탄소 섬유시트로 보강된 실제크기 철근 콘크리트 보의 휨 거동에 대한 실험적 연구

An experimental study for bending behavior of real size RC beams strengthened with carbon fiber sheets

김성도† 성진욱*

Kim, Seong-Do Seong, Jin-Wook

ABSTRACT

This study is investigate the bending behavior of real size RC beams strengthened with carbon fiber sheets. For experimental study, 1 control beam and 8 strengthened beams of real size(4 NU-beams and 4 U-beams) are tested and compared. NU-beam has not a U-shaped band and U-beam has a U-shaped band. The variables of experiment are composed of the number of carbon fiber sheets, the existence of U-shaped band, and four point loading, etc.

The experimental results showed that the strengthening system with U-shaped band controls the premature debonding and provides a more ductile failure mode than the strengthening system without U-shaped band. It can be found from the load-deflection curves that as the number of fiber sheets is increased, the maximum strength and the flexural rigidity is increased. For the strengthening method with carbon fiber sheets of the real size RC beams, it is required the finding a solution to the bonding problem.

1. 서 론

다양한 환경적인 요인에 의해 열화가 진행된 철근 콘크리트 구조물은 사회적 요구에 따라 내하력 증진이 요구되며 이에 따라 탄소 혹은 유리 섬유시트에 의한 보강기법이 널리 적용되고 있다.1~3

철근콘크리트 보의 휨 보강이 요구될 경우 인장측에 섬유시트를 부착하여 필요한 내력을 확보하게 되며, 이때 섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 보(이하 "섬유시트 보강보")의 휨성능은 섬유시트 종류 및 섬유시트 양, 섬유시트의 정착장치, 섬유시트와 콘크리트 모체의 부착성능 등 보강시스템에 따라 다르게 산정된다.4~6

본 연구는 탄소섬유시트로 보강된 실제크기의 철근 콘크리트 보의 휨거동을 실험적으로 살펴보았다. 섬유시트를 보강하지 않은 하나의 기준보와 8개의 섬유시트 보강보를 제작하였으며, 섬유시트양의 변화에 대한 이론식의 타당성 검증을 위하여 2겹, 4겹, 6겹, 8겹의 보강겹수를 선택하였다. 8개의 보강보중 4개는 정착효과를 얻기 위해 단부에 U-밴드를 부착하였으며, 탄소섬유시트 보강매수, U-밴드의 유무, 4점 하중 등의 실험변수에 따른 하중-처짐 선도, 파괴형태 등을 규명하고자 보에 대한 휨 실험을 수행하였다.

2. 섬유시트 보강보

섬유시트 보강보를 구성하는 재료들의 물성치는 다음 표 1과 같다.

† 책임저자 : 철도학회정회원, 경성대학교 건설 · 환경공학부, 교수
E-mail : sdkim@ks.ac.kr
TEL : (051)620-4754 FAX : (051)621-0729
* 철도학회정회원, 경성대학교 토목공학과 석사과정

표 1. 구성재료의 물성치

구성재료	물 성 치	
콘크리트	압축강도 (f_{ck} , Mpa)	30
	인장강도 (f_r , Mpa)	34.64
	탄성계수 (E_c , Mpa)	2.64 ×104
철 근	항복강도 (f_y , Mpa)	400
	탄성계수 (E_s , Mpa)	2.0×105
	항복변형률 (ϵ_y)	0.002
탄소섬유시트	인장강도 (f_{fu} , Mpa)	3525
	탄성계수 (E_f , Mpa)	2.35×105
	설계두께 (t_f , mm)	0.111
	파단변형률 (ϵ_{fu})	0.015

철근콘크리트 보는 400mm×600mm의 단면크기와 6,000mm 길이로 총 9개가 제작되었다. 인장 철근으로 3-D25를 사용하였으며, 압축 측에 2-D16 철근을 사용하여 스터럽의 설치를 용이하게 하였다. 철근콘크리트 보의 전단파괴를 방지하기 위하여 D16 스터럽을 150mm 간격으로 보의 전 구간에 배근하였다. (그림 1)

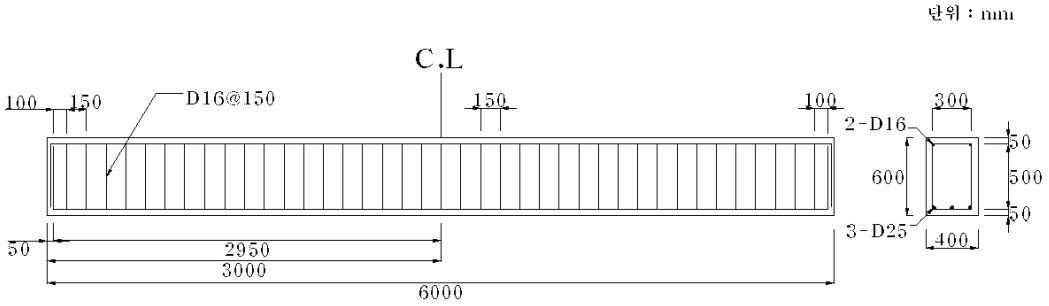


그림 1. 시험체 단면 및 철근 배근도

보강재 양에 대한 보강보의 휨 성능을 고찰하기 위하여 보강겹수를 달리하여 8개의 철근콘크리트 보 하부에 탄소섬유시트(폭 150mm, 길이 5600mm)를 부착하였으며, 이중 섬유시트와 콘크리트 모체의 부착거동을 향상시키고 섬유시트 정착 유무에 대한 보강보의 휨 성능을 고찰하기 위해 휨 보강용 섬유시트와 동일한 겹수를 적용한 U밴드(폭 500mm)를 4개의 보 양단부에 적용하였다.

9개의 실험보는 섬유시트를 보강하지 않은 1개의 철근콘크리트 보(이하 '기준보'라 칭함), 보 하부에만 탄소섬유시트를 보강한 4개의 보강보(이하 'NU 보강보'라 칭함), 보 하부에 탄소섬유시트를 보강하고 양단부에 U 밴드를 적용한 4개의 보강보(이하 'U 보강보'라 칭함)로 구성된다. 실제크기 보강보의 단면 및 섬유시트 보강상태는 그림 2와 같다. 기준보를 포함한 9개의 실제크기 보강보들의 시험체 명을 표 2에 나타내었다.

표 2. 실제크기의 탄소섬유시트 보강보

시험체 종류	시험체 명	탄소섬유 시트 겹수
보강하지 않은 기준 보	CON	-
보 하부에만 탄소섬유시트를 보강한 보 (NU 보강보)	C-2-NU	2매
	C-4-NU	4매
	C-6-NU	6매
	C-8-NU	8매
보 하부에 탄소섬유시트를 보강하고 단부에 U 밴드를 적용한 보 (U 보강보)	C-2-U	2매
	C-4-U	4매
	C-6-U	6매
	C-8-U	8매

단순지지 경계조건을 만족하도록 실험보의 양쪽 단부에서 각각 225 mm 떨어진 곳에 강제 롤러를 설치하였고, 실험보의 순지간이 5,550mm가 되도록 하였다. 500kN 용량의 엑츄에이터를 사용하였으며, 시험체의 중앙에서 좌우 600mm씩 떨어진 곳에 하중을 가하는 4점가력시험을 실시하였다(그림 2).

하중은 변위 제어방식으로 2.0 mm/min.의 속도로 가해졌으며, 하중을 보의 단면 폭에 균등하게 분포시키기 위하여 강제 가력 장치와 콘크리트면 사이에 고무판을 삽입하였다. 작용하중은 엑츄에이터에 부착된 하중계에 의해 측정되었으며, 작용하중에 대한 실험보의 처짐은 보의 중앙 하부에 설치된 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하였다.

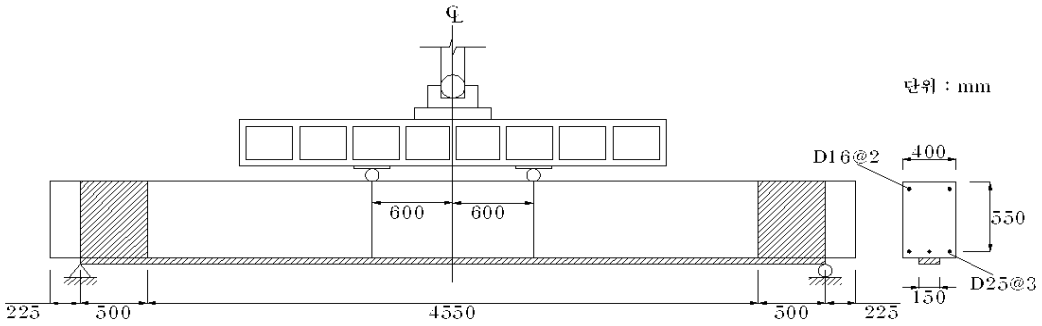
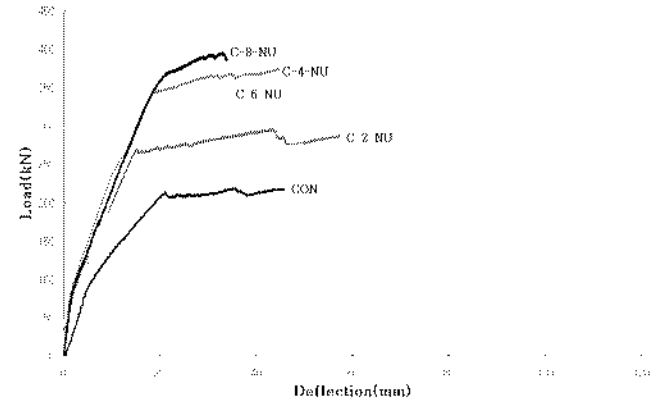


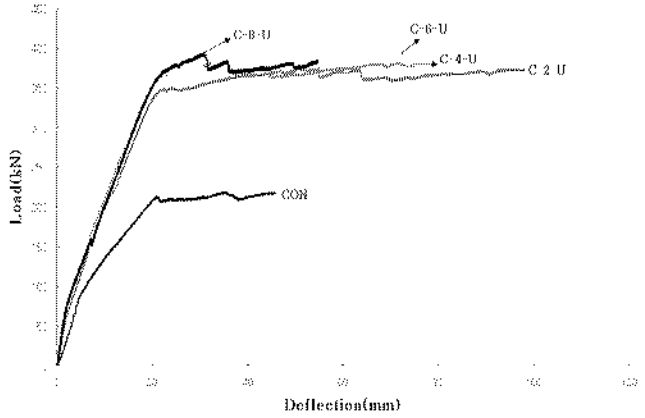
그림 2. 실제크기 보강보의 섬유시트 보강상태 및 가력상황

3. 실험결과 및 고찰

기준보와 섬유시트로 보강된 실제크기 보의 실험에서 측정된 하중-처짐 선도를 섬유시트 겹수에 따라, 그리고 U 밴드의 유무에 따라 그림 3에 나타내었다.



(a) NU 보강보



(b) U 보강보

그림 3. 탄소섬유시트 겹수 및 U 밴드 유무에 따른 실제크기 보강보의 하중-처짐 곡선

실제크기 보강보의 하중-처짐 관계는 균열이전구간, 항복이전구간, 항복이후구간의 3구간으로 구분할 수 있다. 이는 Elmihilmy and Tedesco7가 언급한 이상화된 세 구간을 근사적으로 잘 나타내고 있으나, 항복이전구간에서의 기울기는 보강 양에 따라 크게 차이가 나지 않았다.

실제크기 보강보 실험에서 측정된 균열하중, 항복하중, 최대하중, 그리고 각 구간의 하중-처짐 선도의 기울기인 휨 강성을 표 3에 나타내었다.

표 3 실제크기 보강보 실험에서 측정된 하중, 처짐, 휨 강성 및 연성지수

보 종류	균열이전구간			항복이전구간			항복이후구간		
	균열하중 (Pcr,kN)	처짐 (㎜)	휨강성 (kN/㎜)	항복하중 (Pcr,kN)	처짐 (㎜)	휨강성 (kN/㎜)	최대하중 (Pcr,kN)	처짐 (㎜)	휨강성 (kN/㎜)
CON	90.6	5.2	17.4	213.4	21.1	7.7	219.1	35.2	0.4
C-2-NU	71.5	1.55	46.1	267.6	15.11	14.5	296.5	43.33	1.0
C-4-NU	84.3	1.56	54.0	325.1	16.89	15.7	374.7	44.67	1.8
C-6-NU	68.6	1.53	44.8	320.7	16.46	16.9	353.6	33.78	1.9
C-8-NU	84.7	1.56	54.3	362.6	20.74	14.5	395.7	33.07	2.7
C-2-U	70.5	2.54	27.8	347.9	22.25	14.1	376.0	54.79	0.9
C-4-U	77.4	1.93	40.1	332.5	18.28	15.6	382.7	32.17	3.6
C-6-U	74.7	1.96	38.1	363.0	22.07	14.3	389.7	50.38	0.9
C-8-U	72.7	1.97	36.9	368.0	22.09	14.7	394.0	30.64	3.0

실제크기 보강보는 균열하중이 기준보보다 낮게 측정되었으나, 하중에 대응하는 처짐이 작아서 휨강성이 크게 나타났다. 이것은 실제크기 보강보의 보강효과가 균열이전 구간에서부터 크게 나타남을 보여주

고 있다. 즉, 보강효과로 인해 휨강성은 크게 증가하였으나, NU보강보는 상대적으로 취성적인 거동을 보인다고 판단된다.

표 3의 하중과 처짐 분포에 의하면 섬유시트 겹수의 증가에 따라 최대하중이 증가하는 기존의 모형 보강보 실험결과와 동일한 경향을 보여주고 있으나, U 보강보가 NU 보강보에 비해 최대하중이나 휨강성이 뚜렷하게 증가하는 경향은 나타나지 않음을 알 수 있으며, 강도나 강성의 관점에서는 U 밴드의 효과가 그렇게 크게 나타나지 않았다. 다만, 그림 3에서 최대 하중이후의 거동을 살펴보면 NU 보강보의 경우 실험체는 최대하중이후 급속한 파단이 진행되었으며, U 보강보의 경우 실험체는 U 밴드의 보강재 정착효과로 인하여 모두 최대하중 이후에도 변위가 꾸준히 증가하는 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

항복하중은 보강보의 항복점 도달 하중이며, 인장 철근의 응력이 항복하중에 도달하였을 때의 하중과 일치한다. 항복이전구간의 항복하중은 탄소섬유시트 양에 비례하여 증가하는 것으로 측정되었으나, 항복하중과 휨 강성에 대한 U 밴드의 효과는 나타나지 않았음을 알 수 있다.

본 연구에서는 하중-처짐 곡선에서 하중의 최대값을 처음 나타낸 곳을 최대하중으로 간주하였다. U 보강보의 경우 하중의 최대값을 나타낸 이후 U 밴드의 영향으로 인해 바로 파단하지 않고 하중의 감소를 보인 후, 다시 하중이 상승하면서 지속적으로 변위가 증가하는 거동을 나타내 보였다. NU 보강보의 최대하중은 기준보 대비 최대 81%의 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, U 보강보의 최대하중은 기준보 대비 최대 80%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 탄소섬유시트의 보강효과는 항복이후 구간에서 가장 크게 나타남을 알 수 있는데, 이것은 강도는 높으나 상대적으로 단면이 적어 다른 재료의 항복이후에 가장 큰 효과를 발휘한다고 볼 수 있다.

NU 보강보와 U 보강보의 파괴형태는 다음과 같이 나타났다. 항복점 도달 이전에는 콘크리트 모체와 탄소섬유시트가 분리 현상이 발생되지 않아 콘크리트 모체와 탄소섬유시트는 완전 일체화된 거동을 하는 것으로 관측되었으며, 초기 균열의 발생 양상도 비슷했다. 하지만, 하중이 증가하여 보강보의 항복점을 지나게 되면 콘크리트 균열폭은 커지게 되고, 균열은 콘크리트 모체와 탄소섬유시트 사이의 접착력을 감소시키게 하며, 항복하중 시점에서는 NU 보강보에 비해 U 보강보에서 새로운 균열이 많이 발생하였고, 균열의 분포가 광범위하게 나타났다. NU 및 U 보강보 모두 재하점에서 가장 가까운 위치에 있는 균열에서 콘크리트 모체와 섬유시트 사이에 계면박리가 발생하여 섬유시트 단부방향으로 박리가 진행되었다.

항복이후 구간에서는 NU보강보는 최대하중 이후 섬유시트의 정착력 부족으로 인하여 시트가 탈락하면서 뚜렷한 균열진전이 없이 파괴되었으며(그림 4), U 보강보는 U 밴드의 도입으로 인한 정착력 증가로 하중은 증가하지 않았으나 변위는 꾸준히 증가하면서 재하점 직하 콘크리트의 파쇄가 발생하였다(그림 5).

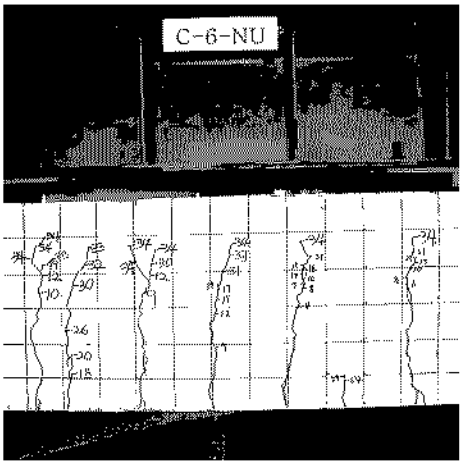


그림 4 NU 보강보의
균열 및 섬유시트 탈락

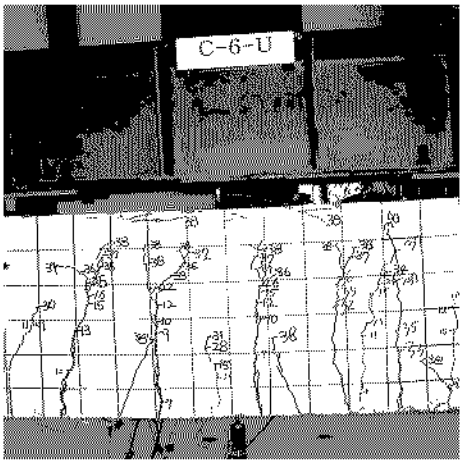
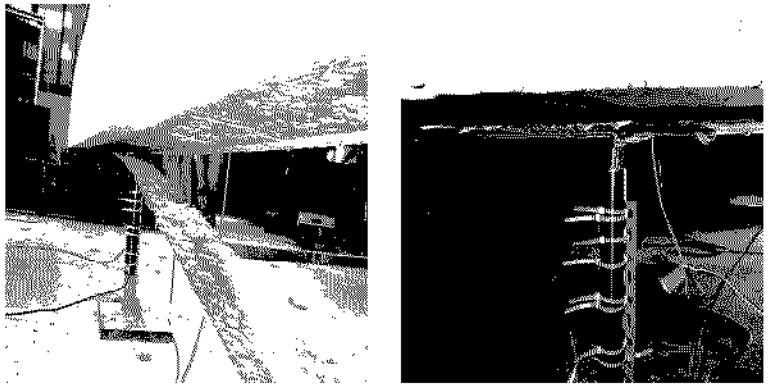


그림 5 U 보강보의
인장 균열 및 압축 균열

그림 6은 대표적인 C-8-NU 보강보와 C-8-U 보강보의 파괴 형상을 나타낸 것으로, 그림 6 (a)에서는 섬유시트의 완전한 탈락을 보여주며, 그림 6(b)에서는 U 밴드의 효과로 인해 박리 양상이 보이지만 완전히 탈락되지 않는 결과를 보이고 있다. 또한 U 보강보는 박리가 진행되는 과정에서도 변위가 꾸준히 증가하는 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

NU 보강보의 경우 C-2-NU를 제외하고는 최대하중 이후 더 이상의 휨 거동을 보이지 못하고 기준보보다 조기에 파단하였으며, U 보강보의 경우 최대하중 점을 지나 그래프가 크게 꺾였다가 U 밴드의 정착효과 때문에 보강보는 파단하지 않고 지속적인 변위 증가가 발생하였다. 특히 섬유시트의 계면박리 이후에도 보강보는 파단하지 않고 연성거동을 나타내 보였으며, 이는 단부의 U 밴드에 의해 섬유시트의 정착능력이 확연하게 향상되었음을 보여주고 있다.



(a) NU 보강보 (b) U 보강보

그림 6 보강보의 파괴형상

4. 결 론

본 논문은 실제크기의 철근콘크리트 보에 대한 탄소섬유시트의 보강 효과를 실험을 통해 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. NU 보강보와 U 보강보 모두 초기 균열의 발생 양상은 비슷하나, 항복하중 시점에서는 U보강보가 NU 보강보에 비해 새로운 균열이 많이 발생하였고, 보 전 지간에 걸쳐 균등하게 나타났다. 항복하중 이후, NU 보강보는 시트 탈락으로 균열의 성장이 미미하였고, U 보강보의 경우는 순수 휨구간에서 균열들이 성장하고 확대하였다.

2. NU 보강보는 항복이후 시트의 정착력 부족으로 인하여 시트가 탈락하면서 파괴되었으며, U 보강보의 경우 섬유시트의 계면박리 현상이 발생한 이후에도 파단하지 않고 지속적인 연성 거동을 나타내 보였다. 따라서 실제크기 보강보에서 섬유시트의 정착능력 및 보강보의 연성능력을 향상시키기 위해서는 U 밴드와 같은 정착기구가 반드시 필요함을 알 수 있다.

3. NU 보강보와 U 보강보의 최대하중은 기준보 대비 각각 최대 81%와 80% 크게 나타났다. 항복이전 구간과 마찬가지로 항복이후 구간의 최대하중과 휨 강성도 탄소섬유시트 양에 비례하여 증가하는 것으로 측정되었으며, 보강효과가 항복이후 구간에서 가장 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 홍영균, 최완철(1995), “철근콘크리트 보수·보강 재료 및 공법”, 콘크리트학회지, 제7권 6호, pp.4~13
2. 최완철, 정원용(2002), “콘크리트 구조물의 보수·보강기술의 발전방향”, 콘크리트학회지, 제14권 5호, pp.6~8
3. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI 440.2R-02
4. 이우철, 정진환, 김성도, 조백순(2002), “탄소섬유시트 RC보의 공칭 휨모멘트 산정에 대한 실험적 연구”, 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제14권 2호, pp.587~592
5. 정진환, 김성도, 조백순, 이우철(2003), “탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 공칭휨모멘트 - I. 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제23권, 제5A호, pp. 921-929
6. 정진환, 김성도, 조백순, 이우철(2003), “탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 공칭휨모멘트 - II. 해석적 연구”, 대한토목학회논문집, 제23권, 제5A호, pp. 931-938
7. El-Mihilmy, M. T. and Tedesco, J. W. (2000), "Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 6, pp. 684-691