

고성능 섬유시트를 부착시킨 경량 프리캐스트 복합패널로 보강된 RC보의 휨거동

안상호¹⁾ · 윤정배^{2)*}

¹⁾신라대학교 건축공학과 ²⁾경상대학교 건축공학과

(2001년 10월 9일 원고접수, 2002년 5월 22일 심사완료)

Flexural Behaviors of RC Beams Strengthened by Light Concrete Precast Composite Panel with an Advanced Fiber Sheet

Sang-Ho Ahn¹⁾, and Jeong-Bae Yoon^{2)*}

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Silla University, Pusan, 617-736, Korea

²⁾ Dept. of Architectural Engineering, Gyeongsang University, Jinju, 660-701, Korea

(Received October 9, 2001, Accepted May 22, 2002)

ABSTRACT

This paper summarizes the results of experimental studies concerning the flexural strengthening of reinforced concrete beams by the external bonding of the new reinforcement material, which is composite panel with an advanced fiber sheet bonded on light concrete precast panel.

The structural behaviors of strengthened beams are compared with codes in terms of yield load and ultimate load, deflection, flexural stiffness, ductility.

Thirty nine large-scale beams were tested experimentally to evaluate the strength enhancement provided by the composite panel.

According to the results, it is shown that beams strengthened with composite panel are structurally efficient and that the strength of the strengthened beams are improved comparing with beams strengthened with fiber sheet.

Keywords : composite panel, advanced fiber sheet, strengthening, ductility, flexural stiffness

1. 서 론

고성능 섬유시트를 이용한 RC보의 보강에 관한 연구가 지금까지 많이 진행되었다¹⁻⁴⁾. 섬유시트는 가볍고 인장강도가 커서 철근 콘크리트 보의 휨보강으로 많이 사용되고 있으나, 현장에서 섬유시트 부착공법을 이용한 보강은 구조적 성능이 균일하지 못한 문제가 있다. 이는 기능공의 숙련도 및 정확도에 따라 섬유시트에 수지 함침량 및 에폭시 수지 계량오차 등의 문제와 현장에서의 양생온도 및 양생기간에 따른 문제, 그리고 시공 공정이 복잡한 문제점이 원인으로 지적되어왔다. 특히, 화재시 에폭시 수지에 의한 유독가스 발생 등과 같은 큰 취약점의 개선이 요구되고 있다. 이와 같은 문제점을 개선하고자 균일한 물성값을 갖는 보강재, 공정의 단순화와 내화성능을 확보하기 위해 경량콘크리트 프리캐스트 패널에 수지자동 함침기에

의해 함침된 고성능 섬유시트를 접착한 복합패널을 제작하였다.

복합패널을 철근 콘크리트 보에 보강하였을 때, 부재의 휨성능을 분석하기 위해 휨실험을 수행하였다.

실험에 따른 분석내용은 파괴거동, 초기균열 하중 및 처짐, 항복 및 최대내력분석, 휨강성평가, 연성평가이며, 무보강 시험체와 기존의 보강방법인 섬유시트 부착공법과 비교함으로써 복합패널을 이용한 철근 콘크리트 보의 휨보강에 적용하기 위한 기초자료를 얻는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험 개요

2.1.1 복합패널 제작

복합패널 제작과정은 Fig. 1과 같으며, 경량골재를 사용하여 2cm정도의 두께를 갖는 경량 프리캐스트 패널을 제작한 후 다음과 같이 1면에 대하여 보강처리 하였다.

* Corresponding author

Tel : 055-751-5291 Fax : 055-761-0165

E-mail : jbyoon@nongae.gsnu.ac.kr

- ① 경량패널 표면의 레이턴스를 제거 한다.
- ② 쉬트 제단 후 수지 자동함침기로 함침시킨다.
- ③ 패널표면에 에폭시 수지를 도포한다.
- ④ 함침된 섬유쉬트를 패널면에 접착시킨다.

2.1.2 시험체의 계획 및 형상

시험체 보는 단면 200×300 mm에 길이 2700 mm로 제작하여 스패ن 2,540 mm로 계획하였다. 인장철근으로 2-D16 압축철근으로 2-D13를 배근하였고, 전단에 의한 파괴를 방지하기 위하여 철근 D10을 100 mm간격으로 전 구간에 배근하였다.

복합패널 정착공정은 복합패널 보강면인 보 하부면 바탕을 그라인더로 정리하고, 복합패널을 그라인더로 설계 치수에 맞게 절단 가공한다. 복합패널 정착을 위한 양카 홀을 천공한 후 먼지를 제거하고, 주입재의 일정한 두께 유지, 수지 주입과 공기배출이 가능한 양카를 설치한다. 복합패널을 시험체 보 인장면에 정착시키고, 기포를 제거 하면서 에폭시 수지를 주입하여 밀봉작업을 한 후 24시간 양생시켰다.

Fig. 2에 시험체 단면, 철근배근도, 지지점과 하중위치를 나타내고, 무보강보, 복합패널 보강보, 섬유쉬트 보강보로 구성된다. 복합패널의 배치는 2개 패널을 보 중앙부에서 이음하였다.

2.1.3 실험변수

휨 보강의 변수는 보강패널의 종류가 탄소섬유쉬트(200

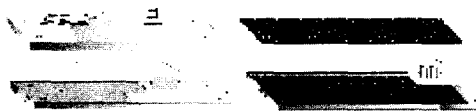


Fig. 1 Process of composite panel making

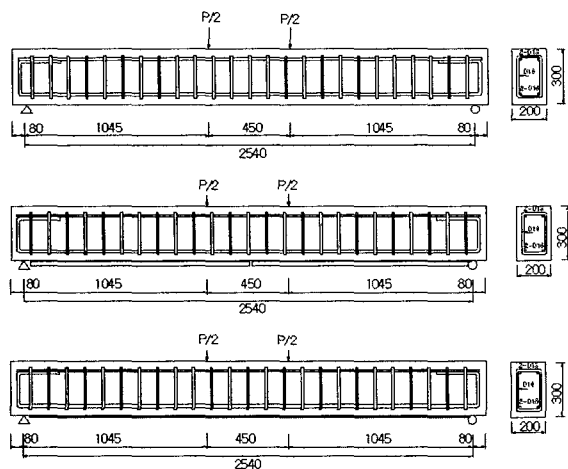


Fig. 2 Details of RC beams

g/m^2 , $300 g/m^2$), 유리섬유쉬트, 아라미드섬유쉬트로 접착된 복합패널의 변수와 쉬트 적층 수가 1겹, 2겹, 3겹으로 보강량에 대한 변수로 구별된다. 보강폭은 190 mm, 보강 길이는 2400 mm로 일정하게 하였다. 이음은 이음길이 변수 실험에서 이음길이 20 cm로 충분한 결과를 얻어 부재 중앙부 1개소에서 이음을 하였다. 보강공법에 대해서는 복합패널 주입공법과 기존의 섬유쉬트 부착공법에 대한 시험체의 거동을 분석하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

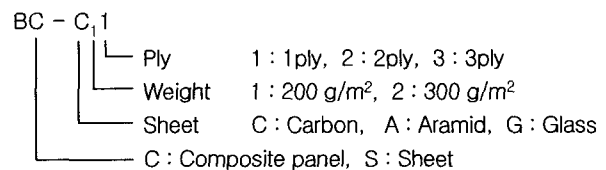
시험체는 설계강도 $240 kgf/cm^2$ 레미콘을 사용하였으며, 이에 대한 설명은 Table 1과 같다. 콘크리트 양생은 타설 후 10시간 동안 자연양생 시켰으며, 그 후 6시간 동안 $65^\circ C$ 의 온도로 증기양생 시킨 후 1주일 이상 자연양생 시켰다.

콘크리트 타설시 강제 원통형 몰드에 콘크리트를 타설하여 보강 실험보와 동일한 조건에서 양생하고 보강보 실험시 콘크리트 압축강도를 측정하였다.

콘크리트 압축강도 측정은 KS F 2405에 따라 실시하였으며, 일축 압축응력 하에서 콘크리트의 압축응력 변형률 관계를 알아보기 위하여 압축강도 측정시에 공시체 표면에 변형률게이지를 부착하였으며, 측정된 콘크리트 평균 압축강도는 $241 kgf/cm^2$ 였으며, 콘크리트 배합설계는 Table 2와 같다.

Table 1 Classification of specimens

Type	Reinforcement details
CB	Control beam
BC-C ₁ 1	Cabon sheet($200 g/m^2$) 1 ply comp.panel
BC-C ₁ 2	Cabon sheet($200 g/m^2$) 2 ply comp.panel
BC-C ₁ 3	Cabon sheet($200 g/m^2$) 3 ply comp.panel
BC-C ₂ 1	Cabon sheet($300 g/m^2$) 1 ply comp.panel
BC-C ₂ 2	Cabon sheet($300 g/m^2$) 2 ply comp.panel
BC-C ₂ 3	Cabon sheet($300 g/m^2$) 3 ply comp.panel
BC-A1	Aramide sheet 1 ply comp.panel
BC-A2	Aramide sheet 2 ply comp.panel
BC-A3	Aramide sheet 3 ply comp.panel
BC-G1	Glass sheet 1 ply comp.panel
BC-G2	Glass sheet 2 ply comp.panel
BC-G3	Glass sheet 3 ply comp.panel
BS-C ₁ 1	Cabon sheet($200 g/m^2$) 1 ply
BS-C ₁ 2	Cabon sheet($200 g/m^2$) 2 ply



2.2.2 철근

본 시험체에 사용된 철근은 SD35로 KS B 0801의 라호 규정에 따라 시험편을 제작하여, KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 실시하였다. 철근의 평균 인장강도는 3,550 kgf/cm²였으며, 시험결과를 Table 3에 나타내었다.

2.2.3 섬유쉬트

본 연구에 사용된 섬유쉬트는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유를 사용하였으며, 탄소섬유 경우는 중량 200 g/m²와 300 g/m²를 사용하였다. 실험에 의한 재료의 물성값은 Table 4와 같다.

2.2.4 에폭시 수지

시험체 제작에 사용된 에폭시 수지 함침 및 접착제는, 강도가 에폭시 수지의 요구사항을 유지하면서 점도가 낮은 수지를 사용하였다. 에폭시 수지의 물성값은 Table 5와 같다.

2.2.5 하중재하 및 측정방법

50 tonf 용량의 액츄에이터(actuator)를 사용하여 네 점 휨실험을 실시하였다. 실험보의 양쪽 단부에서 각각 80 mm떨어진 곳에 강제 로울러를 설치하여 실험보를 지지하

Table 2 Concrete mix properties

f_{ck} (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	w/c	Unit weight (kg/m ³)			
			C	S	G	AE
241.0	225,000	0.48	359	830	949	1.80

Table 3 Properties of reinforcing bar

종류	f_y (kgf/cm ²)	E_s ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	ϵ_y
D10	3,412	2.073	0.001646
D13	3,690	2.328	0.001585
D16	3,547	2.173	0.001862

Table 4 Properties of an advanced sheet

Type	Weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Elastic modulus (kgf/cm ²)	Ultimate strain (%)
CFS	200	0.111	41,673	2.35×10^6	1.5
	300	0.165	40,358		
GFS	740	0.77	6,075	2.1×10^6	2.0
AFS	300	0.208	19,728	1.25×10^6	2.4

Table 5 Properties of epoxy resin

Flexural strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Tensile shear strength (kgf/cm ²)	Viscosity (CPS)	
			Epoxy	Hardener
1171	801.1	100.0	1100	37

였다. 하중 가력점은 실험보의 중앙에서 각각 225 mm씩 떨어진 곳에 강제 가력보를 이용하여 가력하였다. 따라서, 두 가력점 사이의 450 mm구간은 순수 휨구간이 되도록 설치하였다. 하중을 균등하게 분포시키기 위하여 철제 가력점과 실험보 사이에 고무판(길이 250 mm, 폭 20 mm, 두께 2 mm)을 사용하였다. 액츄에이터를 변위 제어방식(1.8 mm/min)으로 가력하였다.

작용하중은 액츄에이터에 부착된 하중계(load cell)에 의해 측정되었으며, 작용하중에 대한 실험보의 처짐은 보의 하부에 설치된 LVDT를 이용하여 측정되었다. 인장철근, 섬유쉬트, 콘크리트 인장면의 변형률을 측정하기 위하여 실험보의 중앙부에 보 길이 방향으로 변형률게이지를 설치하였다. 또한, 실험보의 중립축 위치와 콘크리트 압축 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 압축연단 측면에 변형률게이지를 설치하였다.

하중, 각 위치의 처짐, 각 위치의 변형률은 데이터로거(data logger)에 저장한 후 컴퓨터로 처리하였다.

3. 파괴거동

복합패널로 휨보강된 철근콘크리트 보의 내력특성을 평가하기 위하여 실험중 관측된 각 보강보의 파괴거동을 조사하였다. 최종파괴거동은 다음과 같이 4가지로 구분할 수 있었다.

보강량이 상대적으로 적은 시험체 경우 인장철근 항복 후 복합패널내 섬유쉬트가 인장파단, 콘크리트 모체와 섬유쉬트의 계면이 파괴되면서 최종에 도달하는 경우, 보강재 단부에서 보강재가 박리파괴, 복합패널 섬유쉬트 이음부에서 파괴되는 양상을 보였다.

3.1 CB 시험체

초기균열은 1.515 tonf 하중에 중앙부에서 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 항복하중 전후에서 균열이 점진적으로 확장되었으며 실험에서 관찰된 항복하중은 3.93 tonf이

다. 이후 파괴하중까지 하중을 계속 작용하여 최대하중은 평균 4.84 tonf에 도달하였으며, 그 직후 점진적으로 하중이 감소하였다. 최종파괴에서는 주근에 항복변형이 나타났으며, 압괴와 함께 약간의 내력감소가 발생하였다.

3.2 스위트 인장파단 파괴 거동

BC-C11, BC-C21 시험체는 하중 2.167, 2.5 tonf에서 초기균열이 발생하였다. 하중이 증가하면서 휨균열이 보춤 방향으로 확장되고 균열 개소가 지점쪽으로 확산되었다. 항복하중은 각각 5.52, 5.92 tonf 최대하중은 7.35, 8.21 tonf으로 나타났다. 최종파괴는 계면파괴가 진행되면서 섬유파단으로 최종파괴가 되었다.

BC-G1, BC-G2는 보의 중앙부 가력점 하부에서 초기균열이 하중 2.395, 2.475 tonf에서 발생하였으며 항복하중은 5.79, 6.32 tonf이고, 최대하중은 7.13, 9.09 tonf으로 나타났다. 최종파괴는 보 중앙부 양카위치에서 섬유슈트가 파단되었다.

BC-A1, BC-A2 시험체도 유사한 거동을 보이며 보 중앙부에서 스위트파단의 거동을 보였다.

3.3 계면파괴 거동

기존의 부착공법에 의한 탄소섬유슈트 1,2겹을 보강한 BS-C11, BS-C12 시험체는 초기균열은 2.08, 2.41 tonf에 보 중앙부에서 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 휨균열이 수직방향으로 발생하였으며 항복하중은 각각 4.99, 5.20 tonf 이었다. 이후 하부에 미세한 계면파괴가 일어났고, 최대하중은 7.25, 8.17 tonf이었다. 파괴하중 6.625, 8.105 tonf에서 섬유의 계면박리가 발생하며 급격히 하중이 감소하였다. 이후 내력저하와 함께 압괴가 발생하면서 일정한 하중으로 지속되었다. 최종적인 파괴양상은 모재와 스위트사이의 계면파괴로 나타났다.

3.4 계면파괴에 이은 단부박리 파괴 거동

BC-C12, BC-C13 시험체는 초기균열은 하중 2.497, 2.607 tonf에서 각각 발생하였다. 하중이 증가하면서 휨균열이 보춤 방향으로 확장되고 균열 개소가 지점쪽으로 확산되었다. 항복하중은 각각 6.2, 6.60 tonf 이고, 최대하중은 8.55, 9.39 tonf으로 나타났다. 최종파괴는 계면파괴에 이은 단부박리였다.

BC-C22, BC-C23 시험체도 유사한 거동을 보이며, 초기균열이 하중 2.86, 2.743 tonf에서 발생하였다. 항복하중은 6.68, 7.41 tonf으로 각각 나타났고, 가력점에서 지점 쪽으로 보춤만큼 떨어진 점에서 계면파괴가 지점쪽으로 진행하였다. 최대하중은 각각 9.50, 10.8 tonf이었고, 최종파

괴는 계면파괴에 이은 단부박리로 나타났다. BC-G3 시험체도 같은 거동을 보이면서 단부박리 파괴 거동을 보였다.

3.5 이음부 파괴 거동

BC-A3 시험체는 초기균열은 하중 2.963 tonf에서 발생하였으며, 항복하중과 최대하중은 각각 7.02, 10.15 tonf으로 나타났다. 최종적인 파괴양상은 중앙 섬유슈트 이음부가 슬립으로 일부가 빠지면서 섬유가 파단된 거동을 보였다.

4. 하중-처짐

복합패널로 휨보강된 콘크리트 보의 내력특성을 평가하기 위하여 실험중 측정된 보강보의 하중-처짐 관계를 고찰하였다. 복합패널 보강보의 하중-처짐 곡선을 최대 하중 도달 시까지 각 섬유슈트의 보강량에 따라 Fig. 3에 나타내었다.

복합패널 보강보의 하중-처짐 관계는 대체적으로 콘크리트 균열이전구간, 보강보 항복이전구간, 보강보 항복이후구간의 3구간으로 구분할 수 있다⁵⁶⁾.

항복이후구간에서 보강재에 의한 휨성능 향상이 우수한 것으로 나타나 무보강보의 휨거동과 보강보의 휨거동은 확연한 차이를 나타내었다. 또한 보강재 및 보강량에 대한 항복하중과 최대하중의 성능향상을 고찰하였다.

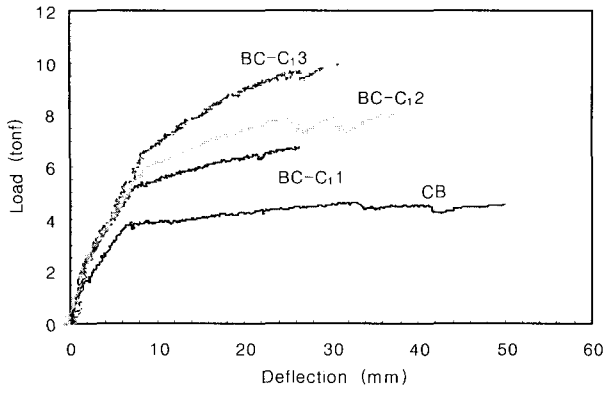
항복하중과 항복하중 시 처짐 및 최대하중과 최대하중 시 처짐을 실험값과 계산값을 비교하여 Table 6에 나타내었다. 항복하중은 보강보의 항복점 도달 하중이며, 인장철근의 응력이 항복하중에 도달했을 때의 하중과 일치한다. 최대하중은 실험 중 측정된 하중의 최대값으로 하였다. 실험값과 계산값의 비교에서 대체적으로 잘 일치함을 보이고 있다.

휨강성은 각 구간에 대한 하중-처짐 곡선의 기울기를 회귀분석하여 측정한 것이다. 보강보의 항복하중과 항복이전구간의 휨강성 및 최대하중과 항복이후구간의 휨강성을 무보강보의 하중 및 휨강성과의 기준대비 증가비를 Table 7에 나타내었다.

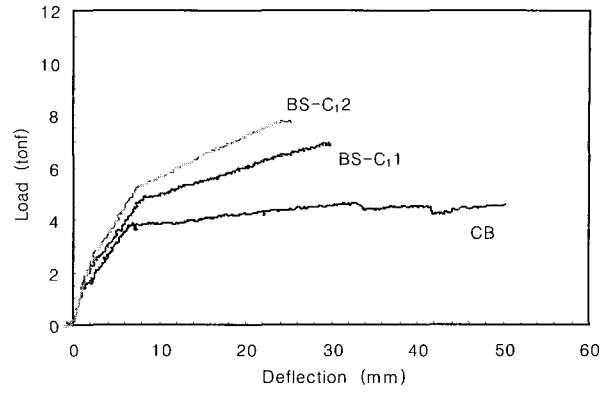
무보강보는 균열하중 도달 후 인장측 콘크리트의 균열로 인하여 휨강성이 감소되었으며, 항복하중 도달 후 처짐이 50 mm까지 급작스런 하중 변화가 없는 것으로 나타났다.

복합패널 보강보는 콘크리트 균열이전구간에서 무보강보에 대한 보강보의 휨강성은 큰 변화가 없는 것으로 측정되었다.

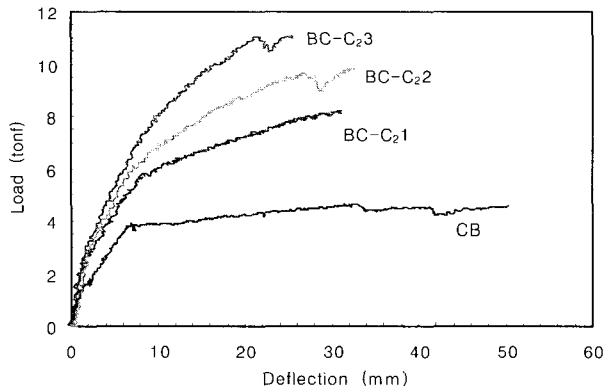
그러나 보강량이 많아질수록 균열하중은 증가하였으며, 무보강보의 균열하중에 대하여 40 ~ 100 % 증가되는 것으로 측정되었다. 특히 아라미드 섬유슈트 복합패널 보강보의 균열하중이 높게 측정되었다.



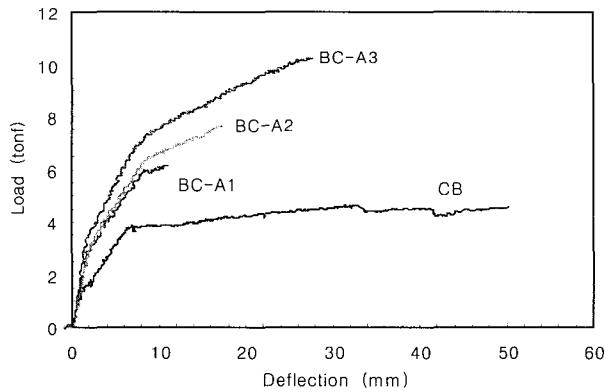
(a) BC-C1 series



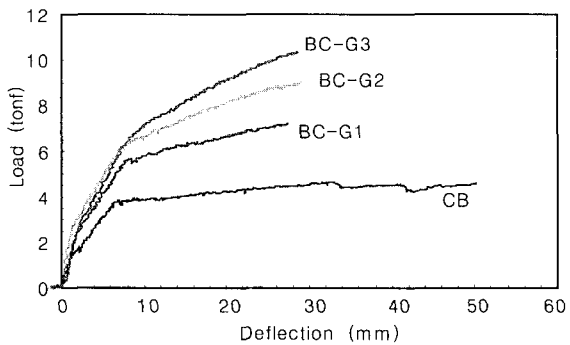
(e) BS-C1 series



(b) BC-C2 series



(c) BC-A series



(d) BC-G series

Fig. 3 Load-deflection curve

Table 6 Comparison of test and calculation results

Beam	Py				Pmax			
	Pexp. (tf)	Pcal. (tf)	Defl. (mm)	$\frac{P_{exp}}{P_{cal}}$	Pexp. (tf)	Pcal. (tf)	Defl. (mm)	$\frac{P_{exp}}{P_{cal}}$
CB-1	3.94	5.40	7.05	0.74	4.87	5.67	36.84	0.86
CB-2	4.00		7.28		4.81		32.85	
BC-C1-1	5.21		7.51		6.83		28.21	
BC-C1-2	5.96	5.92	9.97	0.95	7.87	7.35	30.89	1.00
BC-C1-3	5.60		8.92		7.36		22.47	
BC-C2-1	6.13		10.21		8.54		40.38	
BC-C2-2	6.15	6.40	10.36	0.98	8.22	8.55	39.52	1.00
BC-C2-3	6.48		7.41		8.88		20.88	
BC-C3-1	6.55		8.50		8.82		25.67	
BC-C3-2	6.64	6.87	8.82	0.96	9.99	9.39	30.41	1.00
BC-C3-3	6.62		8.12		9.36		22.66	
BC-C2-1	5.64		7.16		7.88		28.08	
BC-C2-2	5.93	6.16	9.37	0.96	8.21	8.21	31.11	1.00
BC-C2-3	6.18		9.0		8.55		24.43	
BC-C2-1	6.95		9.91		8.96		20.31	
BC-C2-2	6.61	6.87	8.82	0.97	9.81	9.50	32.21	1.00
BC-C2-3	6.49		7.94		9.72		23.47	
BC-C2-3-1	7.70		8.54		11.09	10.8	21.26	
BC-C2-3-2	7.72	7.65	8.52	0.97	10.94	0	19.96	1.00
BC-C2-3-3	6.82		8.67		10.36		20.46	
BC-A1-1	5.91		8.38		6.12		10.99	
BC-A1-2	5.66	6.27	7.38	0.94	5.96	8.47	9.43	0.74
BC-A1-3	6.03		8.16		6.73		15.57	
BC-A2-1	6.44		8.78		7.70	10.8	17.24	
BC-A2-2	6.23	7.07	7.58	0.91	7.30	2	14.86	0.72
BC-A2-3	6.50		8.36		8.33		18.27	
BC-A3-1	6.92		8.42		9.54		24.39	
BC-A3-2	7.29	7.86	8.53	0.89	10.29	12.1	27.62	0.84
BC-A3-3	6.85		9.92		10.61	6	28.67	
BC-G1-1	5.90		8.51		7.05		30.26	
BC-G1-2	5.70	5.71	9.08	1.02	7.20	7.13	27.43	1.00
BC-G2-1	6.24	6.06	8.04	1.04	9.15	9.09	35.30	1.00
BC-G2-2	6.40		8.08		9.03		29.60	
BC-G3-1	6.49		8.81		10.33	10.3	32.66	1.00
BC-G3-2	7.04	6.35	9.62	1.06	10.37	5	28.49	1.00
BS-C1-1	5.10		7.03		7.58		30.23	
BS-C1-2	4.88	5.92	8.77	0.85	6.91	7.35	29.18	0.99
BS-C2-1	5.33		7.78		7.77		24.06	
BS-C2-2	5.06	6.40	6.94	0.81	8.57	8.55	30.23	0.96

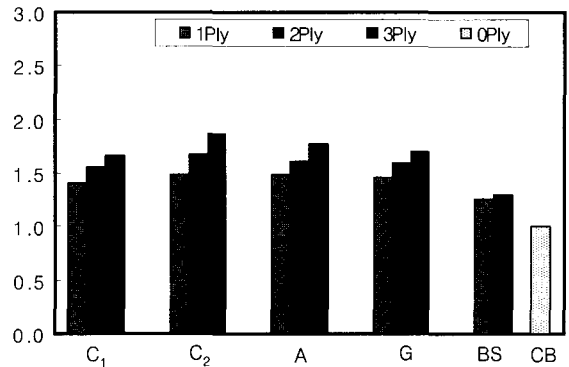
Table 7 Flexural stiffness and ratio of load

Beam	P _v			P _{max}		
	Load increment ratio	EI	EI ratio	Load increment ratio	EI	EI ratio
CB-1	-	0.4023	-	-	0.0345	-
CB-2	-	0.4664	-	-	0.0340	-
BC-C ₁ -1	1.31	0.5070	1.17	1.41	0.0758	2.21
BC-C ₁ -2	1.50	0.5502	1.27	1.63	0.0904	2.64
BC-C ₁ -3	1.41	0.5133	1.18	1.52	0.1229	3.58
BC-C ₂ -1	1.54	0.4798	1.11	1.76	0.138	4.02
BC-C ₂ -2	1.55	0.4985	1.15	1.70	0.1193	3.48
BC-C ₂ -3	1.63	0.6270	1.44	1.83	0.1772	5.16
BC-C ₃ -1	1.65	0.5937	1.37	1.82	0.1952	5.69
BC-C ₃ -2	1.67	0.6321	1.46	2.06	0.1746	5.09
BC-C ₃ -3	1.67	0.6218	1.43	1.93	0.218	6.36
BC-C ₂ 1-1	1.42	0.5523	1.27	1.63	0.1423	4.15
BC-C ₂ 1-2	1.49	0.4849	1.18	1.70	0.1134	3.31
BC-C ₂ 1-3	1.56	0.6453	1.49	1.77	0.1574	4.59
BC-C ₂ 2-1	1.75	0.5612	1.29	1.85	0.20	5.83
BC-C ₂ 2-2	1.66	0.6650	1.53	2.03	0.167	4.87
BC-C ₂ 2-3	1.63	0.6650	1.53	2.01	0.2062	6.01
BC-C ₃ 3-1	1.94	0.6848	1.58	2.29	0.3109	9.06
BC-C ₃ 3-2	1.94	0.7194	1.66	2.26	0.2526	7.36
BC-C ₃ 3-3	1.72	0.6629	1.53	2.14	0.3402	9.92
BC-A1-1	1.49	0.4752	1.09	1.26	0.0660	1.92
BC-A1-2	1.43	0.5159	1.19	1.23	0.2130	6.21
BC-A1-3	1.52	0.5236	1.21	1.39	0.0850	2.47
BC-A2-1	1.62	0.4994	1.15	1.59	0.1440	4.19
BC-A2-2	1.57	0.5885	1.36	1.51	0.1340	3.91
BC-A2-3	1.64	0.5896	1.36	1.72	0.1900	5.54
BC-A3-1	1.74	0.6149	1.42	1.97	0.1700	4.95
BC-A3-2	1.84	0.6105	1.41	2.13	0.1560	4.55
BC-A3-3	1.73	0.5621	1.30	2.19	0.1840	5.36
BC-G1-1	1.49	0.5447	1.26	1.46	0.0640	1.87
BC-G1-2	1.44	0.5348	1.23	1.49	0.0656	1.91
BC-G2-1	1.57	0.5955	1.37	1.89	0.0894	2.61
BC-G2-2	1.61	0.5807	1.34	1.87	0.1132	3.3
BC-G3-1	1.63	0.5692	1.31	2.13	0.1263	3.68
BC-G3-2	1.77	0.6445	1.49	2.14	0.1479	4.31
BS-C ₁ 1-1	1.28	0.5514	1.27	1.57	0.1132	3.3
BS-C ₁ 1-2	1.23	0.4458	1.03	1.43	0.1020	2.97
BS-C ₁ 2-1	1.34	0.5114	1.18	1.61	0.1531	4.46
BS-C ₁ 2-2	1.27	0.5351	1.23	1.77	0.1474	4.30

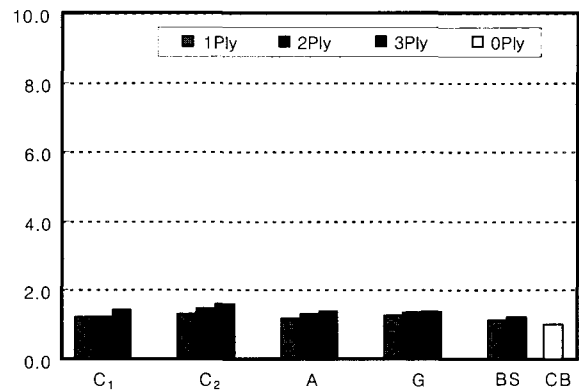
항복하중에 대한 복합패널의 보강효과는 균열하중의 경우와 비슷한 경향을 나타내었으며, 무보강보의 항복하중에 대하여 40 ~ 87% 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 기존 섬유쉬트 보강보의 항복하중은 복합패널 보강보의 항복하중보다 다소 낮게 측정된 것으로 나타났다. 또한 휨강성에 대한 복합패널의 보강효과는 균열하중 및 항복하중의 경우와 비슷한 경향을 나타내었다. 보강량이 증가할수록 휨강성은 증가하여 20 ~ 60%의 휨강성 증가 효과를 나타내었다. 각 실험보의 보강량(보강겹수)에 대한 항복하중 증가비와 이 구간의 휨강성 증가비를 Fig. 4에 나타내었다.

복합패널의 보강효과는 균열하중 및 항복하중의 경우보다 최대하중에서 더욱 뛰어난 것으로 나타났으며, 보강량

증가에 대한 최대하중의 증가도 뚜렷하게 나타났다. 무보강보 최대하중에 대한 각 보강보 최대하중 증가비를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 각각의 섬유쉬트를 3겹 보강한 복합패널의 최대하중은 무보강보와 비교했을 때 2배 이상 도달하여 외부하중에 대한 안정성의 확보를 입증하였다. 보강보 항복이후의 초기구간에서 측정된 휨강성은 대체적으로 보강량에 비례하여 증가하였다. Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 이 구간에서 측정된 휨강성 증가비는 항복이전 구간에서 측정된 휨강성 증가비보다 최대 10배까지 높은 휨강성 증가비를 나타내었다. 또한 이 구간에서 측정된 보강보의 휨강성은 무보강보의 휨강성보다 최대 7배 이상 휨강성 증가를 나타내었다. 복합패널 보강보 실험결과 무보강보와 비교하여 항복이전 구간에서 휨강성 및 항복하중은 다소 증가한 것으로 나타났다. 항복이후 구간에서 휨강성은 상당히 증가하였으며, 최대하중도 최대 2배 이상 증가하였다. 따라서 복합패널 보강보의 휨성능은 항복이후구간에서 가장 효과적이었으며, 사용성과 안정성에 대한 효과를 입증하였다. 또한 무보강보와 보강보의 하중-처짐 곡선을 비교하면, 확연한 휨거동의 차이를 나타내었다.(Fig. 3)



(a) Ratio of maximum load



(b) Ratio of flexural stiffness

Fig. 4 Ratio of yield load and flexural stiffness according to reinforcing ply

역학적인 관점에서 살펴보면, 비중 200 g/m^2 탄소섬유 쉬트 3겹과 300 g/m^2 탄소섬유 쉬트 2겹은 동일한 역학적 특성을 갖고 있다. 이들 두 종류의 탄소섬유 쉬트를 사용한 복합패널 보강보의 하중-처짐 곡선을 Fig. 6에 비교하였으며, 두 보강보의 휨성능은 거의 동일한 것으로 나타났다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 밀도 200 g/m^2 탄소섬유 쉬트를 1겹 및 2겹을 사용한 복합패널 보강보와 기존 섬유 쉬트 부착 보강보의 휨성능을 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 복합패널 보강보의 휨성능이 기존 섬유 쉬트 부착 보강보 보다 다소 우수하거나 동일한 것으로 나타나, 복합패널 보강보와 기존 섬유 쉬트 부착 보강보의 휨성능은 동일한 것으로 결론지을 수 있다.

5. 연 성

본 연구에서 보강재로 사용된 복합패널의 섬유 쉬트는 파단에 도달할 때까지 탄성거동을 하며, 최대 강도에 도

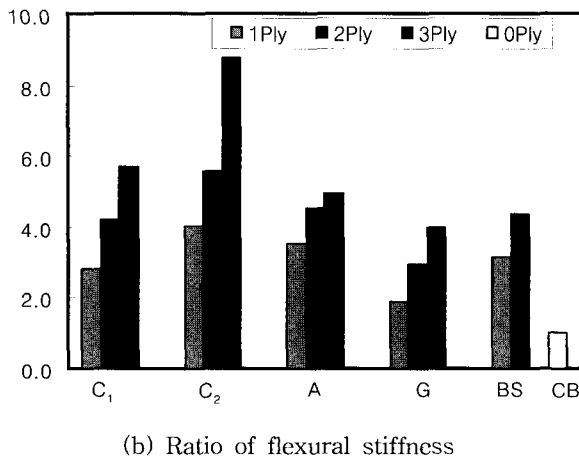
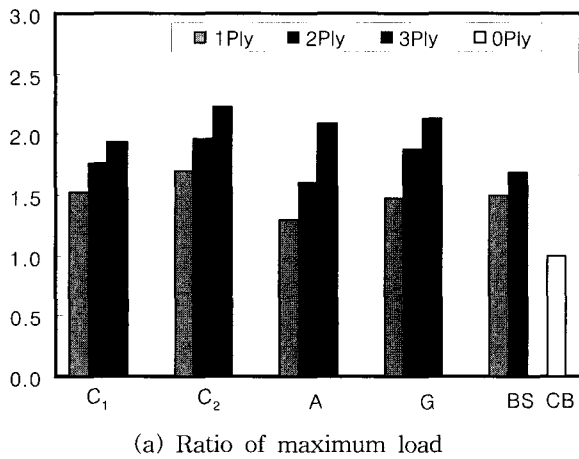
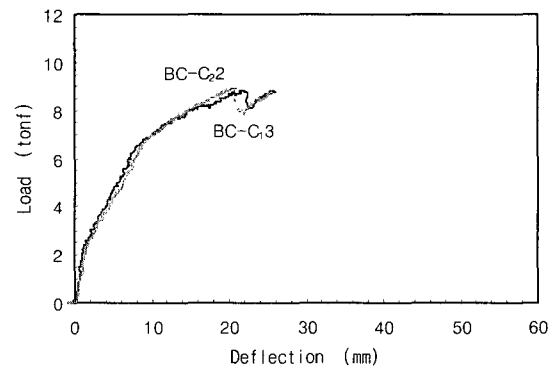
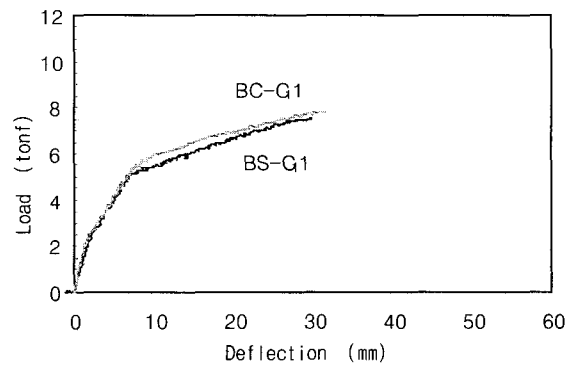


Fig. 5 Ratio of maximum load and flexural stiffness according to reinforcing ply

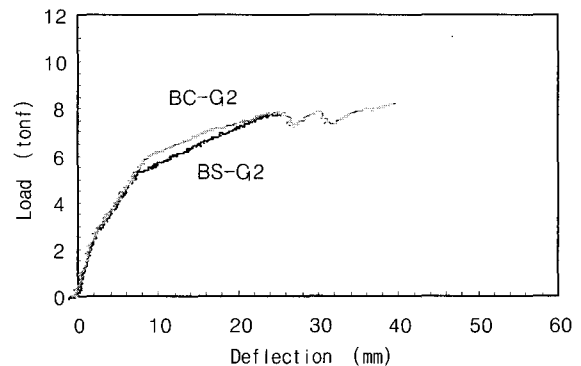
달하였을 때 까지 파단 사전징후를 나타내지 않는 취성재료이다. 따라서 섬유 쉬트를 철근콘크리트 구조물에 완전 일체화시킨 복합패널 보강 구조물의 연성거동을 구명하였다. 복합패널 보강 철근콘크리트 보실험에서 측정된 하중-처짐 곡선에 의한 연성지수를 이용하여 연성거동을 고찰하였다. Fig. 7은 복합패널 보강 철근콘크리트 보의 일반적인 하중-처짐 곡선이다. 보강재의 보강효과는 보강재의 인장파단 또는 단부박리파괴가 발생하는 순간까지 유효하며, 대체적으로 최대하중에 도달했을 때이다. 보강재가 파단되기 전의 연성거동을 고찰하기 위하여 보강보의 항복시



(a) BC-C₁₃ and BC-C₂₂



(b) BC-C₁₁ and BS-C₁₁



(c) BC-C₁₂ and BS-C₁₂

Fig. 6 Comparison of load-deflection according to the same reinforcing capacity

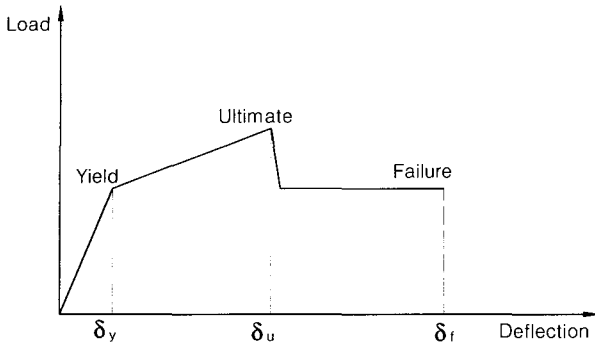


Fig. 7 Typical load-deflection curve for composite panel strengthened beam

처짐 δ_y 에 대한 최대하중시 처짐 δ_u 의 비를 최대하중 연성지수 μ_1 이라 정의하였다. 그리고 보강보의 항복시 처짐 δ_y 에 대한 파괴하중시 처짐 δ_f 의 비를 파괴하중 연성지수 μ_2 라 정의하였다. 연성지수 μ_1 과 μ_2 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu_1 = \frac{\delta_u}{\delta_y}, \quad \mu_2 = \frac{\delta_f}{\delta_y}$$

각 실험보에 대한 연성평가 결과를 Table 8에 정리하였다. 보강경수 변화에 대한 복합패널 보강보의 평균 최대하중 연성지수와 파괴하중 연성지수는 4종류의 보강재료 (C1, C2, G, A)마다 각기 달리 나타났다. 따라서 본 연구에서 실시한 복합패널 보강보 실험을 통한 연성특성은,

Table 8 Test results of ductility

Beam	μ_1		μ_2	
	μ_1	Ave.	μ_2	Ave.
CB-1,2	5.23, 4.51	4.87	-	-
BC-C ₁ 1-1,2,3	3.76, 3.13, 2.52	3.14	4.82, 3.26, 2.52	3.53
BC-C ₂ 1-1,2,3	3.95, 3.81, 2.82	3.52	3.96, 3.87, 4.06	3.96
BC-C ₃ 1-1,2,3	3.02, 3.45, 2.79	3.09	3.05, 3.45, 3.06	3.19
BC-C ₂ 1-1,2,3	3.92, 3.32, 2.71	3.32	5.73, 4.11, 2.95	4.26
BC-C ₂ 2-1,2,3	2.05, 3.65, 2.96	2.89	2.58, 3.75, 3.52	3.28
BC-C ₂ 3-1,2,3	2.49, 2.34, 2.36	2.40	2.97, 2.81, 2.71	2.83
BC-A1-1,2,3	1.31, 1.28, 1.91	1.50	1.39, 1.35, 2.00	1.58
BC-A2-1,2,3	1.96, 1.96, 2.19	2.04	2.01, 2.08, 2.19	2.09
BC-A3-1,2,3	2.90, 3.24, 2.89	3.01	2.96, 3.30, 2.95	3.07
BC-G1-1,2	3.56, 3.02	3.29	3.77, 3.25	3.51
BC-G2-1,2	4.39, 3.65	4.02	4.45, 3.65	4.05
BC-G3-1,2	3.71, 2.96	3.03	3.91, 2.97	3.44
BS-C ₁ 1-1,2	4.30, 3.33	3.82	4.59, 3.72	4.16
BS-C ₂ 1-1,2	3.09, 4.36	3.73	3.25, 4.62	3.91

보강량 변화에 대해 일정한 양상을 나타내지 못하여 보강보의 연성특성을 결론짓는데 무리가 따른다. 그러나 최대하중 도달시 보 중앙부의 처짐은 보강재료 및 보강량에 무관하게 약 30 mm정도로 측정되었다. 따라서 실험오차를 고려한 복합패널 보강보의 최대하중 연성지수는 무보강보의 50%정도로 예측가능하며, 보강보 해석 및 설계시 이러한 연성특성을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 1면에 고성능 섬유슈트를 부착시킨 복합패널을 보강한 철근콘크리트 보의 휨거동을 실험적으로 구명한 것으로서, 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 시험체의 최종파괴거동은 복합패널의 섬유슈트 인장파단파괴, 복합패널의 계면이 파괴되면서 단부박리파괴, 계면파괴에 의한 섬유슈트파단, 복합패널의 이음부 슬립에 의한 이음부파괴로 최종파괴에 도달하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 복합패널 보강보 실험결과 무보강보와 비교하였을 때, 균열이전 구간에서 균열하중은 40 ~ 100% 증가하는 것으로 나타났다. 항복이전구간의 휨강성 및 항복하중은 20 ~ 60%, 40 ~ 87% 증가되었으며, 항복이후구간의 휨강성은 최대 7배 이상, 최대하중은 최대 2배 이상 증가되는 것으로 나타났다.
- 3) 복합패널 보강보의 휨강성과 기존 섬유슈트 부착 보강보의 휨강성은 동일한 것으로 나타났다.
- 4) 탄소섬유슈트 복합패널 보강보의 경우 섬유슈트의 밀도가 200 g/m²인 3겹과 밀도가 300 g/m²인 2겹의 휨강성은 동일한 것으로 나타났다.
- 5) 복합패널 보강보의 보강량 증가에 대한 연성지수 변화 추이는 보강재료 및 보강량에 무관하게 최대하중시 연성지수는 무보강보의 50%정도로 예측되었다.

감사의 글

본 연구 수행에 협조해 주신 (주)엠프로에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W., and Hughes, M. L., "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 23, 1999.3-4, pp.212~220.
2. Toutanji, H. A. and Saafi, M., "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer(GFRP) Bars,"

- ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 5, 2000.9-10, pp.712~719.
3. Bonacci, J. F. and Maalej M., "Behavioral Trends of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP," *Journal of Composites for Construction*, 2001. 5 pp.102~113.
 4. Bonacci, J. F. and Maalej, M., "Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer for Rehabilitation of Corrosion Damaged Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No.5, 2000. 9-10 pp.703~711.
 5. Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W., and Hughes, M. L., "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 2, 1999.3-4 pp.212~220.
 6. El-Mihilmy, M. T. and Tedesco, J. W., "Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 6, 2000.6, pp.684~691.

요 약

본 연구는 경량 콘크리트 프리캐스트 패널에 고성능 섬유쉬트를 접착시킨 복합패널로 철근 콘크리트 보 하부에 휨 보강하여 보강보의 구조적 성능을 분석하였다.

보강보의 구조적 고찰은 항복하중, 최대하중, 각 하중에서 처짐 그리고 휨강성과 연성을 비교 분석하였다. 그 결과 39개 보를 실험하여 복합패널로 보강한 경우에 휨강도가 균일하게 향상됨을 보였다. 또한 실험결과 복합패널로 보강한 철근 콘크리트 보 는 구조적으로 우수한 특성을 보였고, 섬유쉬트 부착공법으로 보강된 보와 비교할 경우에도 보강보의 강도가 더 개선되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 복합패널, 고성능 섬유쉬트, 보강, 연성, 휨강성