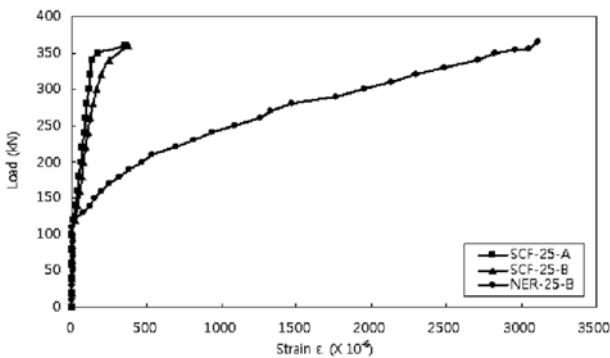


Fig. 13 Load-strain curves of EB CFRP strips for beams with stirrups

폭이다. 섬유판에 발생하는 유효응력 f_{fe} 는 섬유판의 탄성계수에 유효변형률을 곱한 값으로 결정되며, 유효변형률은 ϵ_{fe} 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{fe} = k_v \epsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (3)$$

여기서, k_v 는 콘크리트의 압축강도, 보강형태 및 섬유판의 강성에 관계되는 부착저감계수이다. 부착저감계수는 다음과 같이 표현된다.

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \epsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (4)$$

여기서,

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (5)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (7)$$

이다. 위 식에서 d_f 는 섬유판의 유효깊이이며, f'_c 는 콘크리트의 압축강도이다. 또한 각 식에서 표현된 길이와 하중의 단위는 mm 및 N을 사용하였다.

Table 4는 실험 결과 도출된 전단강도와 기존 해석모델식과 비교한 것으로서, 실험 결과 도출된 극한 전단강도는 ACI 해석 모델식으로부터 도출된 결과보다 다소 높게 나타나 안전측으로 평가 되었으며, 실험 결과와 ACI의 평균 전단강도비는 약 1.20으로 나타나 실험 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 본 실험 결과, 탄소섬유판이 부착된 부재에서의 극한 섬유판 변형률은 720 $\mu\epsilon$ ~1094 $\mu\epsilon$ 의 범주로 나타났다. 그러나 식 (3)에 근거하여 계산된 유효 변형률은 계산 결과 약 2,000 $\mu\epsilon$ 으로 나타났으며, 따라서 탄소섬유판이 부착된 콘크리트 부재의 경우 섬유판 유효 변형률은 ACI 계산 결과 보다 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

3.4.2 외부 부착 탄소섬유판 보강보에 대한 fib 규정

fib에서는 탄소섬유판으로 인한 전단 보강효과를 다음과 같이 규정하고 있다.

$$v_{fd} = 0.9 \epsilon_{fe} E_f \rho_f b_w d \quad (8)$$

여기서, b_w , d 는 보의 폭 및 압축연단에서 인장철근도심까지의 거리이며, ρ_f 는 섬유판 전단보강 비로서 다음과 같다.

$$\rho_f = \frac{A_{fv}}{b_w s_f} \quad (9)$$

Table 4 Comparisons of test results with analytical formulae

Specimen	V_{exp} (kN)	V_f^{exp} (kN)	Calculated shear strength (kN)				Shear strength ratio (%)			
			By ACI	By fib	By Nanni	V_f^{ana}	$\frac{V_{exp}}{V_{AC}}$	$\frac{V_{exp}}{V_{fib}}$	$\frac{V_{exp}}{V_{sc}}$	$\frac{V_f^{exp}}{V_f^{sc}}$
SCF-12.5-NO	126.6		115.9	105.9			1.09	1.2		
SCF-15-NO	124.2		105.8	101.8			1.17	1.22		
SCF-25-NO	111.8		85.7	92.6			1.31	1.21		
SCF-25-A	183.4		173.8	180.8			1.05	1.01		
SCF-25-B	181.4		129.8	136.7			1.4	1.33		
NSM-15-NO	160				129.8				1.23	
NER-15-NO	174				180.3				0.97	
NER-25-B	175				160.1				1.09	
A10_VL		29.1				19.8				1.4
A10_IL		28.8				19.8				1.44
A12_VL		59.3				39.6				1.50
A12_IL		72.9				55.4				1.32
B10_IL		23.2				17.3				1.3
B12_VL		31.8				19.9				1.61
B12_IL		36.4				35.6				1.02
Average							1.20	1.19	1.10	1.37

* V_f^{exp} : experimental contribution of CFRP strips by Sena-Cruz & Barros

V_f^{ana} : analytical contribution of CFRP strips by Sena-Cruz & Barros

또한 섬유판 유효변형률 ϵ_{fe} 는 다음으로부터 얻어진다.

$$\epsilon_{fe} = \min \left[0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}; 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3} \epsilon_{fu} \right] \quad (10)$$

여기서, f_{cm} 은 콘크리트 실린더 평균압축강도이며, ϵ_{fu} 는 섬유판 극한 인장변형률이다.

Table 4는 실험 결과 도출된 전단강도와 fib 해석모델식과 비교한 것으로서, 실험 결과 도출된 극한 전단강도는 fib 해석 모델식으로 부터 도출된 결과보다 다소 높게 나타나 안전측으로 평가되었으며, 실험 결과와 fib의 평균 전단강도비는 약 1.194로 나타나 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.4.3 표면매입(NSM) 탄소섬유판 보강보에 대한 Nanni 해석식 Nanni¹⁴⁾ 등은 탄소섬유판이 표면매입된 철근콘크리트 부재의 매입 탄소섬유판 전단기여도를 다음과 같이 표현하고 있다.

$$v_f = 4(a_f + b_f) \tau_b \cdot L_{to\min} \quad (11)$$

여기서, a_f 및 b_f 는 섬유판의 단면의 길이이며, τ_b 는 섬유판의 평균 부착응력을 나타내고, $L_{to\min}$ 은 다음과 같다.

$$L_{to\min} = \sum_i L_i \quad (12)$$

여기서, L_i 는 45도 전단균열에 의해 차단되는 단일 NSM 섬유판의 길이를 나타내며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_i = \begin{cases} \min \left(\frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max} \right) & i = 1 \dots \frac{N}{2} \\ \min \left(l_{\neq t} - \frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max} \right) & i = \frac{N}{2} + 1 \dots N \end{cases} \quad (13)$$

또한 l_{max} 은 힘의 평형관계로부터 다음과 같이 표현된다.

$$l_{max} = \frac{\epsilon_{fe} \cdot a_f \cdot b_f \cdot E_f}{2 \cdot a_f + b_f \cdot \tau_b} \quad (14)$$

Nanni등은¹⁴⁾ 탄소섬유 사각봉이 표면매입 보강된 콘크리트 부착실험을 통하여, 유효변형률 ϵ_{fe} 및 평균 부착응력 τ_b 를 4% 및 6.9 MPa로 제안하고 있다. 그러나 이렇게 제안된 유효변형률 및 평균부착응력은 표면매입 탄소섬유판에 직접 적용될 수가 없으며, Sena-Cruz & Barros¹⁸⁾는 표면매입 탄소섬유판 부착실험을 통하여 유효변형률 ϵ_{fe} 및 평균 부착응력 τ_b 를 각각 5.9% 및 16.1 MPa로 제안하고 있다. 본 연구에서는 Sena-Cruz & Barros에¹⁸⁾ 의해 수정된 Nanni 해석모델식을 실험 결과와 비교 검토 하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 수정된 Nanni 해석 모델식 으로부터 도출된 전단강도는 실험 결과와 일치하고 있으며, 실험 및 해석 모델식으로부터 도출된

전단강도비는 1.10으로 나타났다. 또한 Barros & Dias¹³⁾에 의해 수행된 실험 결과와도 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유판 표면 매입 (NSM) 공법 및 외부 부착 (EBR)공법의 장점을 활용하기 위하여, 탄소섬유판이 외부 부착, 표면 매입 그리고 외부부착 및 표면 매입이 혼합된 보강 방식의 철근콘크리트 부재의 전단 거동 및 전단 보강 효과를 규명하고자 하였다. 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 표면매입 탄소섬유판 및 외부부착과 표면매입으로 혼용된 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단 강성 및 극한 전단강도는 섬유판으로 보강되지 않은 보에 비하여 크게 증진되는 것으로 나타났다. 그 최대 증가율은 보강되지 않은 부재의 경우보다 약 153%로 나타났다.
- 2) 표면매입 탄소섬유판 및 외부부착과 표면매입으로 혼용된 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴는 전단균열로 시작되었으며, 하중이 증가함에 따라 하중 재하점과 가장 인접한 매입 탄소섬유판 하단 모서리에서 발생한 균열은 하중 재하점 방향으로 급격하게 진행되었고, 경사압축파괴 (diagonal compression failure)가 발생되었다. 이러한 사실은 매입 섬유판의 전단보강 효과가 매우 우수하여 보가 전단으로 파괴되지 않고 섬유판이 매입 보강되지 않은 휨 구역에서 압축파괴가 발생하고 있음을 설명하고 있다.
- 3) 외부부착 탄소섬유판 변형률 (SCF beam series)은 탄소섬유판 보강량에 관계없이 약 700 μ 에서 1,200 μ 범주로 평균 1,000 μ 수준으로 나타났다. 그러나 매입 탄소섬유판 보강부재 (NSM-15-NO) 및 탄소섬유판 부착 및 매입을 혼용한 부재 (NER-15-NO)에서는 매입 탄소섬유판의 변형률이 각각 0.45% 및 0.35%로 나타났으며, 외부 부착 탄소섬유판의 변형률이 약 0.3%로 나타났다. 이러한 사실은 매입 탄소섬유판 전단하중 지지능력이 매우 탁월하여, 매입 및 부착을 혼용해서 섬유판을 보강할 시, 전단하중을 각 섬유판이 적절하게 분배하여 지지하고 있음을 나타내고 있다.

참고문헌

1. De Lorenzis, L. and Teng, J. G., "Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures," ELSEVIER, *Composite Part B*, Vol. 38, 2007, pp. 119~143.
2. Novidis, D., Pantazopoulou, S. J., and Tentoluris, E., "Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement," ELSEVIER, *Construction Building Materials*, Vol. 27, 2007, pp. 1760~1770.
3. Oehlers, D. J., Rashid, R., and Seracino, R., "IC Debonding Resistance of Group of FRP NSM Strips in Reinforced Concrete Beams," ELSEVIER, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, pp. 1574~1582.
4. Oehlers, D. J., Liu, I., and Seracino, R., "A Generic Design Approach for EB and NSM Longitudinally Plated RC Beams," ELSEVIER, *Construction and Building Materials*, Vol. 27, 2007, pp. 697~708.
5. Liu, I., Oehlers, D. J., and Seracino, R., "Test on the Ductility of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with FRP and Steel Near Surface Mounted Plates," ASCE, *Composite Construction Journal*, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 106~114.
6. Mohamed Ali, M. S., Oehlers, D. J., Giffith, M. C., and Seracino, R., "Interfacial Stress Transfer of Near Surface Mounted FRP-to-Concrete Joints," ELSEVIER, *Engineering Structure*, In Press.
7. Raizal Saifulnaz, M. R., Oehlers, D. J., and Seracino, R., "IC Debonding of FRP NSM and EB Retrofitted Concrete: Plate and Cover Interactions Tests," ASCE, *Composite*, In Press.
8. Seracino, R., Raizal Saifulnaz, M. R., and Oehlers, D. J., "Generic Intermediate Crack Debonding Resistance of EB and NSM Plate-to-Concrete Joints," ASCE, *Composite Construction Journal*, Vol. 11, No. 1, 2007, pp. 62~70.
9. 임동환, 남민희, "탄소섬유판 (CFRP strip)으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단거동," 콘크리트학회 논문집, 20권, 3호, 2008, pp. 299~305.
10. 임동환, "표면매입 및 외부부착 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨 거동에 관한 실험연구," 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, pp. 601~610.
11. 정우태, 박종섭, 박영환, 강재윤, "표면매립보강재를 이용한 철근콘크리트보의 휨보강에 대한 연구," 대한토목학회논문집, 27권, 1A호, 2007, pp. 27~33.
12. 정우태, 박종섭, 박영환, "탄소섬유보강재료 표면매립 보강된 철근콘크리트보의 파괴모드 예측," 대한토목학회논문집, 28권, 3A호, 2008, pp. 349~356.
13. Barros, J. A. O. and Dias, S. J. E., "Surface Mounted CFRP Laminates for Shear Strengthening of Concrete Beams," ELSEVIER, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, 2006, pp. 276~292.
14. Nanni, A., Di Ludovico, M., and Parretti, R., "Shear Strengthening of PC Bridge with NSM CFRP Rectangular Bars," *Adv Struct Engr.*, Vol. 7, No. 4, 2004, pp. 97~109.
15. Rizzo, A. and De Lorenzis, L., "Behavior and Capacity of RC Beams Strengthened in Shear with NSM FRP Reinforcement," ELSEVIER, *Construction and Building Materials*, In Press.
16. ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute, 2005.
17. Fib-Bulletin 14, "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures," *Technical Report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures*, Fédération Internationale du Béton-FIB, July, 2001.
18. Sena-Cruz, J. M. and Barros, J. A. O., "Modeling of Bond between Near-Surface Mounted CFRP Laminate Strips and Concrete," *Comput Sturct J*, Vol. 82, No. 17, 2004, pp. 1513~1521.

요약 본 연구에서는 탄소섬유판이 외부 부착, 표면 매입 그리고 외부부착 및 표면매입이 혼합된 보강 방식의 철근콘크리트 부재의 전단 거동 및 전단 보강 효과를 구명하고자 하였다. 본 연구 결과, 표면매입 탄소섬유판 및 외부부착과 표면매입으로 혼용된 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단 강성 및 극한 전단강도는 섬유판으로 보강되지 않은 보에 비하여 크게 증진되는 것으로 나타났다. 표면매입 탄소섬유판 및 외부부착과 표면매입으로 혼용된 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴는 전단균열로 시작되었으며, 하중이 증가함에 따라 하중 재하점과 가장 인접한 매입 탄소섬유판 하단 모서리에서 발생한 휨 균열은 하중재하점 방향으로 급격하게 진행되었고, 하중 재하점과 휨 균열을 연결하는 압축파괴가 발생되었다. 이러한 사실은 매입 섬유판의 전단보강 효과가 매우 우수하여 보가 전단으로 파괴되지 않고 섬유판이 매입 보강되지 않은 휨 구역에서 압축파괴가 발생하고 있음을 설명하고 있다. 매입 탄소섬유판 보강부재 및 탄소섬유판 부착 및 매입을 혼용한 부재에서는 매입 탄소섬유판의 변형률이 각각 0.45% 및 0.35%로 나타났으며, 외부 부착 탄소섬유판의 변형률이 약 0.3%로 나타났다.

핵심용어 : 전단, 표면매입 (NSM), 외부부착 (EB), CFRP