

# 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동

## Flexural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets

김 성 도†  
Kim, Seong-Do

### 요 지

탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동을 조사하기 위해 하나의 기준보와 8개의 보강보(4개의 NU-보강보, 4개의 U-보강보)에 대한 휨 실험을 수행하였다. NU-보강보는 단부에 U 밴드를 적용하지 않은 보를, U-보강보는 U 밴드를 가진 보를 의미한다. 보강보 실험에서의 실험변수들은 탄소섬유시트의 보강접수, U 밴드의 적용유무 등이 있다. U 밴드를 가진 보강 시스템은 섬유시트의 계면박리 파괴를 지연시키고, U 밴드가 없는 보강시스템보다 나은 연성거동을 나타내 보였다. NU 보강보와 U 보강보 모두에서 섬유시트 접수의 증가에 따라 최대하중과 휨 강성은 증가하였다. 실험결과들을 이론적인 비선형 휨 해석결과와 비교하였으며, 하중-처짐 선도 및 항복이전단계와 항복이후단계에서의 항복하중, 최대하중, 휨 강성 등이 잘 일치함을 확인하였다.

**핵심용어** : 철근콘크리트 보강보, 탄소 섬유시트, U 밴드, 휨 거동

### Abstract

To investigate the flexural behavior of RC beams strengthened with carbon fiber sheets, 1 control beam and 8 strengthened beams(4 NU-beams without U-shaped band and 4 U-beams with U-shaped band) are tested. The variables of experiment are composed of the number of carbon fiber sheets and the existence of U-shaped band, 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. The experimental results are compared with the analytical results of nonlinear flexural behaviors for strengthened RC beam. The proposed analytical method for strengthened beams is proved to be accurate by an experimental investigation of load-deflection curve, yield load, maximum load, and flexural rigidities in the pre- and post-yielding stages.

**Keywords** : strengthened RC beam, carbon fiber sheet, U-shaped band, flexural behavior

### 1. 서 론

오래전부터 시공된 많은 철근콘크리트 구조물들은 여러 가지 요인으로 인하여 내력이 저하될 수 있다. 내력이 저하된 중요 콘크리트 구조는 구조물의 안전성 확보를 위하여 조속하게 보수, 보강되어야 하며, 콘크리트 구조물의 내하력 증진을 위하여 많은 방법들이 개발되어 왔다. 최근에는 섬유시트를 부착하는 보강공법이 무게비에 대한 높은 강도 및 강성, 시공 및 유지관리의 우수성 등으로 인하여 주목받고 있는 실정이다(박대

효 등, 2002; 홍건호 등, 2003; ACI Committee 440, 2000; El-Mihilmy 등, 2000).

섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 부재의 휨성능은 국내외의 많은 연구결과에 의해 규명되었으며, 대부분이 실제 구조물의 보 크기를 축소된 크기가 작은 소형보에 대한 결과들이다. 섬유시트 보강 시스템은 섬유시트 종류 및 섬유시트 양, 섬유시트의 정착장치, 섬유시트와 콘크리트 모체의 부착성능 등 보강시스템에 따라 다르게 산정되며, 보강실험체의 크기에 영향을 받는 것으로 나타나 있다(정진환 등, 2003; 홍

† 책임저자, 중신회원·경성대학교 토목공학과 교수  
Tel: 051-663-4754 ; Fax: 051-621-0729  
E-mail: sdkim@ks.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

건호 등, 2003; El-Mihilmy 등, 2000:). 본 연구에서는 실험 실적이 거의 없는 단면 크기가 400mm×600mm인 탄소섬유시트로 보강한 철근 콘크리트 보(이하 '보강보'라 칭함)에 대한 휨 실험을 수행하여, 보의 강도, 휨 강성, 연성지수 등의 실험결과들을 중심으로 보강보의 휨 성능을 살펴보고자 한다.

본 연구에서는 보강보의 휨 특성을 파악하기 위하여 9개의 철근 콘크리트 보를 제작하였으며, 보강 접수와 보강재의 정착 성능을 향상시키기 위한 U 밴드의 적용 유무에 따라 실험체를 구분하여 체계적인 실험을 실시하였다. 섬유시트는 탄소섬유를 사용하였으며, 섬유시트양의 변화에 대한 이론식의 타당성 검증을 위하여 2겹, 4겹, 6겹, 8겹의 보강접수를 선택하였다. 그리고 U 밴드 유무에 따른 휨 성능을 비교하였다. 보강보 실험에서 측정된 하중-처짐 선도, 콘크리트 균열 및 섬유시트 파괴형태, 항복하중, 최대하중, 연성지수 등을 분석하여 보강보의 휨 성능을 규명하였다. 또한, 보강보 실험의 타당성을 입증하기 위하여 휨 실험 결과와 이론적인 해석 결과를 비교하였다. 보강보에 대한 이론적인 휨 해석은 콘크리트 압축응력-변형률 관계에 비선형 식을 적용하였으며, 특히 콘크리트 인장응력을 고려한 비선형 해석을 바탕으로 하였다.

## 2. 보강보 제작 및 실험

보강보를 구성하는 재료들의 물성치를 Table 1에 열거하였다.

실험에 사용한 철근콘크리트 보는 400mm×600mm의 단면크기와 길이 6000mm, 유효깊이 550mm로 총 9개가 제작되었다. 인장철근은 3-D25를 사용하였으며, 압축철근은 2-D16을 사용하여 전단철근의 설치를 용이하게 하였다. 철근콘크리트 보의 전단파괴를 방지하기 위하여 스티럽을 D16으로 150mm간격으로 보의 전 구간에 배근하였다. 보강재로 사용된 탄소섬유시트를 철근콘크리트 보의 하부에 폭 150mm, 길이 5,550mm로 보강하였다. 보강재 양에 대한 보강보의 휨

Table 1 Properties of Materials

Materials	Properties	
	Concrete	Compressive Strength(MPa)
Modulus of Elasticity(GPa)		26.4
Steel Bar	Yield Strength(MPa)	400
	Modulus of Elasticity(GPa)	200
Carbon Fiber Sheet	Tensile Strength(MPa)	3525
	Modulus of Elasticity(GPa)	235
	Fracture Strain	0.015
	Design Thickness(mm)	0.111

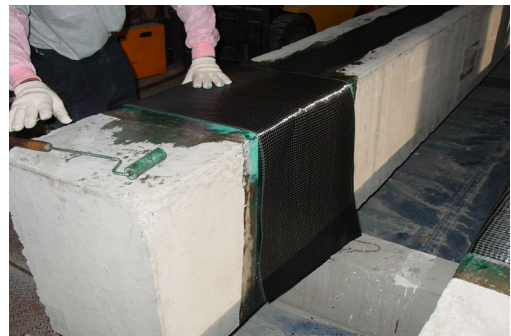


Photo 1 Bonding of Carbon fiber Sheet and U-Shaped Band to Concrete Surface

성능을 규명하기 위하여 탄소섬유시트의 보강접수를 2겹, 4겹, 6겹, 8겹으로 달리하여 각각 2개씩 총 8개의 철근콘크리트 보 하부에 부착하였으며, 이들 중 섬유시트와 콘크리트 모체와의 부착거동을 향상시키고 섬유시트 정착 유무에 대한 보강보의 휨 성능을 고찰하기 위해 휨 보강용 섬유시트와 동일한 접수를 사용한 U밴드(폭 500mm)를 4개의 보 양단부에 적용하였다. U밴드를 부착하는 장면이 Photo 1에 잘 나타나 있다. 따라서 9개의 실험보는 섬유시트를 보강하지 않은 1개의 기준보(CON), 보 하부에만 탄소섬유시트를 보강한 4개의 보강보(NU 보강보), 보 하부에 탄소섬유시트를 보강하고 양단부에 U밴드를 적용한 4개의 보강보(U 보강보)로 구성된다. 보강보의 단면 및 전체 치수, 가력 형태 등은 Fig. 1과 같으며, 기준보를 포함한 9개의 보강보들의 실험체명과 이에 대한 설명은 Table 2에 주어진다.

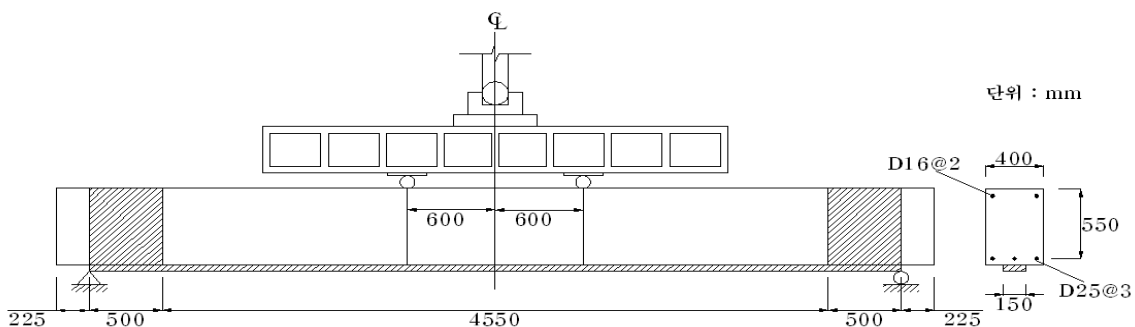


Fig. 1 Dimensions of Strengthened RC Beam and Cross Section

Table 2 RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets

Beam Type	Number of Sheets	Comments
CON	-	RC Beam without Carbon Fiber Sheet
C-2-NU	2	Strengthened RC Beam with Carbon Fiber Sheet(NU Beam)
C-4-NU	4	
C-6-NU	6	
C-8-NU	8	
C-2-U	2	Strengthened RC Beam with Carbon Fiber Sheet and U-Shaped Band(U Beam)
C-4-U	4	
C-6-U	6	
C-8-U	8	

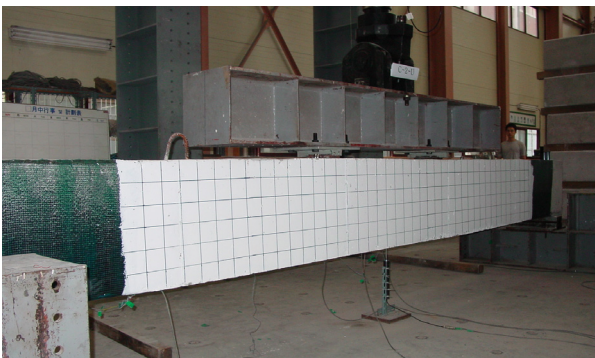
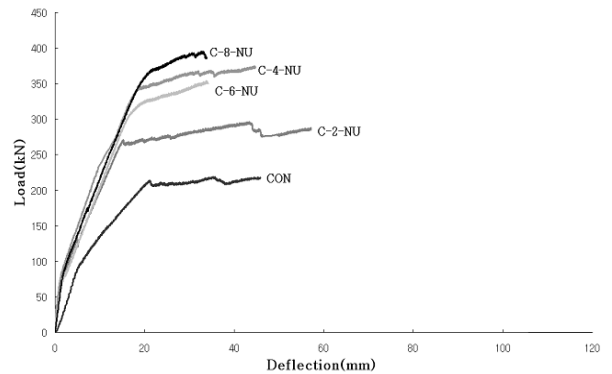
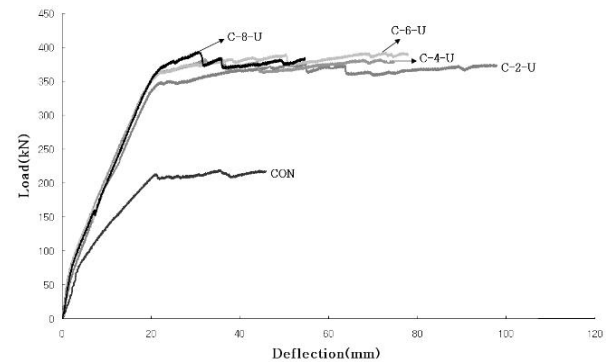


Photo 2 Loading Test of U Beam

단순지지 경계조건을 만족하도록 실험보의 양쪽 단부에서 각각 225mm떨어진 지점에 강제 몰리를 설치하였고, 실험보의 순지간이 5,550mm가 되도록 하였다. 500kN 용량의 액츄에이터를 사용하였으며, 순수 휨 구간을 확보하기 위하여 실험체의 중앙에서 좌우 600mm씩 떨어진 곳에 하중을 가하는 4점 가력실험을 실시하였다(Photo 2). 작용하중은 2.0mm/min.의 속도로 가해지며, 하중 크기는 액츄에이터에 부착된 하중계(load cell)를 통해 측정된다. 실험보의 처짐은 보의 중앙 하부에 설치된 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하였다.



(a) NU Beam



(b) U Beam

Fig. 2 Load-Deflection Curves of Strengthened RC Beams for the Number of Carbon Fiber Sheets and the Existence of U-Shaped Band

### 3. 보강보 실험결과

실험에서 측정된 하중 및 처짐 값들을 이용하여 보강보 종류별로 하중-처짐 선도를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 나타난 하중-처짐 곡선의 끝 부분은 보강보의 인장측에 부착된 탄소섬유시트가 더 이상 저항하지 못하여 처짐 측정을 종료한 곳이다.

보강보 실험 결과 균열이전구간, 항복이전구간, 항복이후구

Table 3 Loads, Deflections, Flexural Rigidity, and Ductility Ratios of Strengthened RC Beams

Beam Type	Pre-cracking Stage			Pre-yielding Stage			Post-yielding Stage			Ductility Ratio
	Crack Load (kN)	Deflection (mm)	Flexural Rigidity (kN/mm)	Yield Load (kN)	Deflection (mm)	Flexural Rigidity (kN/mm)	Maximum Load (kN)	Deflection (mm)	Flexural Rigidity (kN/mm)	
CON	70.5	2.54	27.8	213.4	21.1	7.7	219.1	35.20	0.4	1.67
C-2-NU	71.5	1.55	46.1	267.6	15.11	14.5	296.5	43.33	1.0	2.87
C-4-NU	84.3	1.56	54.0	325.1	16.89	15.7	374.7	44.67	1.8	2.64
C-6-NU	68.6	1.53	44.8	320.7	16.46	16.9	353.6	33.78	1.9	2.05
C-8-NU	84.7	1.56	54.3	362.6	20.74	14.5	395.7	33.07	2.7	1.59
C-2-U	73.7	2.57	28.7	347.9	22.25	13.9	374.0	97.87	0.3	4.40
C-4-U	81.0	1.93	42.0	332.5	18.28	15.4	382.7	71.17	0.9	3.89
C-6-U	83.3	1.96	42.5	363.0	22.07	13.9	389.0	50.47	0.9	2.29
C-8-U	82.8	1.97	42.0	368.0	22.09	14.2	384.1	35.80	1.2	1.62

간으로 구분되어 하중-처짐 관계가 표현되었으며, Elmihilmy 등(2000)가 언급한 이상화된 세 구간과 근사적으로 일치함을 알 수 있다. 이는 앞선 연구(정진환 등, 2003)에서 보여준 작은 크기의 탄소섬유시트 보강보(길이 3,000mm, 폭 200mm, 높이 300mm)의 하중-처짐 곡선이 세 구간을 잘 나타낸 것과 비교해서는 상대적으로 뚜렷한 거동을 보이지 못하는 것으로 나타났다. 각 구간에서의 기울기는 보강재 양에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 대체로 직선으로 나타났다. 실험에서 측정된 각 구간의 균열하중, 항복하중, 최대하중과 하중-처짐 선도의 기울기인 휨 강성과, 항복하중과 최대하중에 대한 처짐의 비인 연성지수를 Table 3에 정리하였다.

### 3.1 균열이전구간

균열이전구간은 보강단면의 인장측 콘크리트에 균열이 발생되기 이전의 구간으로 보강단면을 구성하는 재료들은 모두 탄성적으로 거동하며, 보 하연 콘크리트 인장변형률이 콘크리트의 인장파괴 변형률에 도달하기 이전 구간이다. 이 구간에서 균열하중은 보 하단의 인장응력이 콘크리트 휨 인장강도에 도달할 때의 하중이며, 하중-처짐 선도상 기울기가 처음으로 변하는 지점이다. 이전 소형보 실험결과(정진환 등, 2003)에서는 균열이전구간에서의 휨 강성은 보강재 양과는 무관하게 나타났으나, 본 연구에서는 균열하중에 약간의 변화가 있었으며 하중에 대응하는 처짐이 작아서 휨 강성은 크게 나타났다. 이것은 보강효과가 균열이전구간에서부터 나타남을 보여주고 있다. NU 보강보의 휨 강성은 기준보 대비 최대 95% 크게 나타났으며, U보강보의 경우 53% 크게 나타났다.

탄소섬유시트 보강재 양이 증가할수록 보강보의 균열하중도 이론적으로 증가해야 함에도 불구하고 C-6-NU에서 보는 바와 같이 기준보의 균열하중보다 작은 값이 측정되었다. 이는 실험을 통해 측정되는 초기 처짐들이 많은 오차를 내포하고 있음을 의미한다(Gopalaratnam 등, 1991). 차후에 더 많은 실험을 통해 초기 처짐의 오차에 대한 명확한 근거를 찾는 것이 필요하다.

### 3.2 항복이전구간

항복이전구간은 보 하연의 인장응력이 콘크리트 휨 인장강도를 넘어 콘크리트에 균열이 발생한 이후 단계로서, 인장측 콘크리트의 균열로 휨 강성은 줄어들며 하중-처짐 선도의 기울기가 감소한다(Fig. 2). 항복하중은 보강보의 항복점 도달 하중으로 인장철근이 항복 했을때와 일치하며, 하중-처짐 선

도상 기울기가 두 번째로 급변하는 지점이다.

항복하중과 휨 강성 모두 기준보보다 증가하였으며, 대체로 보강재의 접수 증가에 따라 항복하중 크기가 증가함을 확인할 수 있었다. NU 보강보의 항복하중은 기준보 대비 최대 70%의 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨 강성은 최대 119%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다. U 보강보의 항복하중은 기준보 대비 최대 72%의 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨 강성은 최대 100%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 즉, 이 구간에서 항복하중과 휨 강성은 모두 탄소섬유시트 양에 비례하여 증가하는 것으로 측정되었으나, 항복하중과 휨 강성에 대한 U 밴드의 효과는 여전히 나타나지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 항복이후구간

항복이후구간에서 철근의 변형률 경화를 무시하면 철근의 응력은 항복응력으로 일정하기 때문에 보강보의 휨 강성은 현저히 감소하며, 하중-처짐 선도의 기울기는 수평에 가까운 것으로 나타났다. 최대하중은 실험 중 측정된 하중의 최대값을 사용하였다. 항복이후구간에서 NU 보강보는 보강재 접수에 따라 최대하중 크기 변화가 있으면서 섬유시트 탈락으로 인한 취성파괴 거동을 나타내 보였으며, U 보강보는 보강재 접수와는 무관하게 일정한 크기의 최대하중을 보이면서 NU 보강보 보다 높은 연성 거동을 나타내 보였다. 이는 U 밴드의 정착효과가 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

U 보강보의 경우 하중의 최대값을 나타낸 이후 U 밴드의 영향으로 파단하지 않고 하중의 감소와 증가를 반복하며 지속적으로 변위가 증가하는 거동을 나타내 보였다. NU 보강보의 최대하중은 기준보 대비 최대 81%의 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨 강성은 최대 575%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다. U 보강보의 최대하중은 기준보 대비 최대 78%의 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨 강성은 최대 200%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 하중-처짐 선도와 표의 값에 의하면 탄소섬유시트로 인한 보강효과 및 최대하중과 휨 강성에 대한 U 밴드의 정착효과는 항복이후 구간에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.4 보강보의 연성

연성거동을 하는 구조물은 최대를 받을 수 있는 하중에 도달하기 전에 시각적으로 판별 가능한 변형, 처짐, 균열 등이 발생하며, 설계자는 구조물이 파괴에 도달하기 전 사전징후를 인식하고 사전조치를 취할 수 있는 기회를 통해 급작스러

운 파괴에 대한 방지책을 수립할 수 있다. KCI, ACI, AISC 설계기준 등은 강도감소계수  $\phi$ 를 결정함에 있어서 구조부재의 연성거동을 중요한 항목 중 하나로 취급하고 있으며, 기준에 적합하게 설계된 철근콘크리트 구조물은 인장철근이 항복변형률에 도달한 후 파괴에 이르는 연성적인 파괴 형태를 보여준다. 섬유시트는 파단에 도달할 때까지 탄성거동을 하며, 최대 강도에 이를 때까지 파단에 대한 사전징후를 나타내지 않는 취성재료로 분류된다. 따라서 섬유시트로 보강된 철근콘크리트 구조물의 연성거동을 규명하는 것은 아주 중요한 작업이다. 실험에서 측정된 하중-처짐 선도에 의한 연성지수를 이용하여 보강보의 연성거동을 고찰하고자 한다. 연성지수는 항복하중시 처짐  $\delta_y$ 에 대한 최대하중시 처짐  $\delta_u$ 의 비로 정의하였다.

NU 보강보와 U 보강보 모두 탄소섬유시트 양이 증가할수록 최대 하중시 처짐은 감소하였으며, 연성지수는 1.59~4.40으로 나타났다. 보강보의 연성은 보강재 양에 반비례하는 경향이 있음을 Table 3을 통해 확인 할 수 있는데, 탄소 섬유시트 8겹을 적용한 C-8-NU, C-8-U는 보강하지 않은 기준보 보다 연성지수가 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 보강재 양의 단면 전체 크기에 대한 비율이 상대적으로 높음으로써 전형적인 취성거동을 나타나 보이는 것으로 판단된다. U 보강보는 U 밴드에 의해 단부의 섬유시트 정착능력이 향상됨에 따라 섬유시트의 박리 현상이 나타난 이후에도 파단하지 않고 지속적인 연성거동을 나타내 보였다. 특히, Fig. 2의 그래프에서 알 수 있듯이 NU 보강보와 비교해서 U 보강보는 최대하중을 넘어서도 하중을 계속적으로 지지하는 것으로 나타났으며, U 밴드에 의한 연성의 증가 현상을 뚜렷이 나타내 보였다.

### 3.5 보강보의 균열 및 파괴 형태

보강보 실험에 의해 파괴형태를 살펴보면, 항복점 도달 이전에는 콘크리트 모체와 탄소섬유시트의 분리 현상이 발생되지 않아 콘크리트 모체와 탄소섬유시트는 완전 일체화된 거동을 하는 것으로 관측되었다. NU 보강보와 U 보강보 모두 초기 균열의 발생 양상은 비슷하나, 항복하중 시점에서는 NU 보강보에 비해 U 보강보에서 새로운 균열이 많이 발생하였고, 균열의 분포가 광범위하게 나타났었다(Photo 3,4). NU 및 U 보강보 모두 재하점에서 가장 가까운 위치에 있는 균열에서 콘크리트 모체와 섬유시트 사이에 계면박리가 발생하여 섬유시트 단부방향으로 박리가 진행되었다. 항복이후 구간에서는, NU 보강보의 경우 섬유시트 박리로 인하여 새로운 균열의 성장이 미미하였으나, U 보강보는 초기 인장 균

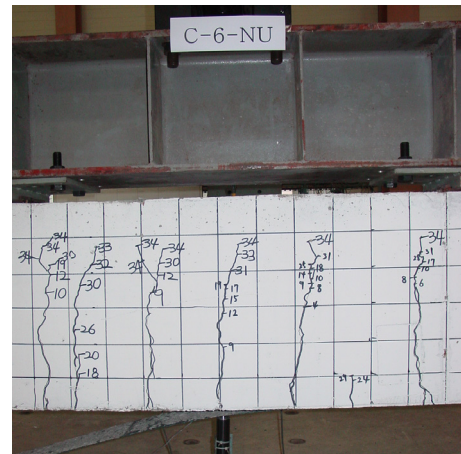


Photo 3 Concrete Cracks and Debonding Failure (NU Beam)

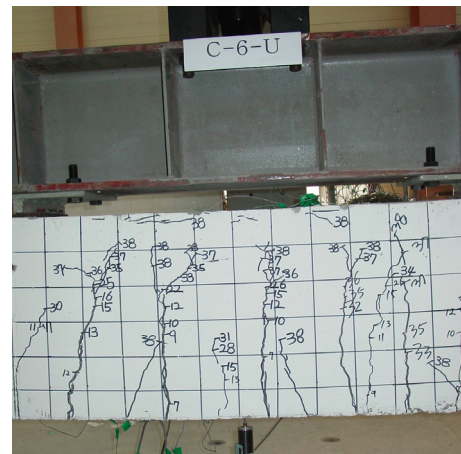


Photo 4 Tension and Compression Cracks of Concrete (U Beam)

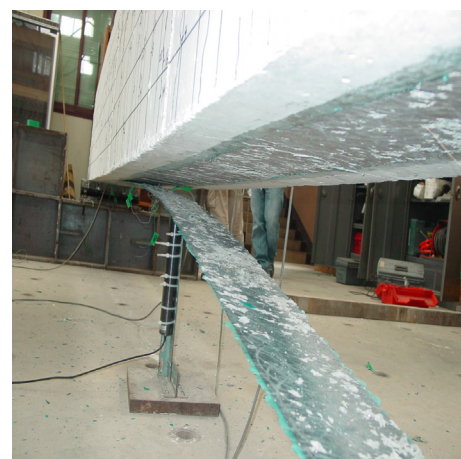


Photo 5 Behavior of Fiber Sheet (NU Beam)

열들의 확대 및 새로운 균열의 성장이 확연하게 나타났으며, 재하점 부근에 압축 균열이 발생하였다. NU보강보는 최대하중 이후 섬유시트의 정착력 부족으로 인하여 시트가 탈락하

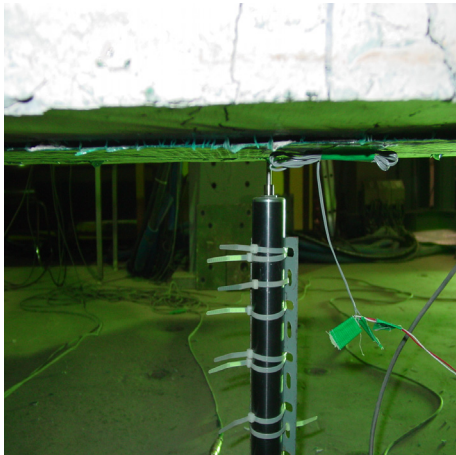


Photo 6 Behavior of Fiber Sheet (U Beam)

면서 뚜렷한 균열진전이 없이 파괴되었으며, U 보강보는 U 밴드의 도입으로 인한 정착력 증가로 하중은 증가하지 않았으나 변위는 꾸준히 증가하면서 재하점 직하 콘크리트의 파쇄가 발생하였다.

Photo 5 및 Photo 6은 대표적인 C-8-NU 보강보와 C-8-U보강보의 파괴 형상을 나타낸 것으로, Photo 5에서는 섬유시트의 완전한 탈락을 보여주며, Photo 6에서는 U밴드 효과로 인해 박리양상을 보이지만 완전히 탈락되지는 않았다. 또한 U 보강보는 박리가 진행되는 과정에서 변위가 꾸준히 증가하는 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

#### 4. 보강보의 휨 해석과 실험 결과 비교

보강보의 휨 해석에 적용된 콘크리트 압축응력-변형률 관계는 다음과 같은 Shah 등(1983)의 제안식을 사용하였다.

$$f_c = \begin{cases} f_{ck} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^4 \right] & : \epsilon_c \leq \epsilon_o \\ f_{ck} \exp \left[ -k \left( \epsilon_c - \epsilon_o \right)^{1.15} \right] & : \epsilon_c > \epsilon_o \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $f_c$ 는 콘크리트의 압축응력,  $\epsilon_c$ 는 콘크리트의 압축변형률을 의미하며,  $\epsilon_o$ 는 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ )에 대응하는 변

형률로서  $(1.491 \times 10^{-5} f_{ck} + 0.00195)$ 의 값을 가진다. 그리고  $A$ 와  $k$ 는 각각  $(E_c \epsilon_o / f_{ck}), (0.025 f_{ck})$ 의 값을 가진다.

또한 콘크리트 인장모델로서 응력-변형률 관계는 Gopalaratnam 등(1985)의 제안식을 사용하였다. 응력증가구간은 휨 인장강도( $f_r$ )에 도달할 때까지 탄성거동을 하는 직선으로 표현하였으며, 응력감소구간에서는 응력-변형률 관계를 응력-균열폭 관계로 나타낸 다음 식을 사용하였다.

$$f_t = \begin{cases} E_c \epsilon_t & : \epsilon_t \leq \epsilon_r \\ f_r (e^{-\kappa \omega \lambda}) & : \epsilon_t > \epsilon_r \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $E_c$ 는 압축탄성계수와 같은 값을 가진다고 가정하였으며,  $f_t$ 는 콘크리트의 인장응력,  $\epsilon_t$ 는 콘크리트의 인장변형률,  $\epsilon_r$ 는  $f_r$ 에 대응하는 인장파괴변형률,  $\kappa (=0.608 \times 10^{-3})$ ,  $\lambda (=1.01)$ 는 실험상수,  $\omega$ 는  $10^{-8}m$ 의 단위를 가지는 균열폭이다.

이들 조건을 적용한 응력 분포도를 Fig. 3에 나타내었다. 철근의 응력-변형률 관계는 변형률 경화를 무시하였으며, 섬유시트의 응력-변형률 관계는 파괴에 도달할 때까지 탄성적인 응력-변형률 선도를 적용하였다. 보강보 단면 구성 재료들의 거동 상태에 따라 세 구간으로 나누어 보강보 단면의 휨 성능을 해석하였다(정진환 등, 2003). 힘의 평형조건과 변형률 적합조건을 만족시킨 각 구간의 중립축거리  $c$ 와 보강 단면의 휨모멘트 산정을 위한 관계식들을 Table 4에 정리하였다.

Table 4의 중립축 거리 및 휨모멘트를 산정하는 식에 나타나는 변수들은 Fig. 3에 잘 표현되어 있으며, 특히 구성 재료들의 변형률인  $\epsilon_c, \epsilon_t, \epsilon_r$ 는 각각 콘크리트의 압축, 인장, 인장파괴 변형률,  $\epsilon_s, \epsilon_y$ 는 각각 철근의 인장, 항복 변형률을 의미한다.

보강보의 휨 해석에서는 보 하단에 부착된 보강재가 콘크리트의 인장응력을 구속하는 것으로 고려하였다. 보 하부 콘크리트 평균 인장응력( $f_t$ )의 성능을 휨 인장강도( $f_r$ )의 0%, 10%, 20%로 간주하여 보강보의 휨 해석을 수행하였으며,

Table 4 Equations for Distance of Neutral Axis and Nominal Moment

Stage	Strain	Distance of Neutral Axis, $c$	Nominal Moment, $M$
Pre-crack	$\epsilon_t \leq \epsilon_r$ $\epsilon_s < \epsilon_y$	$(A_f E_f + A_s E_s + bh E_c) \epsilon_c c - (A_f E_f h + A_s E_s d + \frac{b}{2} h^2 E_c) \epsilon_c = 0$	$T_c \left( \frac{2}{3} h \right) + T_s \left( d - \frac{1}{3} c \right) + T_f \left( h - \frac{1}{3} c \right)$
Pre-yield	$\epsilon_t > \epsilon_r$ $\epsilon_s \leq \epsilon_y$	$\left\{ \alpha f_{ck} b - \frac{b f_t \epsilon_r}{2 \epsilon_c} + \bar{\alpha} f_r b \left( 1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} \right) \right\} c^2 + (A_f E_f \epsilon_c + A_s E_s \epsilon_c - \bar{\alpha} f_r bh) c - (A_f E_f h + A_s E_s d) \epsilon_c = 0$	$T_{c1} \left( \frac{2 \epsilon_r}{3 \epsilon_c} + 1 - \beta \right) c + T_{c2} \left\{ \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} c + \bar{\beta} \left( h - c - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} c \right) + (c - \beta c) \right\}$
Post-yield	$\epsilon_t > \epsilon_r$ $\epsilon_s > \epsilon_y$	$\left\{ \alpha f_{ck} b - \frac{b f_t \epsilon_r}{2 \epsilon_c} + \bar{\alpha} f_r b \left( 1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} \right) \right\} c^2 + (A_f E_f \epsilon_c - A_s f_y - \bar{\alpha} f_r bh) c - A_f E_f h \epsilon_c = 0$	$+ T_s (d - \beta c) + T_f (h - \beta c)$

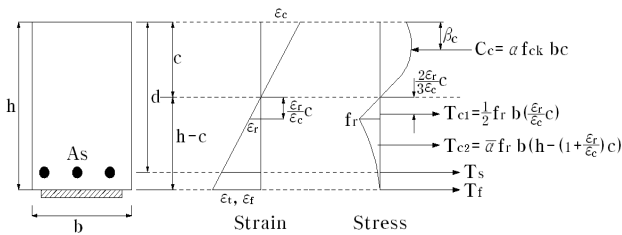


Fig. 3 Strain and Stress of Pre-yielding and Post-yielding Stage

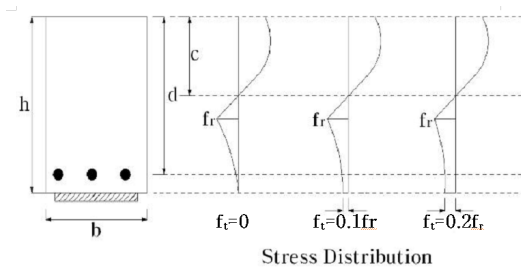


Fig. 4 Three Different Average Concrete Tensile Stress Distributions for Load-Deflection Diagram

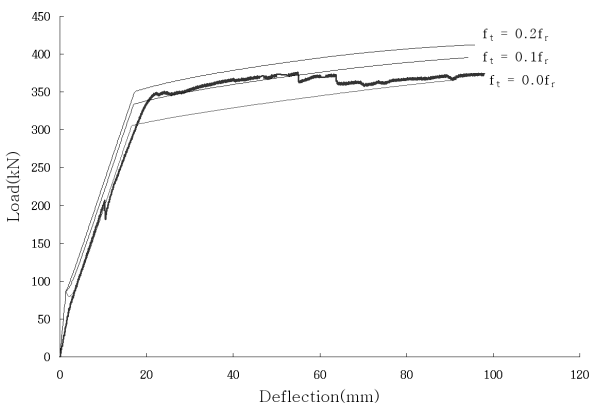


Fig. 5 Load-Deflection Curves of Experiments and Nonlinear Analysis for Strengthened RC Beam

보강보 하중-처짐 선도 산정에 사용된 세 종류의 응력 분포도를 Fig. 4에 나타내었다. 이론적 해석에 의한 하중-처짐 선도는 세 구간(균열이전구간, 항복이전구간, 항복이후구간)을 명확하게 보여주고 있으며, 보강보들 중 대표적으로 C-2-U 보강보에 대해서 휨해석과 휨실험으로 구해진 하중-처짐 선도들을 Fig. 5에서 비교하였다.

C-2-U 보강보에 대한 실험 결과를 살펴보면 항복하중을 지나 최대하중에 도달할 때까지의 하중-처짐 선도는  $f_t = 0.1f_r$ 로 휨 해석한 보강보의 하중-처짐 선도과 일치하는 것으로 나타났다. 이전의 연구결과(정진환 등, 2003)에서도 확인할 수 있었지만 단면의 크기가 기존의 실험 단면보다 큰, 현실에 더 가까운 단면의 경우에도 보강보 휨 해석은 보 하부의 콘크리트 평균인장성능을 콘크리트 휨 인장강도의 10%로 고려하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 논문은 철근콘크리트 보(400mm×600mm)에 탄소섬유시트를 보강하여 휨 실험을 수행한 결과를 바탕으로 휨 성능을 비교하였으며, 또한 탄소섬유시트로 보강된 탄소섬유시트 보의 이론적 휨 해석을 수행하여 휨 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 항복이전구간에서 NU 보강보와 U 보강보의 항복하중과 휨 강성은 탄소섬유시트 양에 대체적으로 비례하여 증가하는 것으로 측정되었으며, 항복하중은 기준보 대비 각각 최대 70%와 72%, 휨 강성은 기준보 대비 최대 119%와 100% 증가하였다. 이 구간에서 U밴드의 정착효과는 나타나지 않았다.
- 2) NU 보강보와 U 보강보의 최대하중은 기준보 대비 각각 최대 81%와 78%로 증가하였으며, NU 보강보와 U 보강보의 항복이후 구간의 휨 강성은 기준보 대비 최대 575%와 200%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 이 구간에서 탄소섬유시트의 보강효과가 가장 크게 나타났으며, 최대하중과 휨 강성에 대한 U밴드의 정착효과가 영향을 미친 것으로 생각된다.
- 3) NU 보강보와 U 보강보 모두 탄소섬유시트 양이 증가할수록 최대 하중시 처짐은 감소하였으며, 연성지수는 1.59~4.40으로 나타났다. 탄소섬유시트의 취성적인 특성으로 인하여 보강접수의 증가에 따라 연성이 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 8겹의 섬유시트를 사용한 보강보는 기준보 보다 연성이 더 작음을 보여주었는데 이는 보강재 양의 단면 전체 크기에 대한 비율이 상대적으로 높음으로써 전형적인 취성거동을 나타내 보이는 것으로 판단된다. U 밴드에 의한 연성의 증가 현상을 뚜렷이 나타내 보였다.
- 4) NU 보강보는 최대하중 이후 섬유시트의 정착력 부족으로 인하여 시트가 완전히 탈락하였으며, U 보강보는 U 밴드의 효과로 인해 박리양상을 보이지만 완전히 탈락되지 않고 하중의 증가없이 변위는 꾸준히 증가하는 연성적인 거동을 보였다. 따라서 섬유시트의 정착 능력 및 보강보의 연성을 향상시키기 위해서는 U 밴드와 같은 정착기구가 반드시 필요함을 알 수 있다.
- 5) 보강보 실험 결과와 콘크리트의 인장응력을 고려한 휨 해석을 통해 하중-처짐 선도, 최대하중, 휨 강성 등을 비교한 결과 대체로 일치하는 것으로 나타나 제안한 비선형 휨 해석의 타당성을 입증하였다. 비선형 휨 해석에 적용된 단면하부 콘크리트 평균 인장성능은 콘크

리트 휨 인장강도의 10%로 고려하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2010학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

**박대호, 부준성** (2002) 밑면 및 옆면 섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨해석, 대한토목학회 논문집, 22(5-A), pp.1045~1057.

**정진환, 김성도, 조백순, 이우철** (2003) 탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 공칭휨모멘트 - I. 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 23(5A), pp.921~929.

**정진환, 김성도, 조백순, 이우철** (2003) 탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 공칭휨모멘트 - II. 해석적 연구, 대한토목학회 논문집, 23(5A), pp.931~938.

**홍건호, 신영수** (2003) RC 구조물에 적용된 부착식 휨보강공법의 보강성능 평가, 한국콘크리트학회 논문집, 15(1), pp.78~86.

**ACI Committee 440** (2000) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-02.

**El-Mihilmy, M.T., Tedesco, J.W.** (2000) Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126(6), pp.684~691.

**Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P.** (1985) Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, *ACI Journal*, 82(3), pp.310~323.

**Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., Batson, G.B., Criwell, M.E., Ramakrishnan, V., Wecharatana, M.** (1991) Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 88(4), pp.339~353.

**Shah, S.P., Fafitis, A., Arnold, R.** (1983) Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 109(7), pp.1695~1710.

- 논문접수일 2010년 3월 2일
- 논문심사일 2010년 3월 3일
- 게재확정일 2010년 3월 18일