



유사연성 하이브리드 FRP 시트를 이용한 RC 보의 휨 보강

하상수¹⁾ · 최동욱^{2)*} · 이진용³⁾ · 김길희⁴⁾

¹⁾한경대학교 건설공학연구소 ²⁾한경대학교 건축학부 ³⁾(주)케어콘 ⁴⁾공주대학교 건축공학부

Pseudo-Ductile Hybrid FRP Sheet for Strengthening Reinforced Concrete Beams

Sang-Su Ha¹⁾, Dong-Uk Choi^{2)*}, Chin-Yong Lee³⁾, and Kil-Hee Kim⁴⁾

¹⁾Center for Construction Engineering Research, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

³⁾CareCon, Co., Ltd., Seoul 134-030, Korea

⁴⁾Dept. of Architectural Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

ABSTRACT Use of both carbon fiber (CF) and glass fiber (GF) at the same time to strengthen existing flexural members was exploited. Using a proper volumetric GF / CF ratio, the CF can rupture first followed by subsequent rupture of GF at higher stress and strain showing a pseudo-ductile behavior. A theoretical study indicated that the ratio is 4.62 : 1 and higher where the pseudo-ductile effect can be shown. Flexural tests of plain concrete beams strengthened using fibers were first carried out. Hybrid FRP sheet using 8.8 : 1 ratio was then fabricated and the sheet was used to strengthen reinforced concrete beams. The RC beams strengthened using 1-ply and 2-ply hybrid sheets both revealed increased strength over a non-strengthened beam and ductile flexural behavior. A comparable beam strengthened using CF also showed increased strength but with limited ductility.

Keywords : hybrid, pseudo-ductile, fiber reinforced polymer, flexural strengthening, FRP sheet

1. 서 론

섬유보강폴리머 (fiber reinforced polymer, 이하 FRP) 시트를 사용한 콘크리트구조물의 보강에 있어서, 주로 탄소 섬유 (carbon fiber, 이하 CF)를 이용하여 왔다. CF는 내구성이 우수하고, 높은 강성 및 강도를 가지므로 보강 효과가 우수하다. 반면에 CF는 고가이며, 선형거동으로 인한 취성파괴가 문제점으로 지적되어 왔다. 유리섬유 (glass fiber, 이하 GF) 역시 선형거동을 보이지만, CF에 비하여 경제적 이고, 강재의 1/3~1/5 수준의 비교적 높은 탄성계수를 갖고 있으며, 인장강도는 CF 보다 작고 철근에 비하여 크다¹⁾.

서로 다른 성질을 갖는 하나 이상의 섬유를 조합하여 각각의 장점을 활용하고자 하는 연구가 1970년대 이후 여러 연구자에 의해 수행되어 왔으나, 콘크리트구조물의 보강에의 적용에 관한 연구는 비교적 최근에 발표되었다^{2,3)}.

Grace 등은 두 가지 CF (고탄성 CF 및 고강도 CF)와 한 가지 GF (E-glass)를 조합하여, 하이브리드 섬유를 구성하였다⁴⁾. 하이브리드 섬유가 인장을 받는 경우, 극한변형률이 작은 순서로 순차적으로 파단한다. 한 가지 섬유가 파단한 후에는 남은 섬유의 강성 및 극한변형률이 인

장 성능을 결정하게 된다. 그러므로 탄성계수, 인장강도 및 극한변형률이 서로 다른 두 가지 이상의 섬유를 적절히 혼합하여 마치 철근이 항복하는 것과 유사한 연성거동 (유사연성거동)을 보이도록 설계할 수 있다. 이러한 하이브리드 섬유로 보강한 콘크리트보는 CF로 보강한 경우보다 취성파괴의 가능성이 작아지고, 또한 첫 번째 섬유의 파단 시 소음을 발생하므로 섬유를 적절히 배합하는 경우 사용자에게 임박한 파괴를 미리 경고하도록 설계할 수도 있다⁴⁾.

본 연구에서는 고강도 CF 및 E-glass GF 두 가지 섬유를 사용하고, 위에 기술한 것과 같은 유사연성거동을 나타낼 수 있는 섬유의 조합을 이론적, 실험적으로 연구하였다. 두 가지 섬유를 사용하여 하이브리드 섬유 시트를 제조하고, 철근콘크리트보를 보강하여 휨 실험을 수행하였다. 또한 단일 섬유를 사용하여 보강한 철근콘크리트보의 기존 휨 설계식을 하이브리드 시트에 적용한 경우에 대한 적용성을 검증하였다⁵⁻⁷⁾.

2. 재료의 성질

2.1 섬유

본 연구에 사용된 두 가지 섬유를 Fig. 1에 나타내었다.

*Corresponding author E-mail: choиду@hknu.ac.kr

Received October 22, 2007, Accepted January 4, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

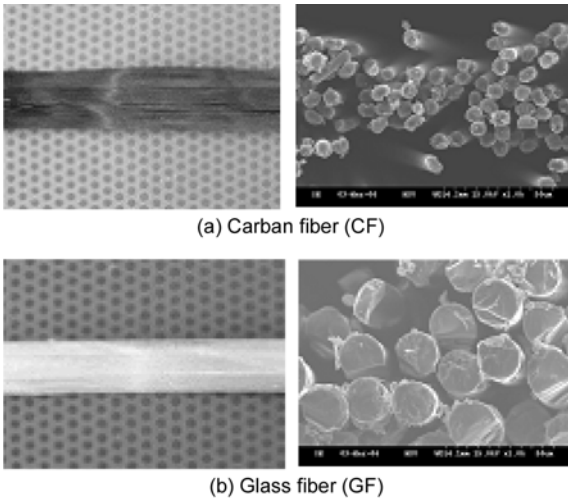


Fig. 1 Fiber strands: shape and cross-sectional view by electron microscope ($\times 1,000$)

Fig. 1 (a), (b)는 각각 CF (12K) 및 GF 스트랜드 (2200tex)의 형태와 단면 형상을 보여주고 있다. 전자현미경으로 촬영한 섬유 단면으로부터 CF 및 GF 필라멘트 단면의 평균 직경이 각각 약 $7.2\ \mu\text{m}$ 및 $20.5\ \mu\text{m}$ 인 것을 알 수 있었다. 섬유 비중 ($\rho_{CF}=1.80$, $\rho_{GF}=2.54$) 및 무게로부터 결정한 단면적은 CF 스트랜드 $0.444\ \text{mm}^2$, GF 스트랜드 $0.866\ \text{mm}^2$ 이었다. 각 섬유의 인장 물성을 5 kN 용량의 UTM을 사용하여 시험하였고, 시험 결과를 제작자가 제공한 필라멘트의 물성과 비교하여 Table 1에 나타내었다. Table 1의 시험 결과는 각 10개 시험의 평균값이다.

인장시험 결과 섬유 스트랜드의 인장강도 및 탄성계수가 모두 섬유 제작자가 제공한 필라멘트 물성에 비하여 큰 폭으로 감소하였다. Table 1에서 CF 스트랜드의 인장강도 및 탄성계수는 각각 필라멘트의 26.2%, 49.4%이고, GF 스트랜드의 필라멘트에 대한 인장강도 및 탄성계수는 각각 27.3%, 62.1%이다. 이 시험 결과는 스트랜드를 구성하는 모든 필라멘트의 긴장도가 일정하지 않으며, 따라서 모든 필라멘트가 한 번에 파괴되지 않고 순차적으로 파괴되는 것을 보여주고 있는 것으로 사료된다. 이러한 섬유 필라멘트와 스트랜드 물성의 상이점은 [참고문헌 5]에서도 지적하고 있다.

2.2 접착제

콘크리트 부재를 FRP 재료로 보강할 때, 섬유와 콘크

리트를 부착시키기 위하여 에폭시 수지 접착제가 사용되었다. 접착제의 인장강도, 탄성계수 및 극한변형률은 각각 42.8 MPa, 2.19 GPa 및 1.97%이었다.

2.3 콘크리트 및 철근

실험실 인근의 레미콘 공장으로부터 콘크리트를 주문하여 실험체를 제작하였다. 무근콘크리트보 실험 시 콘크리트 압축강도는 26.0 MPa이었고, RC 보 실험 시의 콘크리트 압축강도는 29.5 MPa이었다. RC 보에 사용한 SD 400 등급 이형철근의 항복강도 및 인장강도는 각각 420 MPa, 550 MPa이었다.

3. 섬유 혼합의 이론적 연구

CF와 GF 두 가지 섬유를 혼용한 합성재료의 인장강도 및 파괴 형태에 대하여 Manders 등은 Fig. 2를 제시하였다³⁾. Fig. 2에서 A점 및 D점은 각각 GF 및 CF가 체적비 100%인 경우의 강도를 나타내고, 직선 BD는 CF가 극한변형률에 도달한 시점에서, 합성 재료의 응력을 나타내고 있다. 첫 번째 구간은 합성 재료의 변형률이 CF의 극한변형률에 도달할 때 발생하므로 선 BD와 같다. 첫 번째 구간 후 CF 양이 GF에 비하여 상대적으로 크지 않으면, GF가 추가 저항을 제공할 수 있다. 즉, C점

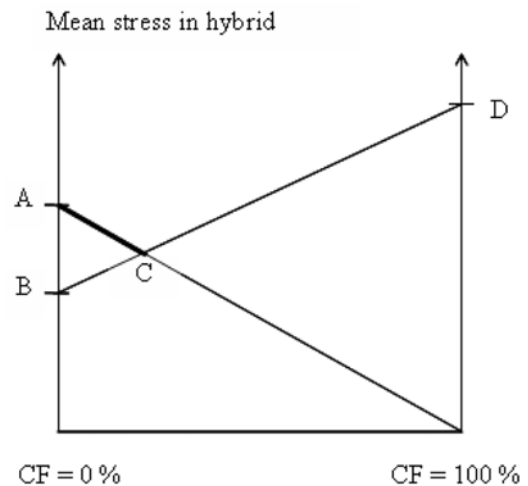


Fig. 2 Theoretical strength of CF-GF hybrid composites in tension³⁾

Table 1 Summary of fiber tensile properties: manufacturer's spec. on filament properties vs. test results of strand properties

Item	Fiber type	Filament ⁽¹⁾	Strand ⁽²⁾	Strand/filament (%)
Ult. tensile strength (MPa)	CF	4,900	1,280	26.2
	GF	2,900	792	27.3
Elastic modulus (GPa)	CF	230	114	49.4
	GF	72.4	45.0	62.1
Ult. tensile strain (%)	CF	2.13	1.12	52.6
	GF	4.01	1.76	43.9

Note) (1) provided by manufacturer; (2) test results determined in this study

좌측에서 합성 재료의 인장강도는 GF가 지배하고 선 AC로 표현된다. CF 양이 상대적으로 큰 C점의 우측 혼합인 경우에는 CF 파단 후 GF가 저항할 수 없다. 따라서 Fig. 2에서 합성 재료의 인장강도는 선 ACD로 표시되고, 이 중에서 하이브리드 거동 (순차적 CF-GF 파단)을 보이는 것은 굵은 선으로 표시된 AC 구간이다. Fig. 2를 이용하고, Table 1의 섬유 스트랜드의 인장 시험으로부터 결정한 강도를 대입하면, C점에 해당하는 X축 값은 17.8%이므로 GF : CF는 4.62 : 1 (체적비)이다.

4. 실험

4.1 섬유보강 무근콘크리트보의 휨 실험

유사연성거동을 나타내는 적절한 섬유 혼합비를 결정하기 위하여 무근콘크리트보 (90(b)×100(h)×800(L))를 제작하고, CF, GF 및 CF + GF로 보강한 후 4점 재하 실험을 수행하였다. Table 2에 나타난 실험 변수 및 결과에서, 주요 실험 변수는 GF의 CF에 대한 체적비 (4.88, 6.80, 9.10) 및 접착제의 섬유 (CF+GF)에 대한 체적비 (1.0, 1.5, 2.0)였다. 섬유의 인장파괴를 유도하기 위하여 균형비 이

의 섬유를 사용하였다. 또한 두 가지 섬유 (CF+GF)를 혼용한 보 (H, alt.1-alt.3)의 보강 효과에 대한 비교의 목적으로, 각각 CF 및 GF만을 사용하여 보강한 무근콘크리트보를 실험 (C-alt.1-C-alt.3, G-alt.1-G-alt.3)하였다.

4.2 하이브리드 시트

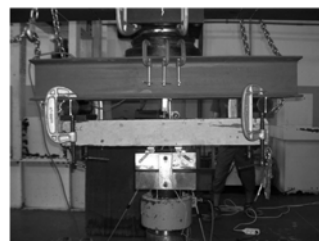
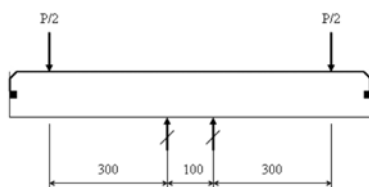
이론적 연구 및 섬유 보강 무근콘크리트보 휨 실험의 결과에 따라서 섬유혼합비 (GF : CF = 8.8 : 1)를 결정하였고, 일측 하이브리드 섬유 (hybrid FRP, 이하 HF) 시트를 제작하였다. HF 시트의 기계적 물성을 결정하기 위한 인장시험은 [참고문헌 8]에 따라서 수행하였다.

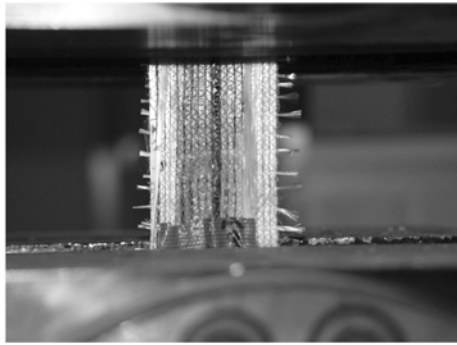
Fig. 3에 UTM을 사용한 인장 시험 및 시험 결과 응력-변형률 곡선을 나타내었다. Fig. 3 (a)는 인장 시험 진행 상황으로서 HF 시트가 중앙부 CF 스트랜드와 측면에 대칭으로 배치된 다수의 GF 스트랜드로 구성되었음을 나타내고 있다. Fig. 3 (b)에서 인장을 받는 HF 시트의 초기 강성이 일정히 유지되다가, 극한변형률이 작은 CF가 먼저 파단한 후 시트의 인장강도 감소와 함께 변형률이 증가하지만, 이것이 최종파괴로 바로 이어지지 않고 더 높은 응력 및 변형률 하에서 GF가 순차적으로 파단하는

Table 2 Test variables and test results: flexural test of plain concrete beams strengthened using hybridized fibers

Specimen index	Fibers ¹	CF (mm ²)	GF (mm ²)	GF / CF by vol.	Epoxy / fibers by vol.	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	Δ_{center} at P_{max} (mm)	Failure mode
H-alt.1	G+C	3.55	17.3	4.88	2.0	5.58	15.1	18.0	Brittle (fiber rupture)
C-alt.1	C	3.55	-	-	2.0	4.92	5.76	18.0	Ditto
G-alt.1	G	-	17.3	-	2.0	5.4	12.4	21.8	Ditto
H-alt.2	G+C	5.33	26.0	4.88	2.0	7.38	16.2	19.0	Brittle (conc. comp.)
C-alt.2	C	5.33	-	-	2.0	4.38	8.70	19.4	Brittle (fiber rupture)
G-alt.2	G	-	26.0	-	2.0	5.46	21.4	28.3	Brittle (fiber rupture)
H-alt.3(1)	C+G	2.66	18.2	6.80	1.5	4.68	14.9	21.9	Pseudo-ductile
C-alt.3(1)	C	2.66	-	-	1.5	3.72	3.72	11.6	Brittle (fiber rupture)
G-alt.3(1)	G	-	18.2	-	1.5	5.22	10.6	15.8	Brittle (fiber rupture)
H-alt.3(2)	G+C	2.66	18.2	6.80	1.5	4.00	14.3	17.8	Pseudo-ductile
C-alt.3(2)	C	2.66	-	-	1.5	3.66	3.24	13.5	Brittle (fiber rupture)
G-alt.3(2)	G	-	18.2	-	1.5	4.68	13.1	22.7	Brittle (fiber rupture)
H-alt.4(1)	G+C	1.78	12.1	6.80	1.5	5.82	11.2	20.6	Pseudo-ductile fail.
H-alt.4(2)	G+C	1.78	12.1	6.80	1.0	3.30	9.06	17.9	Pseudo-ductile fail.
H-alt.5(1)	G+C	1.33	12.1	9.10	1.5	4.38	7.32	14.2	Pseudo-ductile fail.
H-alt.5(2)	G+C	1.33	12.1	9.10	1.0	4.38	8.46	22.0	Pseudo-ductile fail.

Note) 1. C + G = CF is first applied followed by GF, G + C = GF is first applied followed by CF, C = CF only, G = GF only;
 2. f_{ck} = 26.0 MPa; 3. Test setup:





(a) Tensile test in progress

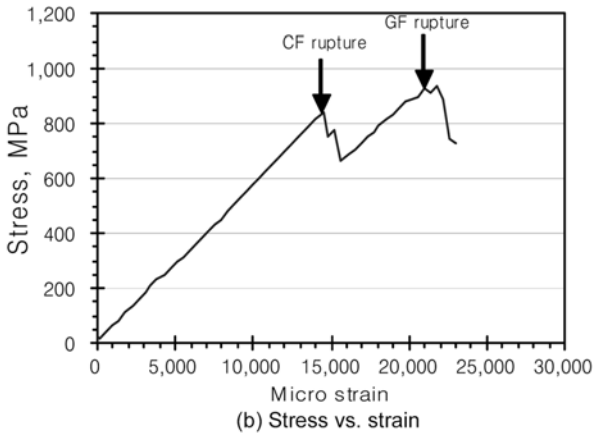


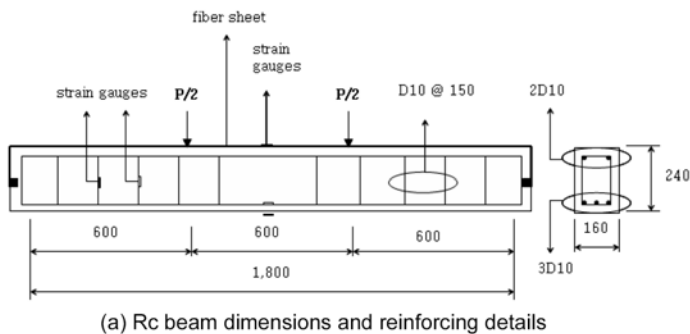
Fig. 3 Tensile test: hybrid FRP sheet

유사연성거동을 확인할 수 있다.

4.3 HF 시트로 보강한 RC 보의 휨 실험

제작된 HF 시트의 보강 효과를 결정하기 위하여 수행한 RC 보의 상세와 실험 setup을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)와 같이 보 크기는 160(b)×240(h)×2,000(L) mm이고, 인장철근 및 압축철근은 각각 3-D10 및 2-D10이다. 보의 인장면에 시트와 에폭시 접착제를 사용하여 보강한 후 Fig. 4 (b)와 같이 4점 재하 방법으로 휨 실험을 수행하였다. 실험 중 시트의 단부에서 시트가 콘크리트로부터 박리되는 현상을 방지하기 위하여 시트 단부를 Fig. 4 (a)와 같이 특수하게 고정하였다.

Table 3에 HF 시트로 보강된 철근콘크리트 보의 실험 변수 및 실험 결과를 요약하여 나타내었다. Table 3에 나



(a) Rc beam dimensions and reinforcing details

타낸 총 5개의 보는 모두 과소보강보이다. 이 중에서 1개는 무보강 보 (RC), 3개는 HF 시트 보강 보 (1겹, 2겹 또는 3겹 각 1개, 즉 HF-1P, -2P, -3P), 1개는 CF 스트랜드 보강 보 (CF)이다. 무보강 보 및 CF 스트랜드로 보강된 보는 HF 시트로 보강된 보와의 휨거동을 비교하기 위하여 제작하였다.

보 중앙부 및 단부에 3개의 LVDT, 인장 주철근, 보 중앙의 압축 및 인장 콘크리트 면 및 전단보강근에 스트레인게이지를 각각 설치하여 변위 및 변형률을 측정하였다. 힘의 측정에는 유압지시계를 사용하였고 데이터로거를 이용 측정된 데이터를 저장하였다.

5. 실험 결과

5.1 무근콘크리트 보 실험

유사연성거동을 나타낼 수 있는 섬유비율의 적정 혼합비를 결정하기 위하여 수행한 CF, GF 및 CF+GF로 보강한 무근콘크리트보의 휨 실험 결과를 Table 2 및 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a)의 하중-변위 곡선에서 첫 번째 peak는 콘크리트 균열 단계를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 C-alt.1, G-alt.1은 각각 H-alt.1에 사용한 것과 동일한 양의 CF 또는 GF만을 사용한 보이고, H-alt.1은 두 가지 섬유비를 함께 사용한 보이다. Fig. 5(a)에서 CF 파단 시점은 C-alt.1 및 H-alt.1에서 동일하고, GF 파단 시점은 G-alt.1 및 H-alt.1에서 역시 동일한 것을 알 수 있다. H-alt.1의 섬유비는 GF:CF=4.88:1 (Table 2 참고)이고, 이는 전술한 이론적인 하이브리드 효과가 나타나기 시작하는 비율 4.62:1과 유사하다. Fig. 5(a)에서 CF 선과 단 후 순차적으로 GF가 파단하지만 최대강도는 CF 파단 시에 이미 도달한 것을 알 수 있다.

Table 2의 H-alt.2는 H-alt.1에 비하여 섬유량을 150%로 증가시킨 것이다. H-alt.2는 과도한 보강으로 인한 콘크리트 압축파괴로 인해 최종 파괴되었다. Table 2의 H-alt.3(1)과 H-alt.3(2)는 섬유비 보강 순서를 변경한 것이다 (H-alt.3(1)은 CF 선 부착 후 GF 부착, 반대로 H-alt.3(2)는 GF 선 부착 후 CF 부착). 실험 결과 2개 보의 하중-변위 거동은 유사하였다.



(b) Flexural test in progress

Fig. 4 Flexural test of RC beams strengthened using hybrid FRP sheet

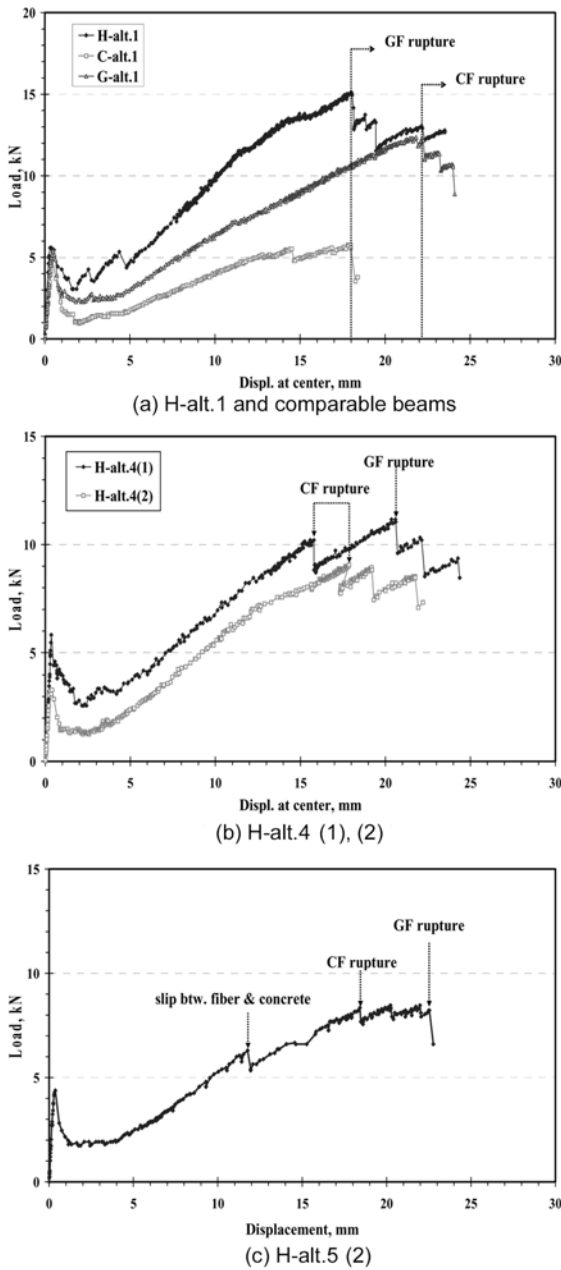


Fig. 5 Flexural test results of plain concrete beams strengthened using fibers

Fig. 5(b)는 H-alt.4의 2개 보 하중-변위 곡선이고, GF : CF = 6.8 : 1로서, 이론적인 하이브리드 효과가 나타나기 시작하는 비율 4.6 : 1을 상회한다. Fig. 5(b)의 2개 보 모두 CF 선 파단 후 하중이 유지 또는 증가하고 이후 GF 파단에 의하여 최종적으로 파괴됨을 알 수 있다.

Fig. 5(c)에 나타낸 GF : CF = 9.1 : 1의 H-alt.5(2) 보의 하중-변위 거동은 Fig. 5(b)와 유사하다. 그러므로 CF:GF 혼합비 6.8 : 1 이상에서는 일단 유사연성거동이 나타날 수 있는 것으로 판단하였다. Fig. 5(c)에서 첫 번째 CF 파단 이전에 발생한 콘크리트와 FRP 재료 간 슬립은 중앙부 휨균열 부근에서 발생하였다. 이 경우, 슬립은 무근콘크리트에 발생한 휨균열 좌우의 레벨 차이에 의하여 발생하였고, 일반적인 외부 시트 보강 휨 부재에서, 콘크리트-시트 간 슬립으로 인하여 보 이론에 의한 휨 해석의 변형률 적합 조건이 완전히 만족되지 않음을 보여준다¹⁾.

5.2 RC 보 실험

5.2.1 하중-변위 거동

Table 3 및 Fig. 6에 철근콘크리트보의 휨 실험 결과를 나타내었다. Fig. 6(a)는 무보강 RC 보, CF 보강 보 및 HF 보강 보의 하중-변위 곡선이다. Fig. 6(a) 및 Table 3에서 무보강 보 (RC)는 79.6kN에서 주철근의 항복하고, 최대하중 90.9kN에 다다른 후 최종적으로 86.3kN에서 37.0mm의 중앙부 처짐을 보이며 휨파괴되었다. CF로 보강한 보 (CF)는 91.9kN에서 주철근 항복 후, 변위 18.1mm에서 최대하중 103kN에 다다른 후, 24.1mm 변위 이후 내하 성능이 급격히 감소하여 무보강 보와 유사한 내하 성능을 보였다. CF 보는 최종적으로 83.3kN에서 32.8mm의 변위를 보이며 휨파괴되었다. 시트에 설치한 스트레인게이지로부터 결정한 데이터는 보의 중앙부 변위가 24.1mm인 시점의 섬유 인장변형률이 0.76%이고, 이후 파단하였음을 보여주었다. HF 시트 1겹으로 보강한 보 (HF-1P)는 88.9kN에서 주철근이 항복하고, 최대하중 110kN에 다다른 후 최종 파괴 시까지 내하 성능의 급

Table 3 Flexural test variables and test results: RC beams strengthened using hybrid FRP sheet

Beam index	Strengthening method	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_{max} (kN)	Δ at P_{max} (mm)	P_{fail} (kN)	Δ_{fail} (mm)	Ductility ³ index	Strains at failure (%)			Failure mode ⁴
									ϵ_{steel}	ϵ_c	ϵ_{frp}	
RC	-	79.6	7.48	90.9	34.7	86.3	37.0	5.0	> 0.78	0.447	-	Flex.
HF-1P	HF 1 ply ¹	88.9	7.70	110	29.4	95.7	36.8	4.8	> 1.23	0.489	-	Flex./HF
HF-2P	HF 2 plies	96.5	8.13	126	26.1	106	33.4	4.1	> 0.90	0.392	1.19	HF
HF-3P	HF 3 plies	-	-	151	26.7	148	30.9	-	> 1.10	0.258	0.97	Anchorage
CF	CF ²	91.9	7.46	103	18.1	83.3	32.8	4.4	> 2.17	0.313	0.76	CF

Note) 1. HF 1 ply: 2 CF 48K + 36GF 2200tex, i.e. CF = 3.55 mm², GF = 31.2 mm²

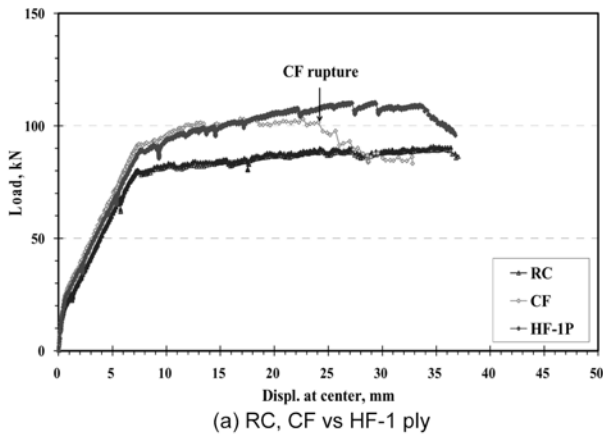
2. CF : 36CF 12K : CF = 36 × 0.444 = 16.0 mm²

3. Ductility index = Δ_{fail} / Δ_y

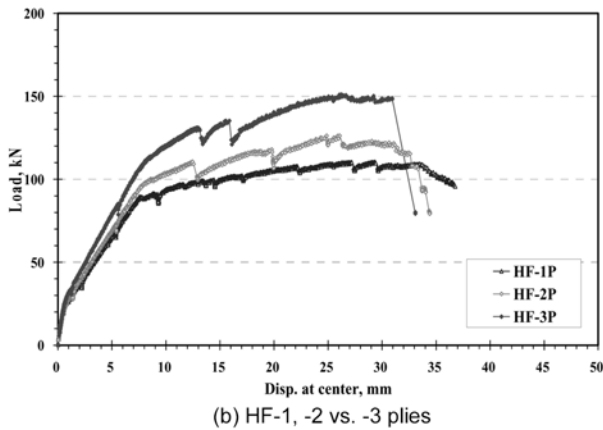
4. Failure mode: flex. = flexural failure, flex./HF = flexural failure and fiber rupture, HF = fiber rupture, anchorage = anchorage failure, CF = CF rupture

5. Epoxy : fiber = 1 : 1 by vol. in all strengthened beams

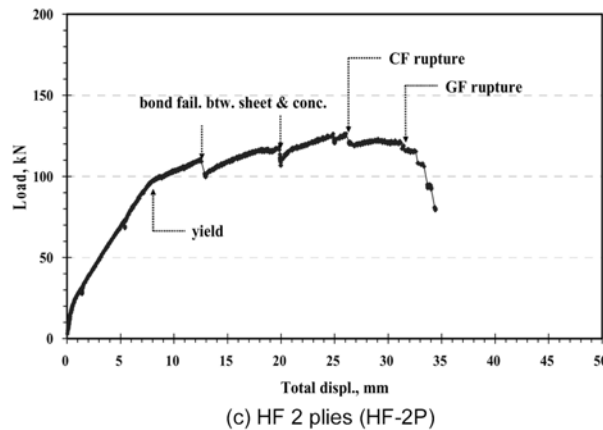
6. f_{ck} = 29.5 MPa



(a) RC, CF vs HF-1 ply



(b) HF-1, -2 vs. -3 plies



(c) HF 2 plies (HF-2P)

Fig. 6 Load vs. displacement: RC beams strengthened using HF or CF

격한 감소 없이 95.7 kN에서 36.8 mm의 중앙부 처짐을 보이며 휨파괴되었다.

Table 3 및 Fig. 6(a)에서 CF 스트랜드로 보강한 보 (CF)의 내하 성능은 무보강 보에 비하여 13.3% 증가하지만, 최대하중 이후에 내하성능이 감소하고, 연성비 ($\mu = 4.4$, ductility ratio)도 무보강 보 ($\mu = 5.0$)에 비하여 상대적으로 낮다. 반면에 HF 시트 1겹으로 보강한 보 (HF-1P)는 무보강 보에 비하여 내하 성능이 21.0% 증가하고, 최대하중 이후에도 내하 성능이 감소하지 않으며, 연성비 ($\mu = 4.8$) 역시 무보강 보와 유사함을 알 수 있다.

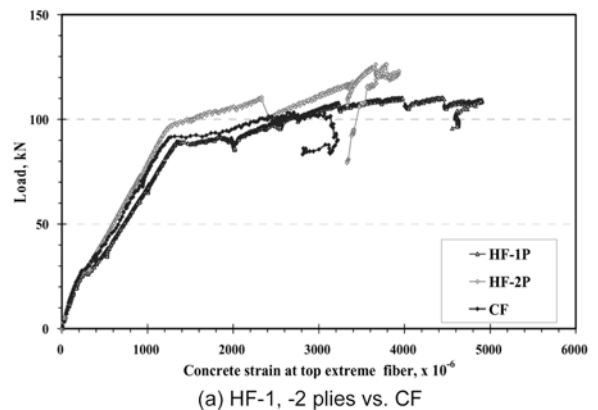
Fig. 6(b)에 HF 시트 1겹, 2겹 및 3겹으로 보강한 3개 보의 하중-변위 곡선을 나타내었다. Table 3 및 Fig. 6(b)에서 시트 1겹으로 보강한 보 (HF-1P)에 비하여 시트 2

겹 (HF-2P) 및 3겹 (HF-3P)으로 보강한 보의 내하 성능은 증가하였다. 즉, 시트 2겹 및 3겹 보강 보는 무보강 보에 비하여 최대하중이 각각 38.6% 및 66.1% 증가하였다. 반면에 시트 3겹으로 보강한 보의 하중-변위 곡선은 항복점이 명확하지 않고, 또한 보강 겹 수가 증가할수록 최종파괴 시 변위가 감소하는 등 연성이 감소하였다.

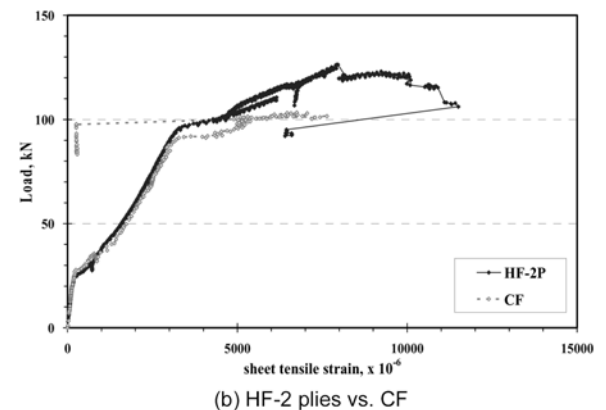
Fig. 6(c)에 시트 2겹으로 보강한 보의 하중-변위 곡선을 별도로 나타내었다. Fig. 6(c)에서 HF-2P의 항복점 이후 두 차례의 하중 변화는 전술한 바와 같이 휨균열 좌우에서 시트와 콘크리트 간 부분적인 부착 파괴 (슬립)에 의해 나타난 것이다. HF-2P의 최대하중은 CF의 인장파괴 시점과 일치하지만, 이후 GF에 의한 제한적인 추가 저항을 보인 것으로 판단된다. 또한, 시트와 콘크리트 간 슬립은 하이브리드 시트의 겹 수가 증가하면서 (시트 두께의 증가) 더불어 증가하는 현상을 보였다. 이러한 실험 결과는 특히 하이브리드 시트 3겹 이상의 적용이 연성거동, 합성거동 등의 면에서 불리함을 나타낸 것으로 사료된다.

5.2.2 균열 및 파괴 모드

과소 보강된 RC 보는 콘크리트 압축파괴로 휨파괴되었다. Fig. 7(a), (b)에 3개 보강 보에서 각각 측정된 콘크리트 압축연단 및 FRP의 변형률, Fig. 8에 실험 종료 후 보 측면의 균열 상황을 나타내었다. Table 3 및 Fig. 7(a)에서 극한단계의 콘크리트 압축변형률은 HF-1P > HF-



(a) HF-1, -2 plies vs. CF



(b) HF-2 plies vs. CF

Fig. 7 Strains developed in concrete top extreme fiber and sheet: RC beams strengthened using HF or CF

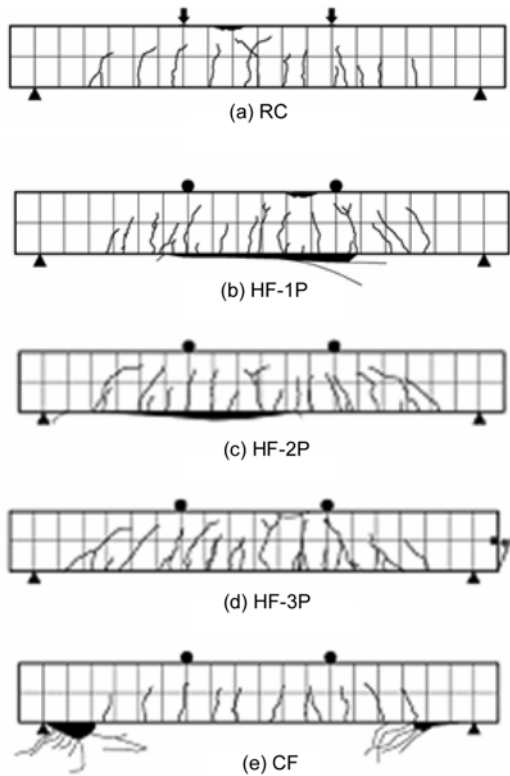


Fig. 8 Cracks developed on beams at ultimate stage

2P > CF 순이고, Fig. 7(b)에서 CF의 인장변형률 역시 HF-2P의 인장변형률보다 작다.

Table 3에 나타낸 콘크리트 압축변형률에 의하여, HF-1P 및 HF-2P는 극한단계에서 각각 콘크리트 압축파괴 도달 및 콘크리트 압축파괴에 임박하였고, CF 보의 경우는 그렇지 못한 것으로 판단된다. Fig. 8에서도 CF 보의 균열의 수, 중립축 위치 등으로 판단할 때 콘크리트 압축파괴에 이르기 이전 섬유파단으로 인하여 최종적으로 파괴되었다고 사료된다. Table 3 및 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 HF 시트 3겹 보강 (HF-3P)의 경우는 시트 단부에서 정착부 파괴 (anchorage failure)가 발생하였다.

6. 보강 보의 단면 해석

6.1 하이브리드 시트의 재료적 물성

Fig. 9의 X축에 시트의 변형률, Y축에 하중을 표시한 HF의 이론적인 인장거동을 나타내었다. Fig. 9 및 식 (1)과 같이 HF 시트의 강성은 사용된 두 가지 섬유 (CF, GF) 각각의 탄성계수 및 체적 (면적)에 비례하고, 첫 번째 파단은 시트 변형률이 CF의 극한변형률 ϵ_{CF} 에 도달할 때 발생한다.

이론적으로 첫 번째 파단 후 시트의 변형률이 갑자기 증가하는 유사 항복 현상 (Fig. 9의 점선 1-2 부분)을 보이고, 최종 파단은 시트 변형률이 GF 극한변형률 ϵ_{GF} 에 도달할 때 발생한다.

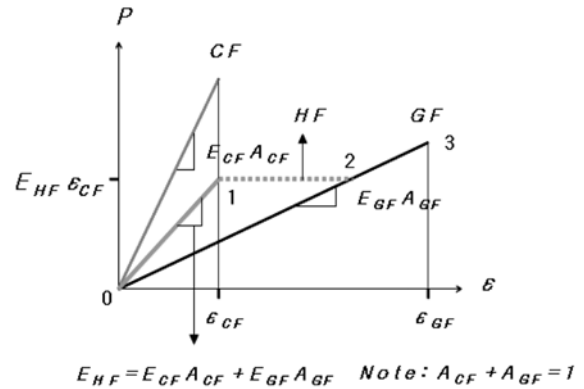


Fig. 9 Theoretical load-vs.-strain behavior of hybrid FRP sheet in tension

$$E_{HF} = E_{CF} A_{CF} + E_{GF} A_{GF} \quad (1)$$

여기서 E_{HF} , E_{CF} , E_{GF} 는 각각 HF, CF, GF의 탄성계수이고, A_{CF} 및 A_{GF} 는 각각 CF 및 GF의 전체 단위 섬유량 (CF + GF = 1)에 대한 체적비 (면적비)이다.

Fig. 9에서 HF의 인장거동은 [0-1-2-3]으로 정의되고, 각 점(1, 2, 3)의 좌표는 다음 식 (2)부터 (4)와 같다.

$$1: X_1 = \epsilon_{CF}; Y_1 = E_{HF} \epsilon_{CF} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 2: X_2 &= E_{HF} \epsilon_{CF} / E_{GF} A_{GF} \\ &= \epsilon_{CF} (E_{CF} A_{CF} + E_{GF} A_{GF}) / E_{GF} A_{GF} \\ &= \epsilon_{CF} (1 + E_{CF} A_{CF} / E_{GF} A_{GF}); Y_2 \\ &= E_{HF} \epsilon_{CF} \end{aligned} \quad (3)$$

$$3: X_3 = \epsilon_{GF}; Y_3 = E_{GF} A_{GF} \epsilon_{GF} \quad (4)$$

여기서 E_{CF} , E_{GF} 는 각각 CF, GF 스트랜드의 탄성계수, A_{CF} , A_{GF} 는 각 섬유의 단위 섬유량 (CF + GF = 1)에 대한 면적, ϵ_{CF} , ϵ_{GF} 는 각각 CF, GF 스트랜드의 극한변형률이다.

Table 4에 FRP 스트랜드의 인장 시험에서 측정된 결과 (Table 1 참고)와 식 (1)부터 (4)를 사용하여 결정된 HF의 기계적 물성을 표시하였다.

6.2 단면 해석

Fig. 9 및 Table 4에 나타낸 CF 및 HF의 재료적 물성을 사용하여 보강된 보의 단면 해석이 가능하다. 단면 해석은 [참고문헌 1, 5~7]을 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 인장철근, 압축철근 및 시트를 모두 해석에 고려

Table 4 Mech. properties of HF sheet

Item	CF	GF	HF
Ult. strength, f_{fpu} (MPa)	1,280	792	711
Elastic modulus, E_{fip} (GPa)	114	45.0	53.2
Ultimate strain, ϵ_{fpu} (%)	1.12	1.76	1.76
Pseudo-yield strength (MPa)	-	-	601
Pseudo-yield strain (%)	-	-	1.13
Area, A_{fip} (mm ²)	0.102	0.898	1.0

한 [참고문헌 7]을 따라서 수행하였다. 보 단면의 응력-변형률을 나타낸 Fig. 10에서 α_1 , β_1 은 각각 등가응력블럭의 형상에 관한 계수이고 식 (5),(6)과 같다. 중립축의 위치 c 는 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015f'_c \geq 0.67 \quad (5)$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025f'_c \geq 0.67 \quad (6)$$

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 b c^2 + [\phi_s E_s \varepsilon_{cu} (A_s + A'_s) + \phi_{frp} E_{frp} A_{frp} (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{bi})] c - [\phi_s E_s \varepsilon_{cu} (A_s d + A'_s d') + \phi_{frp} E_{frp} A_{frp} \varepsilon_{cu} h] = 0 \quad (7)$$

여기서

- A_{frp} = FRP 단면적 (mm²)
- A_s = 인장철근 단면적 (mm²)
- A'_s = 압축철근 단면적 (mm²)
- b = 보단면의 폭 (mm)
- h = 보단면의 높이 (mm)
- d = 인장철근의 유효깊이 (mm)
- d' = 압축철근의 유효깊이 (mm)
- E_{frp} = FRP 탄성계수 (MPa)
- E_s = 철근 탄성계수 (MPa)
- f'_c = 콘크리트 설계기준강도 (MPa)
- ε_{bi} = 보 인장연단의 초기 변형률 (보강 전)
- ε_{cu} = 콘크리트 극한변형률, 0.0035
- ϕ_c = 콘크리트 저항계수, 0.6
- ϕ_s = 철근 저항계수, 0.85
- ϕ_{frp} = FRP 저항계수, CF:0.7, GF:0.6

FRP 두께를 아주 작다고 가정하면, 압축철근, 인장철근 및 인장연단 (FRP)에서의 변형률은 각각 식 (8)~(10)과 같다.

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_{si} + \varepsilon'_{sL} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{si} + \varepsilon_{sL} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \quad (10)$$

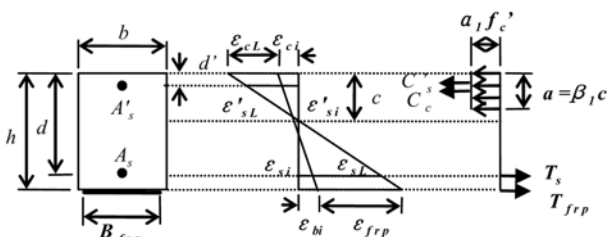


Fig. 10 Stress-vs.-strain distribution of a strengthened beam section⁸⁾

여기서 ε'_{si} , ε_{si} 는 각각 압축 및 인장철근의 보강 전 변형률, ε'_{sL} , ε_{sL} 는 각각 극한상태에서 압축 및 인장철근의 추가 변형률이다.

FRP 파단으로 최종 파괴가 발생한 경우의 보 단면의 저항강도 $M_r(M_{ult})$ 는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$M_r = \phi_s f_s A_s \left(d - \frac{a}{2} \right) - \phi_s f'_s A'_s \left(d' - \frac{a}{2} \right) + \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp} A_{frp} \left(h - \frac{a}{2} \right) \quad (11)$$

식 (7)~(11)에서 본 연구의 보강 전 보 변형은 없으므로 ε_{bi} , ε'_{si} , ε_{si} 항을 제외하고 보 단면의 저항모멘트를 구한 결과를 실험 결과와 비교하여 Table 5에 나타내었다. Table 5의 해석 결과는 Table 4의 CF 탄성계수 (114 GPa) 및 극한변형률 (1.13%), HF 탄성계수 (53.2 GPa) 및 유사항복점 (Fig. 9의 [1])에 해당하는 극한변형률 (1.13%)을 사용한 결과이다.

Table 5에서 단면 해석의 결과는 실험 결과에 비하여 모두 상당히 보수적인 것을 알 수 있다. 즉, M_{test}/M_r 는 176~192%이다.

Table 5에서, HF-1P의 경우, 철근 (M_{steel}) 및 FRP (M_{frp})의 저항강도 (M_r)에 대한 기여는 각각 14.4 kNm 및 2.80 kNm 이므로, HF 1겹 보강으로 인하여 19.4%의 보강 효과를 나타내고 있다. HF-2P의 M_{steel} 및 M_{frp} 는 각각 14.2 kNm 및 5.55 kNm이므로, 약 39%의 보강 효과를 나타내고 있다. CF의 경우는 M_{steel} 및 M_{frp} 가 각각 14.4 kNm, 3.20 kNm이며 22.2%의 보강 효과를 나타내고 있으므로, HF 1겹 보강과 유사하고 HF 2겹 보강보다 낮다 (각 보강의 경우에 소요된 FRP 량은 Table 5의 'Note'에 나타내었다).

위 실험 및 해석의 비교 결과는 (1) [참고문헌 7]과 같이 시트를 사용한 RC 보의 휨 보강에 관한 기존 설계식을 하이브리드 시트 보강에도 적용할 수 있고, (2) HF 1겹 또는 2겹을 사용하면 CF를 사용한 보강과 동등 이상 경제적이면서 연성 및 강도면에서 우수한 보강 효과를 얻을 수 있음을 나타내고 있다.

Table 5 Section analysis vs. test results

Beam index	$M_{test}^{(1)}$ (kNm)	$M_{anal.}^{(2)}$ (kNm)			(1)/(2) (%)
		M_r	$M_{steel}^{(4)}$	$M_{frp}^{(4)}$	
HF-1P	33.0	17.2	14.4	2.80	192
HF-2P	37.8	19.8	14.2	5.55	191
CF ⁽³⁾	30.9	17.6	14.4	3.20	176

Note) (1) M_{max} determined from test

(2) M_{ult} (M_r) determined from analysis using procedure suggested in Ref. (7)

(3) Amount of fibers HF-1P : CF = 3.55 mm², GF = 31.2 mm²
HF-2P:CF = 7.10 mm², GF = 62.4 mm² CF:CF = 16.0 mm²
GF = none

(4) $M_r = M_{steel} + M_{frp}$, while M_{steel} or M_{frp} represents contributions of steel reinforcement and FRP materials respectively, to total resisting moment M_r

본 연구에서는 우리나라에서 비교적 쉽게 적용이 가능한 대표적인 두 가지 섬유 (고강도 CF, E-glass GF)를 사용하여 하이브리드 시트의 배합을 시도하였다. 적용 섬유의 종류 및 배합에 따라서 하이브리드 시트의 기계적 물성은 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 위의 두 가지 섬유로 구성된 하이브리드 시트를 제작하고, 이를 이용한 철근콘크리트보를 보강하였고, 보강 효과를 검증하기 위한 일련의 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 사용된 GF:CF 체적비가 4.62 : 1을 초과하는 경우, 이론적인 하이브리드 효과 (CF 선 파단 후, 더 높은 응력 및 변형률에서 순차적으로 GF 최종 파단)가 나타날 수 있다.
- 2) 이론적 연구 및 무근콘크리트보의 보강 실험을 근거로 경제성을 고려하여 하이브리드 시트를 GF : CF = 8.8 : 1 (체적비)로 제작하였으며, 시트의 인장 시험 결과 유사연성거동을 확인하였다.
- 3) 하이브리드 시트를 사용 철근콘크리트보를 보강한 후 휨 실험을 수행하였다. 고가의 CF 사용량 면에서 차이 (Table 5, CF 실험체 보강량 : CF = 16 mm², HF-1P 보강량 : CF = 3.55 mm²)가 있음에도 불구하고, 하이브리드 시트 1겹을 사용 보강한 보의 휨강도 및 연성이 CF 만을 사용 보강한 보에 비하여 우수하였다. 하이브리드 시트 2겹 및 3겹을 사용 보강한 보의 휨강도는 시트 1겹 보강에 비하여 증가하였으나, 연성은 감소하였다.
- 4) 하이브리드 시트의 인장거동에 대하여 항복강도 및 항복변형률 (유사항복점), 항복고원, 인장강도 및 극한변형률을 이론적으로 정의하였다.
- 5) 탄소섬유 등 기존 한 가지 섬유를 사용한 보강에 대한 기존 설계식을 하이브리드 시트를 사용한 보

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 협동 연구 (KRF-2005-042-103561)로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02)*, American Concrete Institute, 2002, 45pp.
2. Philips, L. N., "The Hybrid Effect-Does it Exist?", *Composites*, 1976, Vol.7, pp.7~8.
3. Manders, P. W. and Bader, M. G., "The Strength of Hybrid Glass/Carbon Fibre Composites: Part 1 - Failure Strain Enhancement and Failure Mode", *Journal of Materials Science*, Vol.16, 1981, pp.2233~2245.
4. Grace, N. F., Abdel-Sayed, G., and Ragheb, W. F., "Strengthening of Concrete Beams Using Innovative Ductile Fiber-Reinforced Polymer Fabric", *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.692~700.
5. AIJ, *Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete*, Architectural Institute of Japan, 2001, 505pp. (in Japanese).
6. JSCE, "Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials", Japanese Society of Civil Engineers, *Concrete Engineering Series 23*, 1997.
7. ISIS Canada, *Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*, Design Manual, No.4, Sep. 2001, pp.4.1~4.25/
8. CAN/CSA S806-02, *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002, pp.23~32.

요 약 철근콘크리트 휨 부재 보강에 자주 사용하는 탄소섬유 대신 탄소섬유 및 유리섬유 두 가지를 동시에 사용, 보강된 콘크리트 휨 부재의 강도 및 연성을 증진시키는 방안을 연구하였다. 두 가지 섬유의 혼합비가 적절한 경우, 탄소섬유가 선파단하고 보다 큰 변형 및 응력에서 유리섬유가 순차적으로 파단하는 소위 유사연성거동을 보일 수 있다. 본 연구에 사용된 두 가지 섬유가 유사연성거동을 보일 수 있는 이론적인 혼합비는 4.62 : 1 (체적비)로 나타났다. 두 가지 섬유로 보강한 무근콘크리트보의 휨 실험에서 탄소섬유 : 유리섬유 = 6.8 : 1 이상인 경우 유사연성거동이 나타남을 확인하였다. 체적비 8.8 : 1의 유리섬유-탄소섬유 하이브리드 시트를 제작하고, 철근콘크리트보를 보강한 후 휨 실험을 수행하였다. 하이브리드 시트 1겹 및 2겹으로 보강한 보에서 모두 무보강 보에 비하여 강도가 증진하는 반면에, 연성이 유지되는 결과를 확인하였다. 하이브리드 시트를 사용하면 탄소섬유를 사용한 보강에 비하여 보다 경제적이면서 탄소섬유와 동등 이상의 강도 및 보다 우수한 연성을 나타내었다. 하이브리드 시트를 사용한 휨 부재 보강에서 한 가지 섬유만을 사용하는 기존의 설계 방법을 적용하여도 보수적인 설계가 가능하였다.

핵심용어 : 하이브리드, 유사연성, 섬유보강폴리머, 휨보강, FRP 시트