



철근콘크리트 부재 보강용 유사연성 FRP 하이브리드 시트의 부착 특성

윤혜선¹⁾ · 이정미¹⁾ · 이진용²⁾ · 최동욱³⁾ · 김길희^{1)*}

¹⁾공주대학교 건축공학부 ²⁾(주)케어콘 ³⁾한경대학교 건축학부

Bond Capacity of Pseudo-Ductile FRP Hybrid Sheet to Strengthen RC Members

Hye-Sun Yoon,¹⁾ Jung-Mi Lee,¹⁾ Chin-Yong Lee,²⁾ Dong-Uk Choi,³⁾ and Kil-Hee Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

²⁾CareCon, Co., Seoul 134-030, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-240, Korea

ABSTRACT 12 concrete blocks, on which hybrid fibrous sheets (carbon fiber and glass fiber) had been bonded, were subjected to tensile load in order to estimate properties of the bonded interface. the sheet length was varied by 100 mm, 200 mm and 400 mm. It was found that more than 150 mm bond length is required to achieve the maximum bearing capacity of the interface. In this study, maximum bond stress $\tau_{F,max}$, ultimate slip S_{FU} of the interface were estimated $\tau_{F,max}=3.0$ MPa and $S_{FU}=0.175$ mm, respectively.

Keywords : hybrid, FRP sheet, bond strength, slip

1. 서 론

철근콘크리트구조의 보수, 보강을 위해 1990년대 이전에는 강판을 주로 사용하였으나 자중의 증가와 부식이라는 문제점으로 인해 활용도가 감소하였다. 그 이후 이러한 문제점을 보강하기 위해서 강판보다 고가이지만 자중이 작으며 내구성이 뛰어난 섬유 보강 폴리머 (fiber reinforced polymer, 이하 FRP) 재료를 개발하여, 사용하기 시작하였다.

FRP가, 사용된 초기에는 탄소 섬유 (carbon fiber, 이하 CF), 아라미드 섬유 (aramid fiber, 이하 AF), 유리 섬유 (glass fiber, 이하 GF)등의 단일 섬유로서 시트를 제작하여 구조물을 보강하였다. CF는 내구성이 우수하고, 높은 강성 및 강도를 가지므로 보강효과가 뛰어난 반면 고가이며, 선형 거동으로 인한 취성파괴가 문제점으로 지적되어 왔다. GF 역시 선형 거동을 보이지만, CF에 비하여 경제적이고, 강재의 1/3-1/5 수준의 비교적 높은 탄성계수를 갖고 있으며, 인장강도는 CF 보다 작고 철근에 비하여 크다.

최근 서로 다른 성질을 갖는 하나 이상의 섬유를 조합하여 각각의 장점을 활용한 하이브리드 섬유를 구성하여 인장을 받는 경우, 극한변형률이 작은 순서로 순차적으

로 파단되도록 하여 한 가지 섬유가 파단된 후에는 남은 섬유의 강성 및 극한변형률이 인장성능을 결정하게 하여 이를 콘크리트구조물의 보강에의 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2,3)} 이는 탄성계수, 인장강도 및 극한변형률이 서로 다른 두 가지 이상의 섬유를 적절히 혼합하여 마치 철근이 항복하는 것과 유사한 연성거동 (유사연성거동)을 나타내어 구조물 보강 시 취성파괴의 가능성이 작아지고, 또한 첫 번째 섬유의 파단 시 소음이 발생하도록 섬유를 적절히 배합하는 경우 사용자에게 임박한 파괴를 미리 경고하는 효과를 기대할 수 있다.

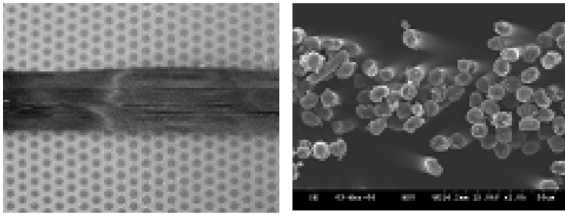
본 연구에서는 선행연구⁴⁾로 진행된 결과를 기초로 탄소 섬유와 유리 섬유를 체적 비율 1:8.8로 조합하여 강성이 높은 탄소 섬유가 인장에 저항한 후 먼저 파단되고 그 후 유리 섬유가 인장에 저항하여 높은 연성을 발휘하도록 한 하이브리드 시트를 제작하였다. 이 시트 길이를 100, 200, 400 mm로 각각 다르게 하여 시트 길이에 따른 콘크리트와 하이브리드 시트 계면에서의 부착 특성에 대해 고찰하였다.

2. 재료의 특성

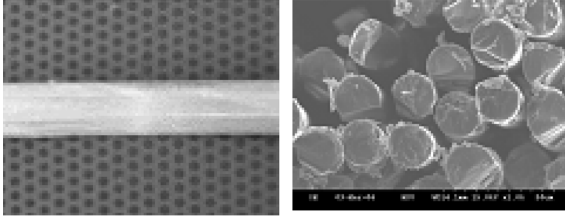
2.1 섬유

본 연구에 사용된 탄소와 유리섬유의 스트랜드 형태를 전자 현미경을 사용하여 단면을 촬영한 결과를 Fig. 1에

*Corresponding author E-mail : kimkh@kongju.ac.kr
Received August 4, 2008, Revised November 6, 2008,
Accepted January 19, 2009
©2009 by Korea Concrete Institute



(a) Carbon fiber (CF)



(b) Glass fiber (GF)

Fig. 1 Fiber strands

나타내었다.

이 촬영 결과 CF와 GF 필라멘트의 평균 직경은 각각 $7.23 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 및 $20.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 임을 확인할 수 있었다.

각 섬유들의 일정 길이의 무게와 비중 ($\rho_{CF}=1.80$, $\rho_{GF}=2.54$)을 측정 후 다음 식을 이용하여 산정한 단면적은 각각 0.444 mm^2 , 0.866 mm^2 였다.

$$A_f = W_f / (\rho \times L) \quad (1)$$

여기서, A_f : 시트의 단면적

W_f : 시트의 무게

ρ : 시트의 비중

L : 시트의 길이

각 섬유 (스트랜드 형상)의 인장력을 계측하기 위하여 용량 5 kN의 UTM으로 10회의 인장 실험을 실시하였고 실험값의 평균값을 섬유 제작사에 의해 제공된 필라멘트 역학적특성과 함께 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 확인할 수 있듯이 인장 실험의 결과가 섬유 제작사가 제공한 필라멘트 물성에 비해 큰 폭으로 감소한 것을 알 수 있다. CF 스트랜드 경우의 인장강도는 필라멘트의 26.2%였으며 탄성 계수는 49.4%였고, GF 스트랜드의 인장강도와 탄성 계수는 필라멘트의 각각 27.3%, 62.1%이다. 그 이유는 스트랜드를 구성한 모든 필라멘트

Table 1 Mechanical properties of fiber strand

	Carbon	Glass
Tensile strength f_{fu} (MPa) ¹	4,900	2,900
Tensile strength f_{fu} (MPa) ²	1,283	113.6
Elastic modulus E_f (GPa) ¹	230	72.4
Elastic modulus E_f (GPa) ²	113.6	44.99
f_{fu} (strand/test, %)	26.2	27.3
E_f (strand/test, %)	49.4	62.1

Note 1. Properties of individual fiber filament were provided by manufacturer

2. Test results of fiber strand properties determined in this study

의 긴장도가 일정하지 않으므로 스트랜드 파괴 시 필라멘트가 순차적으로 파괴되었기 때문이라고 사료된다. 이러한 섬유 필라멘트와 스트랜드 물성의 상이점은 참고문헌⁵⁾에서도 지적하고 있다.

2.2 철근 및 콘크리트

본 실험에서는 직접 배합 설계한 콘크리트를 이용하였으며 실린더를 제작하여 압축강도와 쪼갬 인장강도를 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 철근은 SD40 등급의 이형 철근을 사용하여 실험체를 제작하였다.

2.3 접착제

본 연구에서는 콘크리트 블록과 시트를 부착하기 위하여 에폭시 수지를 사용하였다.

25 (b) × 25 (h) × 240 (L) mm의 막대형 시편으로 인장강도 및 탄성 계수를 측정하였다. 측정 결과 접착제의 인장강도, 탄성 계수 및 극한 변형률은 각각 42.8 MPa, 2.19 GPa 및 1.97%이었다.

3. 하이브리드 시트

CF와 GF 두 가지 섬유를 혼용한 합성 재료의 인장강도 및 파괴 형태에 대하여 Manders 등³⁾은 Fig. 2를 제시하였다. Fig. 2에서 (A), (D) 점은 CF 및 GF의 체적비가 각각 100%인 경우의 강도를 나타내고 있다. 직선 (BD)는 CF가 극한 변형률에 도달한 시점에서 합성 재료의

Table 2 Summary of concrete strength

	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)
Cylinder1	21.6	9.76
Cylinder2	22.4	10.2
Cylinder3	22.7	9.08
Average	22.3	9.66

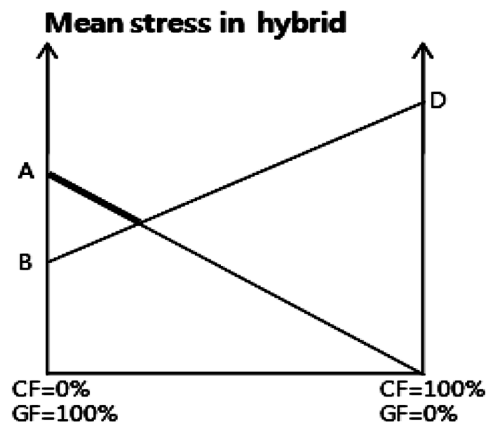


Fig. 2 Theoretical strength of CF-GF hybrid composites in tension

최대강도를 나타내고 있다. CF가 GF보다 낮은 파단변형률을 가지고 있기 때문에 첫 번째 파단은 CF가 극한 변형률에 도달할 때 발생하게 되므로 직선 (BD)과 같다.

첫 번째 파단 이후는 섬유 혼합 비율에 따라 크게 두 가지 경우로 나누어 고려할 수 있다. CF양이 GF에 비하여 상대적으로 크지 않은 경우에는 GF가 CF 파단 후에도 저항하며 CF의 양이 상대적으로 클 경우는 GF의 추가 저항은 나타나지 않는다. 즉, Fig. 2의 (C)점을 기점으로 좌측에서는 GF가 지배적인 영향을 보이게 되므로 직선 (AC)로 표현하며 우측은 CF가 지배적인 영향을 보이게 된다. 따라서 CF와 GF의 합성 재료는 선 (ACD)로 표시되고, 이중에서 하이브리드 거동 (순차적 CF-GF 파단)을 보이는 것은 굽은 선으로 표시된 (AC)구간이다.

본 연구에서는 Table 1의 섬유 강도로 Fig. 2의 (AC) 구간에 적용되도록 한 하이브리드 시트로서 섬유 보강 무근 콘크리트 보의 휨 실험을 선행연구로 수행하였으며⁴⁾ 그 결과로부터 섬유 혼합비 (CF : GF = 1 : 8.8)를 결정하여 Fig. 3과 같이 하이브리드 시트를 제작하였다.

4. 실험 계획

4.1 실험체 계획

FRP 하이브리드 시트와 콘크리트 계면 사이의 부착 강도를 구하기 위해 여러 가지 실험 방법이 제시되어 있으며 Fig. 4에 기존에 제시된 실험 방법을 나타내었다. 이중 (a)와 (e)는 간단하지만 실제와 같은 부착 거동을 보인다고 할 수 없으며, (b)는 FRP 하이브리드 시트와 콘크리트 계면에서 편심이 발생하기 쉬워서 정확한 데이터를 얻을 수 없다고 판단된다. (d)는 일방향 휨에 의한 안정된 파괴 거동을 보이게 되며, (c)는 실험체 제작이 간단하며 FRP 하이브리드 시트와 콘크리트 계면 사이의 안정된 박리 거동을 볼 수 있는 실험 방법이다.⁵⁾

콘크리트와 FRP 시트 사이의 응력 상태는 전단 응력이 발생하는 경우가 대부분이기 때문에 본 연구에서는 (b)와 (c) 중 위에서 서술한 각각의 실험 방법의 장단점을 고려하여 전단 응력이 발생하며 안정된 박리 거동을 보이는 (c)의, 이면 전단형 실험 방법을 채택하였다.

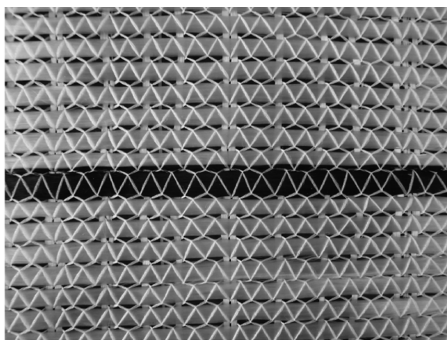


Fig. 3 Uni-axial hybrid fiber sheet

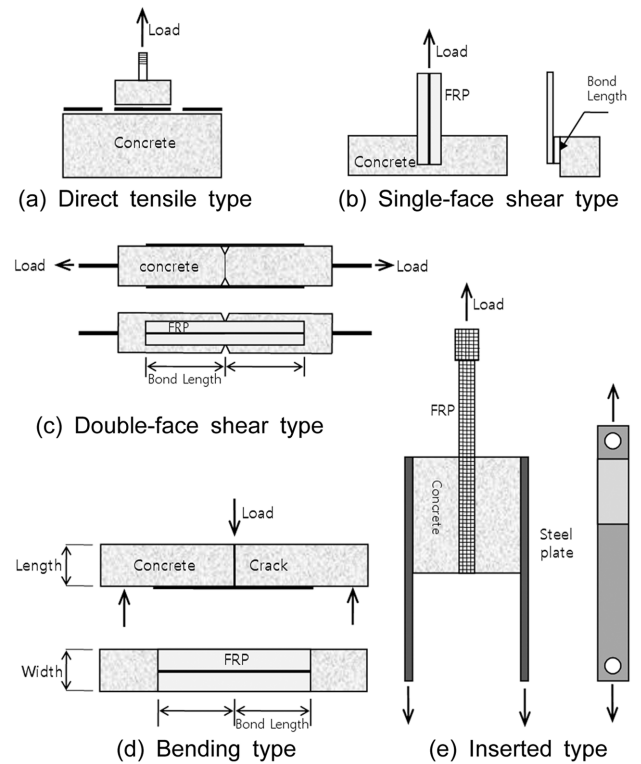


Fig. 4 Bond test methods of FRP hybrid sheet

이 방법을 적용한 실험체 상세를 Fig. 5에 나타내었으며, FRP 하이브리드 시트로 단면 100×100 (mm), 길이 800 (mm)인 콘크리트 블록을 보강하도록 하여 실험하였다. 콘크리트 블록에는 균열을 유도하기 위해서 Fig. 5에 나타난 것과 같이 홈 (grooves)을 실험체 중간에 설치하였으며 2개의 LVDT를 설치하여 균열에 의해 발생하는 변위를 측정하였고, 와이어 스트레인게이지를 이용하여 시트의 변형률을 계측하였다.

FRP 하이브리드 시트 (탄소섬유 : 유리섬유 = 1 : 8.8, 체적비)를 폭이 75 mm이고, 폭으로 길이가 100, 200, 400 mm인 3가지 종류를 각각 1겹, 2겹으로 콘크리트 블록에 접착시켜 부착 성능을 검토하였다.

4.2 실험체 제작

전단-부착 실험체는 다음과 같은 과정을 거쳐 제작되었다.

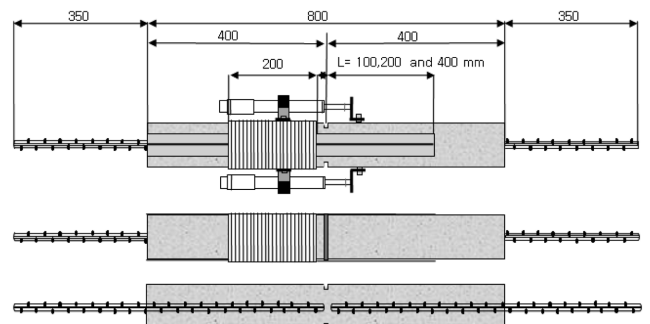


Fig. 5 Details of specimen

- 1) 거푸집 제작: 목재 합판으로 거푸집을 제작한 후 철근을 배근한다.
- 2) 콘크리트 타설: 최대 치수가 25 mm인 골재, 압축강도가 22 MPa인 콘크리트를 타설한다. (Fig. 6(a))
- 3) 양생 및 탈형: 타설 3일 후 거푸집을 탈형하고 습윤 양생 실시한다.
- 4) FRP 하이브리드 시트 부착: 접착제를 계량하여 콘크리트 표면에 도포 한 후, FRP 하이브리드 시트를 부착한다. (Fig. 6(b), (c))
- 5) 와이어 변형률게이지 및 LVDT 설치: 소정의 위치에 와이어 변형률게이지를 붙이고 LVDT를 설치한다. (Fig. 6(d))

4.3 가력 방법

Fig. 7에 가력 방법을 나타내었다. 하중을 가하면 이형 철근만으로 인장력을 부담하도록 만능시험기의 양측 그

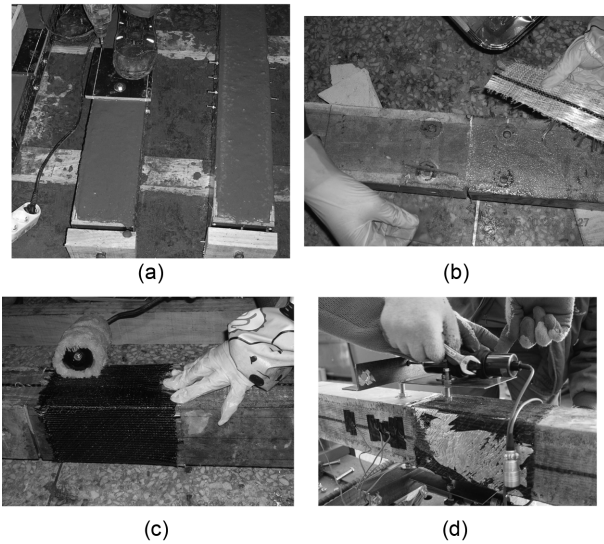


Fig. 6 Specimen fabrication



Fig. 7 Test set-up

립에 인장 철근을 고정시켰다. 가력 초기에 미리 설치해둔 홈을 통해 균열이 유도되고, 이에 모든 인장력은 FRP 하이브리드 시트를 통하여 전달되는 기구로 이루어져 있다.

5. 결 과

5.1 실험 결과

실험 결과를 Table 3에 나타내었다. 각 실험체는 시트의 길이와 보강량 (1 ply, 2 plies)에 상관없이 유사한 최대 하중을 나타내었고 Fig. 8에서처럼 미리 설치한 균열 유도 홈에서 균열이 유도되어 확대되고 콘크리트와 시트 계면에서 미끄러짐이 발생하여 최종적으로는 시트 박리가 발생하여 파괴하는 양상을 보였다.

Fig. 9에 하중-변위 관계를 나타내었다. 시트 보강량에

Table 3 Summary of test results

Specimen	Sheet bonded length (mm)	P_{max} (kN)	$\tau_{b,max}$ (MPa)	Failure mode
CG11	100	23.2	0.24	Sheet delamination
		19.0		
CG21		27.5	0.97	Sheet delamination
		20.5		
CG12	200	17.7	1.23	Sheet delamination
		24.8		
CG22		19.5	1.35	Sheet delamination
		23.3		
CG14	400	22.0	5.94	Sheet delamination
		17.2		
CG24		23.0	6.89	Sheet delamination
		21.6		

(CG○□: C-carbon, G-glass, ○-ply of sheet, □-sheet length)

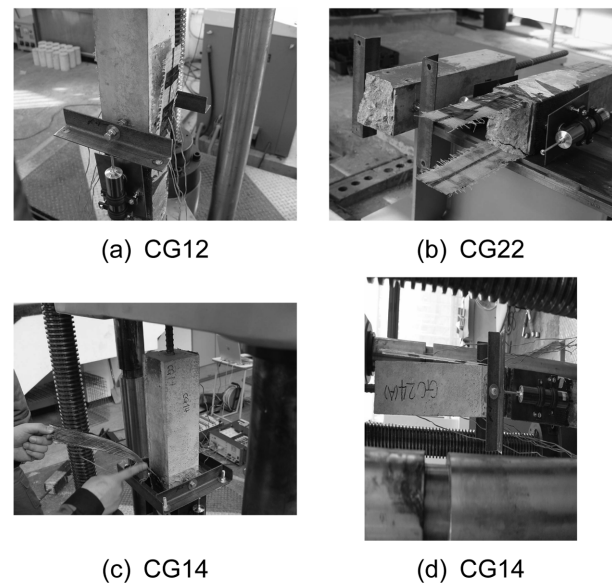


Fig. 8 Typical failure patterns

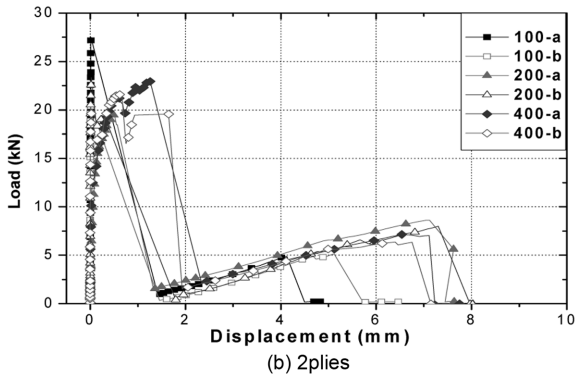
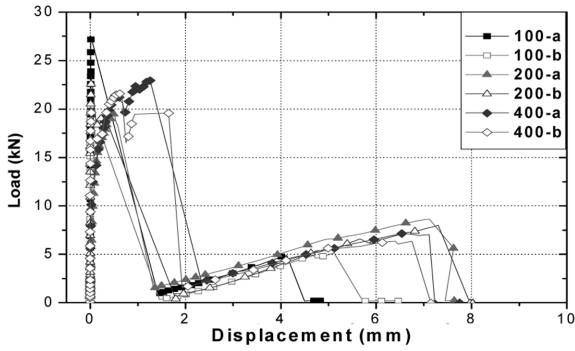


Fig. 9 Load-displacement relations
(○-□ : ○-sheet length, □-series)

다른 거동의 차이는 나타나지 않았지만 시트 길이에 따른 거동 차이는 확인할 수 있었다. 균열유도 홈에서 균열이 발생하기까지는 콘크리트와 시트, 접착제 모두가 인

장력에 저항하지만 균열발생 후에는 콘크리트와 시트 계면에서의 부착에 의해서만 인장력에 저항한다. 그 이후 한쪽의 시트가 순차적으로 박리되며 최종적으로는 양쪽의 시트가 모두 박리됨으로써 파괴되는 양상을 보였다. 다시 말해 미리 설치한 홈에서 균열이 유도된 후에는 시트와 콘크리트 계면에서의 부착력에 의해 균열이 확대되는 것이 억제됨을 알 수 있었다.

5.2 변형률 분포

실험체의 시트 변형률 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 시트의 변형률은 시트 표면에 붙인 변형률게이지로 측정하였다. 시트 부착 길이가 100 mm인 실험체 (Fig. 10(a), (b))는 시트의 보강량에 상관없이 균열 유도 홈에서 균열이 발생함과 동시에 시트 박리에 의한 파괴 양상을 보이는 것으로 보아 부착 길이가 100 mm인 시트는 부착강도를 발휘하기에 시트의 부착 길이가 충분하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 Table 3의 최대 부착응력 ($\tau_{f,max}$) 값이 다른 실험체에 비해 평균적으로 낮은 값을 나타내는 것으로서도 확인할 수 있다. 또한 시트 부착 길이가 200 mm, 400 mm인 실험체 (Fig. 10(c)~(f))의 경우에는 중앙부에서 균열이 발생한 후에 균열 폭이 증대되고 시트의 미끄러짐이 증가하여 최종적으로 시트 박리에 의해 파괴되는 양상을 보였으며 이 실험체들은 25~150 mm 구간에서 변형률의 기울기가 변하는 것으로 나타나 이 구간에서 콘크리트와 시트 계면에서 부착력의 전이가 발생

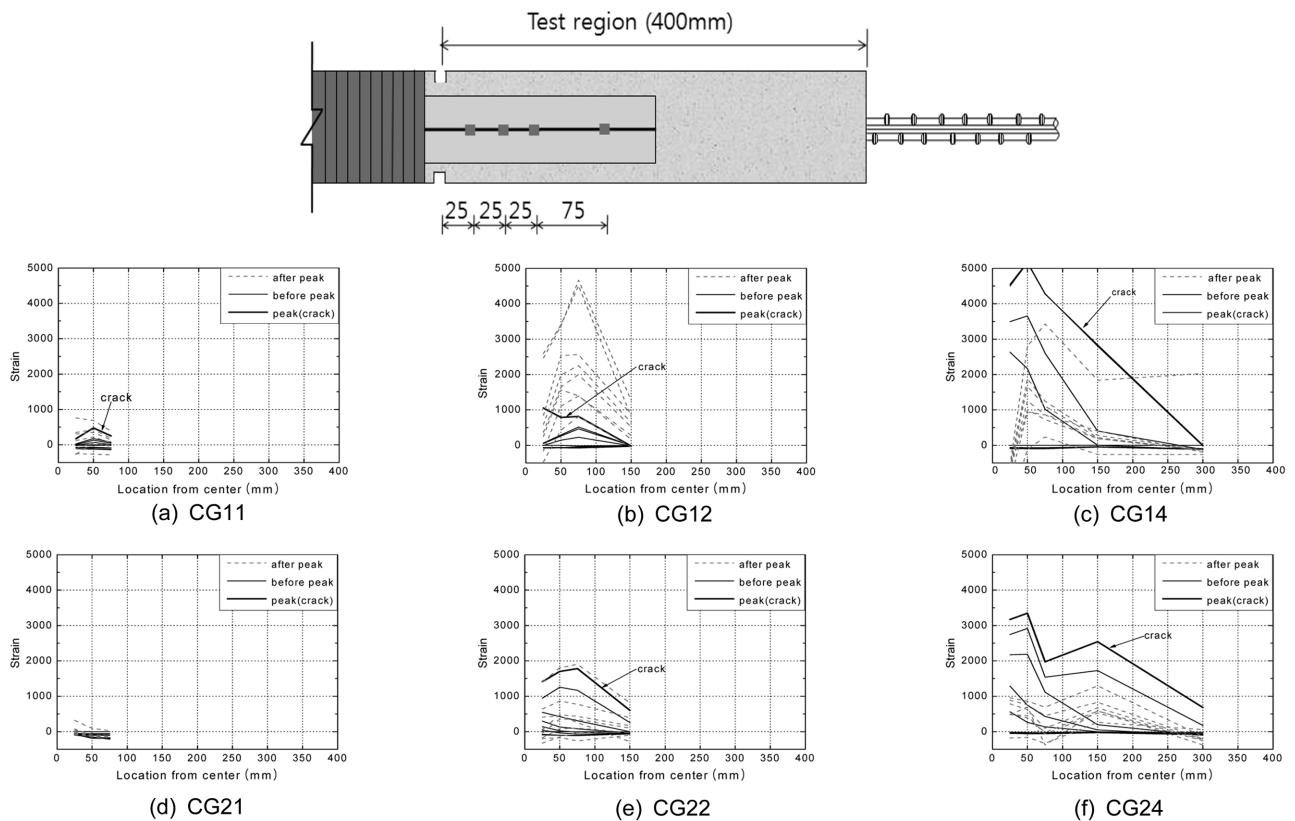


Fig. 10 Strain distributions of FRP hybrid sheet (CG○□ : C-carbon, G-glass, ○-ply of sheet, □-sheet length)

뒹을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10(e), (f)에서 보면 시트의 부착 길이가 150 mm 이후에는 변형률 구배가 크지 않은 것으로 나타나 콘크리트와 시트 계면에서의 유효부착 길이는 100~ 200 mm 사이에서 결정되는 것을 확인하였다.

5.3 부착 응력-미끄러짐 관계

하이브리드 시트와 콘크리트 계면 사이의 미끄러짐 (S_F)을 구하기 위하여 Fig. 11과 같이 실험체의 변형률 분포를 가정하였다. 이 가정에 따라 다음 식으로 미끄러짐 (S_F)을 구할 수 있다.

$$S_F = w_{cr} - \Delta_F \quad (2)$$

여기서, w_{cr} 은 중앙 홈에서 유도되는 균열 폭으로

$$w_{cr} = (\Delta_{LVDT1} + \Delta_{LVDT2})/2 \quad (3)$$

이며, Δ_F 는 시험 구간 내 하이브리드 시트의 국부적으로 늘어난 길이로서 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta_F = (\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1})s_g/2 \quad (4)$$

여기서, ε_i 는 실험체 중앙에서 i 번째 변형률이며 s_g 는 와이어 변형률게이지의 간격이다.

미끄러짐 (S_F)에 상응하는 부착 응력 (τ_F)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\tau_F = W_F t_F E_F (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) / (w_F s_g) \quad (5)$$

여기서, W_F : FRP 하이브리드 시트의 폭 (75 mm)
 t_F : 시트 두께 (1 ply = 1.125 mm, 2 plies = 2.25 mm)
 E_F : FRP 하이브리드 시트의 탄성계수 (6.21×10^4 MPa)

Fig. 13에 위의 과정을 통해 구한 국부 부착 응력과 미

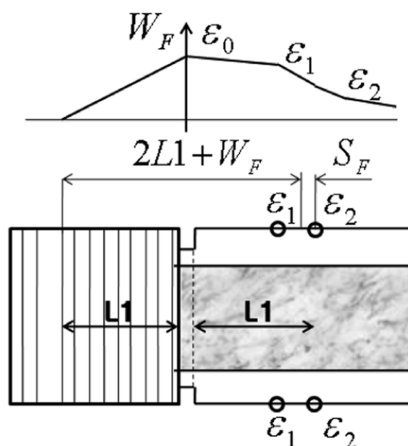


Fig. 11 Assumption of strain distribution

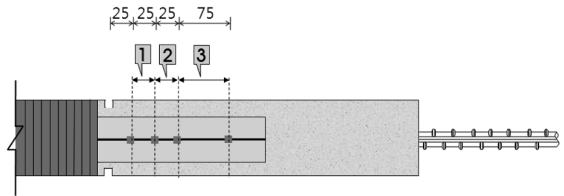


Fig. 12 Slip relationship

끄러짐 관계를 나타내었다. 시트의 부착 길이가 100 mm 인 실험체는 모든 구간에서 낮은 부착응력을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 것처럼 시트 부착 길이가 100 mm인 경우 중앙부의 균열유도 홈에서 균열이 발생함과 동시에 부착 길이가 너무 짧아 시트의 박리가 발생하였기 때문으로 사료된다.

또한 그림에서 시트와 콘크리트 계면사이의 부착응력은 2~3 영역 (75 mm~150 mm 구간)에서 주도적으로 발휘됨을 알 수 있다. 1영역의 경우 2~3 영역에 비해 2.0 MPa 부근에서 부착응력 저하가 발생하여 2~3 영역으로 순차적으로 부착응력 전달 영역이 전이됨을 알 수 있다. 2~3 영역에의 부착응력-미끄러짐 특성을 살펴보면 부착강도는 시트의 부착 길이와 무관하게 3.0 MPa를 약간 상회하는 값을 나타내지만 부착 길이 200 mm인 실험체는 부착강도에 다다른 후 급격한 강도저하와 더불어 시트와 콘크리트 계면의 미끄러짐이 급격히 발생하는데 비해 부착 길이 400 mm인 실험체는 부착강도에 이른 후 완전한 부착강도 저하와 함께 시트와 콘크리트 계면에서의 미끄러짐이 발생하였다.

또한 시트 보강량의 차이에 따른 거동차이는 시트 보강량이 2겹인 실험체가 1겹인 실험체에 비해 약간 낮은 부착강도와 최대 부착응력 이후 급격한 응력저하가 나타났다. 이는 보강량 증가에 따른 두께 증가로 인한 강성의 증가에 기인한 것과 함께 에폭시 수지가 시트와 시트 사이에 상당부분 침전되어 콘크리트와의 계면에서의 시트와의 부착이 1겹 보강에 비해 불리하게 작용하였기 때문으로 사료되며, 시트 보강량이 늘어날 경우 이러한 점을 감안한 시공이 요구된다.

6. 결 론

본 연구에서는 탄소와 유리섬유로 (체적 비율 1 : 8.8) 제작된 하이브리드 시트로 보강한 콘크리트의 부착에 대한 실험으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 시트의 유효부착길이는 100~200 mm 사이에서 존재하고, 시트의 콘크리트 계면에서의 효율적인 부착강도를 발휘하기 위해서는 200 mm 이상의 부착 길이가 확보되어야 한다.
- 2) 콘크리트와 하이브리드 시트 계면에서의 부착강도는 3.0 MPa를 약간 상회하는 값을 나타내는 것을 확인하였으며 계면에서의 부착거동은 중앙부 균열 유도 홈에서 75~150 mm 구간에서 부착응력이 주도

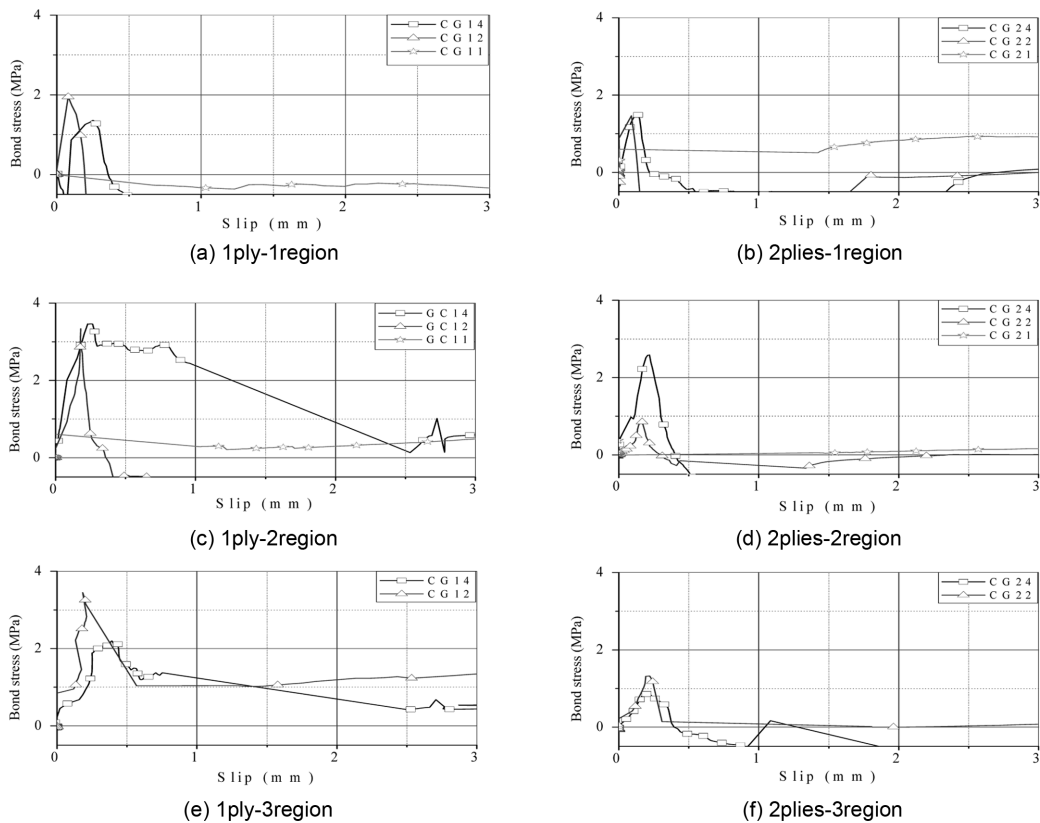


Fig. 13 Local bond stress-slip relationship (CG○□ : C-carbon, G-glass, ○-ply of sheet, □-sheet length)

적으로 작용하는 것을 확인하였다.

- 3) 콘크리트와 단일섬유로 만들어진 시트 계면에서의 부착강도와 콘크리트와 하이브리드 시트 계면에서의 부착강도는 3.0 MPa 전후로 나타나 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2단계 BK21 사업 및 학술진흥재단 협동과제 (과제번호KRF-2005-042-D00336)의 연구지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 양동석, 고병순, 박선규, 유영찬, “콘크리트와 탄소섬유 판 계면의 본드-슬립모델 산정,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 16권, 2호, 2004, pp. 635~638.
2. Philips, L. N., “The Hybrid Effect-Does it Exist,” *Composites*, Vol. 7, No. 1, 1976, 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, No. 10, 1981, pp. 2233~2245.
4. 최동욱, 하상수, 이진용, 김길희, “유사연성 하이브리드 FRP 시트를 이용한 RC보의 휨 보강,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 239~247.
5. AIJ, *Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete*, Architectural Institute of Japan, 2001, pp. 13~14 (in Japanese).

요약 탄소 섬유와 유리 섬유를 체적 비율 1:8.8로 조합하여 강성이 높은 탄소 섬유가 인장에 저항한 후 먼저 파단되고 그 후 유리 섬유가 인장에 저항하여 높은 연성을 발휘하도록 한 하이브리드 시트를 제작하고 시트 길이를 100, 200, 400 mm로 각각 다르게 하여 시트 길이에 따른 콘크리트와 하이브리드 시트 계면에서의 부착 특성에 대해 고찰하였다. 실험 결과, 시트의 유효 부착 길이는 100~200 mm 사이에서 존재하고, 시트의 콘크리트 계면에서의 효율적인 부착강도를 발휘하기 위해서는 150 mm 이상의 부착 길이가 확보되어야 하며, 콘크리트와 하이브리드 시트 계면에서의 부착강도는 대략 3.0 MPa이고 슬립량은 0.175 mm로 나타나는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 부착응력, 미끄러짐, 하이브리드시트, 부착전단