



유리섬유복합재료의 재료특성에 관한 실험적 연구

박종면¹ · 서현수² · 권민호³ · 임정희²

(주)지승컨설턴트 대표이사¹, 경상대학교 토목공학과 박사과정², 경상대학교 토목공학과 공학연구원 교수³

Experimental Study on the Material Characteristics of Glass Fiber Composites

Park, Jong-Myen¹ · Seo, Hyun-Su² · Kwon, Min-Ho³ · Lim, Jeong-Hee²

¹President, Jiseung Consultant co., ltd

²Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

³Professor, Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

Abstract: In the study, tensile, compression and in-plane tests about longitudinal direction of glass fiber were performed. Also, to obtain the material properties of GFRP fabric composite, tensile test was performed. All test were performed by the test method of ASTM. Maximum compressive strength was smaller than the maximum tensile strength at the longitudinal direction test results. Elastic modulus of the tensile and compressive was almost similar at the compression test results in the longitudinal direction. Based on the GFRP fabric composite test results, GF91 was showed good performance at maximum compressive, maximum strain and elastic modulus.

Key Words: Tensile test, Compression test, In-plane test, GFRP fabric composite

1. 서론

최근 복합재료(Fiber Reinforced Polymers, FRP)는 1980년대부터 토목구조물의 보수 및 보강에 적용하는 재료로 주목받고 있으며, 1990년대 중반부터 국내 건설분야에 본격적으로 활용되기 시작하였다. FRP는 기존 건설재료를 대체할 수 있는 새로운 재료로 인식되고 있으며, 구조물 보수 및 보강재료 뿐만 아니라 교량바닥판, 기둥과 같이 주요부재의 소재로서 활용되고 있다. 또한, FRP가 고강도이고, 부식하지 않는 장점으로 인해 콘크리트 구조물의 철근 및 긴장재를 대체할 수 있는 보강근으로 그 활용이 확대되었다.

FRP는 역학적인 재료특성이 서로 상이한 섬유와 매트릭스로 구성되어 있으며, 각 구성재료는 단면에 균등하게 분포되어 독특한 재료특성을 갖춘 제 3의

재료가 된다. FRP에서 유리섬유는 기계적 강도를 부여하고, 수지는 섬유를 분리, 유지시키고 힘을 분산시키며 외부환경으로부터 섬유를 보호한다(Park et al., 2006). 섬유와 매트릭스 각각의 재료는 역학적 성질이 균질하나, 두 재료의 합성으로 만들어지는 FRP는 작업자의 숙련도, 제조방법, 첨가제, 적층 등에 따라 역학적 물성의 차이가 콘크리트나 강재 등과 같은 기존 재료에 비하여 상당하다. 따라서 기존재료의 설계에서와는 다르게 FRP의 설계에서는 기본 역학적 물성을 재료시험을 통해 파악하여야한다(Kim, 2004).

본 연구에서는 제작한 단일방향 복합재료의 인장, 압축, 면내전단시험을 수행하였고 섬유의 종과 횡 비율을 달리하여 적층한 직물복합재료의 인장시험을 수행하였다. 모든 시험은 ASTM에서 제시한 시험규준을 따라 수행하였고, 이를 통하여 단일방향 복합재료의 재료특성과 섬유의 종과 횡 비율에 따른 직물복합재료의 재료특성을 분석하였다.

주요어: 인장시험, 압축시험, 면내전단시험, GFRP 직물 복합재료

*Corresponding author. Kwon, Min-Ho

Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University, 900 Gajwa-dong, Jinju 660-701, Korea.
 Tel: +82-055-772-1796, Fax: +82-055-772-1799, E-mail: kwonm@gnu.ac.kr

투고일: 2013년 12월 30일 / 수정일: 2014년 1월 25일 / 게재확정일: 2014년 2월 4일

2. 복합재료시험

1. 단일방향 복합재료시험

FRP에서 섬유는 FRP의 구조적 재료적 특성을 결정하는 중요한 요소이므로 섬유의 선택은 설계의 중요한 부분이다. 토목분야에서 널리 사용되는 섬유로는 유리섬유, 탄소섬유이다. 본 연구에서는 가격이 저렴하고 충분히 목표성능을 만족하는 유리섬유 복합재료의 재료시험을 수행하였다.

단일방향 복합재료의 재료성능을 측정하기 위해 인장, 압축, 평면전단 시험을 실시하였고, 섬유의 종과 횡 비율을 달리하여 적층한 직물복합재료의 섬유의 재료시험을 수행하였다. 모든 시험은 ASTM 규준을 따라 수행하였다.

1.1 시험규준

1.1.1 인장시험

시험편의 인장강도는 ASTM D3039(ASTM D3039/D3039M, 2007)규준에 따라 단축인장시험을 통해 구한다. D3039시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 시험편의 물림구 부분에 작용되는 응력을 감소시키고 시험편의 중앙부에 파단을 유도하기 위하여 시험편 양단부에 보강대가 존재한다.

시험을 통해 극한강도는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{tu} = P_{max}/A \quad (1)$$

여기서, σ_{tu} 는 극한인장강도, P_{max} 는 파괴되기 전 최대하중, A 는 단면적의 평균이다. 인장 현 탄성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$E_t^{chord} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (2)$$

E_t^{chord} 은 인장 현 탄성계수, $\Delta\varepsilon$ 은 변형률 0.001과 0.003 점의 차이(보통 0.002), $\Delta\sigma$ 은 변형률 0.001과 0.003 점 사이에 해당되는 인장응력 값의 차이이다.

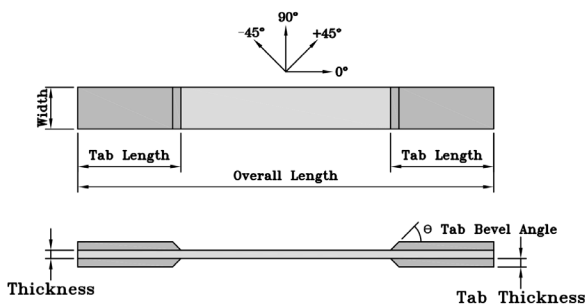


Fig. 1 Tensile test specimen geometry

1.1.2 압축시험

시험편의 압축강도는 ASTM D3410(ASTM D3410/D3410M, 2008)규준에 따라 단축압축시험을 통

해 구한다. D3410시험편의 형상은 Fig. 2와 같고, 극한 압축강도는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{cu} = P_{max}/A \quad (3)$$

σ_{tu} 는 극한압축강도이다.

압축 현 탄성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$E_c^{chord} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (4)$$

E_c^{chord} 는 압축 현 탄성계수이다.

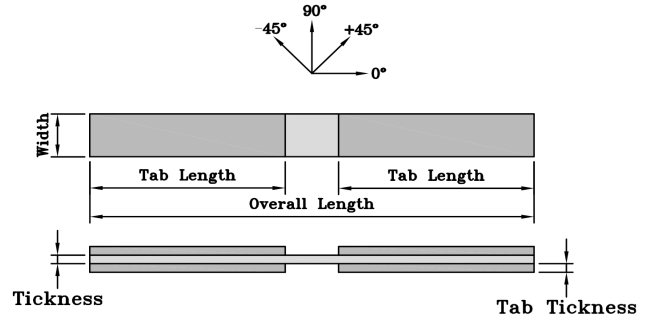


Fig. 2 Compression test specimen geometry

1.1.3 면내전단시험

시험편의 면내전단시험은 ASTM D3518(ASTM D3518/D3518M, 2008)규준에 따라 구한다. D3518 시험편형상은 D3039시험편과 유사하나, 섬유를 하중방향의 $\pm 45^\circ$ 로 적층하여 제작한다. 최대전단응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{12}^{max} = P_{max}/(2A) \quad (5)$$

여기서, τ_{12}^{max} 는 최대전단응력이고, P_{max} 는 전단변형률 5%이하에서 최대 힘이다.

최대전단변형률 γ_{12}^{max} 는 5%전단변형률 또는 최대전단응력에서의 전단변형률로 간주되어지고 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma_{12} = \varepsilon_{Longitudinal} - \varepsilon_{Transverse} \quad (6)$$

전단 현 탄성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$G_{12}^{chord} = \Delta\tau_{12}/\Delta\gamma_{12} \quad (7)$$

G_{12}^{chord} 는 전단 현 탄성계수, $\Delta\gamma_{12}$ 는 전단 변형률 0.002와 0.006 점의 차(보통 0.004), $\Delta\tau_{12}$ 는 변형률 0.002와 0.004 점 사이에 해당되는 인장응력 값의 차이이다.

1.2 시험방법

시험편의 인장강도는 ASTM D3039 규준에 따라, 압축강도는 ASTM D3410규준에 따라, 면내전단강도는 ASTM D3518규준에 따라 단축 시험으로부터 구하였다.

시험규준에 따라 인장시험체의 크기는 두께 3mm,

폭 15mm, 총 길이 250mm, 물림구의 길이 56mm로 하였고, 압축시험체의 크기는 평균 두께 3mm, 폭 10mm, 총 길이 142mm, 물림구의 길이 65mm로 하였으며, 면내전단시험체의 크기는 두께 4.7mm, 폭 25mm, 총 길이 250mm로 하였다. 각 시험규준에 따른 시편형상을 Fig. 3에 나타내었고 각 시험별로 5개씩 제작하였다. Table 1에 시험시편별 제작 및 시험종류를 나타내었다.

시험체 제작에 섬유는 유리섬유를 사용하였고 매트릭스는 에폭시수지를 사용하였다. 인장 및 압축시험의 시편은 유리섬유가 하중작용방향과 0°를 이루도록, 면내전단시험의 시편은 유리섬유가 하중작용방향과 ±45°를 이루도록 적층하였다. 시편 양단의 보강대는 시편 물림구 부분에 작용되는 응력을 감소시키고 시편의 중앙부에 파단을 유도하기 위하여 제작하였다.

모든 시험은 UTM을 이용하여 상온에서 수행하였다. 인장과 압축시험의 시험속도는 2mm/min, 면내전단시험은 4mm/min으로 변위제어를 하였고 중앙부에 1축 스트레인게이지를 하중작용방향으로 부착하여 변형률을 측정하였다. Fig. 4는 각 시험별 시험전경을 나타낸 것이다.

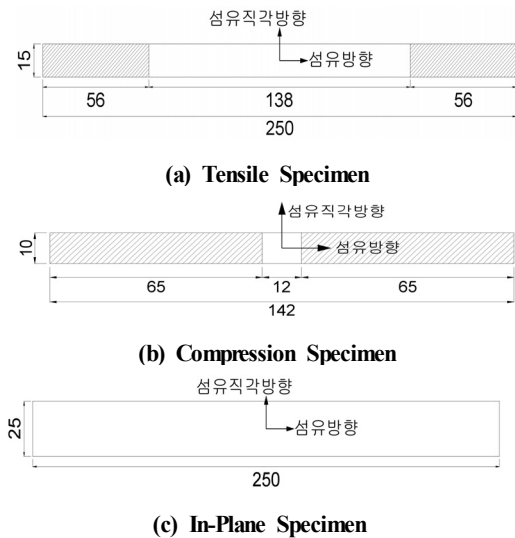


Fig. 3 Test Specimens for Each Test



(a) Tensile (b) Compression (c) In-plane shear

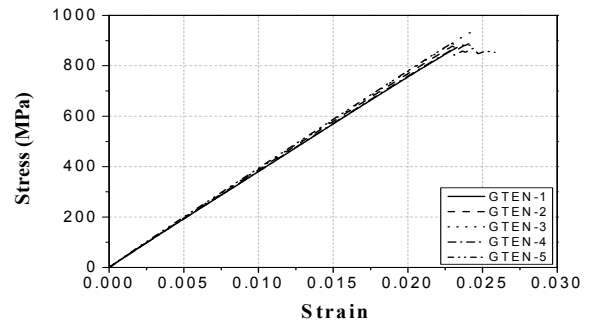
Fig. 4 Material Test for Each Test

Table 1. Details of Specimens

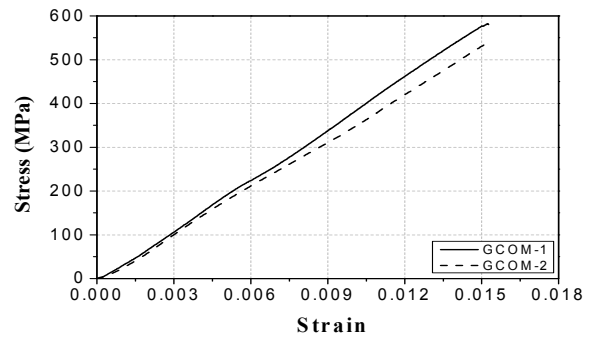
Specimen	Fiber Type	Fiber Direction	Test Type
GTEN	Glass	0°	Tension
GCOM	Glass	0°	Compression
GINPS	Glass	±45°	In-Plane Shear

1.3 시험결과

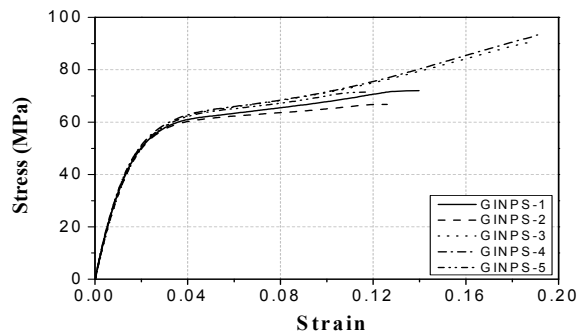
Fig. 5는 인장, 압축, 면내전단시험을 통한 응력-변형률 관계그래프를 나타낸 것이다. 각 시험별 5개 시편의 시험결과 응력-변형률 관계곡선은 유사하게 측정되었다. 인장과 압축시험결과 응력-변형률은 파괴시까지 선형거동을 보이지만, 면내전단시험은 초기에 선형거동을 보이다 파괴시까지 비선형거동을 보였다.



(a) Tensile Test



(b) Compression Test



(c) In-Plane Shear Test

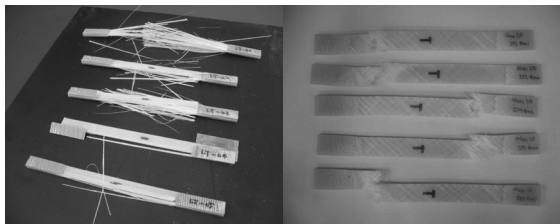
Fig. 5 Stress-Strain Relationship for Each Test

각 시험별 5개의 시편에 대하여 시험을 수행하여 Table 2에 5개 시편의 시험결과를 평균하여 나타내었다. 단일방향 유리섬유 복합재료의 인장과 압축거동은 이론적으로 동일하지만, Table 2에서와 같이 탄성계수가 유사하고 최대압축강도와 최대압축변형률이 인장 시험결과보다 작게 측정되었다.

Fig. 6은 각 시험별 시편의 파단 형상을 나타낸 것이다. 시편파괴는 섬유방향에 따라 파단이 일어난 것을 볼 수 있다.

Table 2. Test Results

Specimen	Strength at Max. Load (MPa)	Strain at Max. Load ($\times 10^{-6}$)	Modulus of Elasticity (GPa)
GTEN	888	24,370	39.1
GCOM	580	15,248	38.1
GINPS	63	50,000	3.5



(a) Tensile specimens (b) In-plane specimens

Fig. 6 Failure Patterns of Each Test

2. 직물 복합재료시험

직물 복합재료는 종과 횡 방향의 다른 섬유비율을 가진다. 단일방향 복합재료의 시험에서 압축과 평면전단시험은 시험실수와 시험성공률이 낮고, FRP의 가장 큰 장점은 인장특성치므로 직물복합재료는 인장시험만 수행한다(Sim et al., 2011).

2.1 직물복합재료 시험기준

직물복합재료의 인장강도시험은 ASTM D3039기준에 기술된 것과 같지만, 시편의 형상은 Fig. 7과 같다.

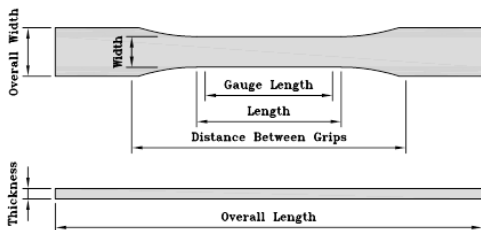


Fig. 7 Fabric Tensile Test Specimen Geometry

2.2 직물복합재료 시험방법

시험편의 인장강도는 ASTM D3039 기준에 따라 단축 인장시험으로부터 구하였다.

시험기준에 따라 인장시험체의 크기는 두께 2mm, 폭 15mm, 총 길이 250mm로 하였고, 5개 제작하였다.

직물로 구성된 복합재료는 섬유의 종과 횡 비율에 따라 다른 파괴특성을 보이기 때문에 비율에 따른 기계적 물성의 거동을 고려해야한다. 따라서 섬유의 종과 횡 비율을 9:1, 8:2, 6:4를 변수로 시험을 수행하였다. Table 3에 시험변수를 나타내었다.

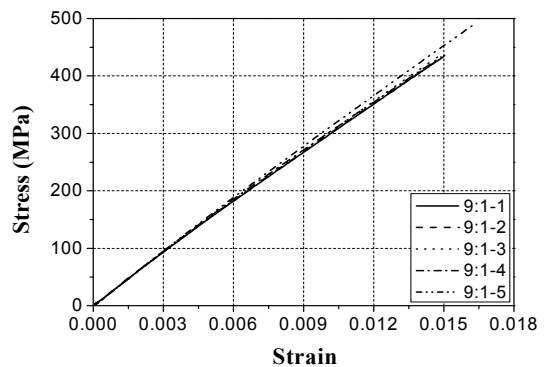
시험은 UTM을 이용하여 상온에서 수행하였고, 시험속도는 2mm/min로 변위제어하였다. 변형률은 중앙부에 1축 스트레인게이지를 하중작용방향으로 부착하여 측정하였다.

Table 3. Details of Specimens

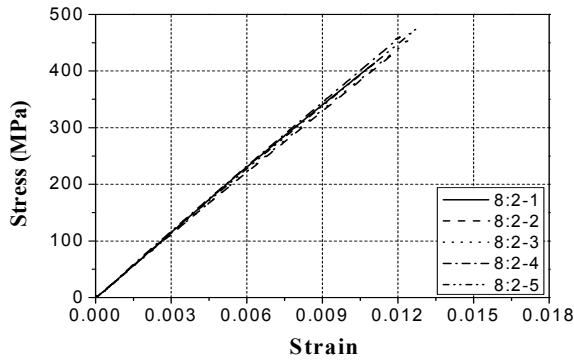
Specimen	Longitudinal-to-Transverse Ratio
GFT-91	9:1
GFT-82	8:2
GFT-64	6:4

2.3 직물복합재료 시험결과

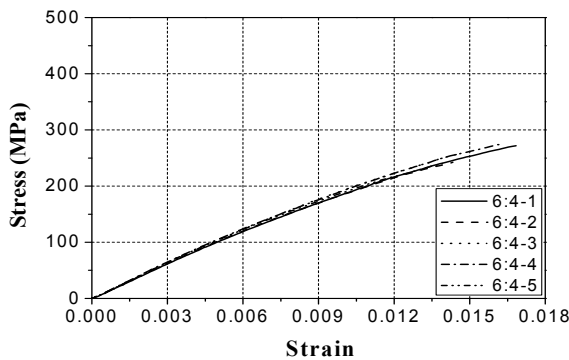
Fig. 8은 직물복합재료의 인장시험을 통한 응력-변형률 관계그래프를 나타낸 것이다. 직물복합재료의 종과횡 적층비율이 9:1과 8:2의 응력-변형률은 시험체 파괴시까지 선형을 보이지만, 적층비율이 6:4인 경우 초기에 선형거동을 보이다 파괴시까지 비선형거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.



(a) Longitudinal to Transverse Ratio 9:1



(b) Longitudinal to Transverse Ratio 8:2



(c) Longitudinal to Transverse Ratio 6:4

Fig. 8 Stress-Strain Relationship for Each Test

Table 4는 각 변수별 시험결과를 평균하여 나타낸 것이다. 섬유와 황 비율을 변수로 인장강도 시험을 수행한 결과 GFT-64는 최대인장변형률은 크게 나타났으나, 최대인장강도와 탄성계수가 다른 변수에 비하여 작게 측정되었고, GFT-82는 최대인장강도와 탄성계수는 가장 크게 측정되었으나 최대인장변형률은 가장 작게 측정되었다. GFT-91은 최대인장강도, 최대인장변형률과 탄성계수가 비교적 크게 측정되었음을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 용도에 적합한 직물복합재료의 적절한 섬유와 황 비율을 선택하여 제작할 수 있다.

Fig. 9는 각 시험별 시편의 파단 형상을 나타낸 것이다.

Table 4. Test Results

Specimen	Strength at Max. Load (MPa)	Strain at Max. Load ($\times 10^{-6}$)	Modulus of Elasticity (GPa)
GFT-91	446	15,235	31.5
GFT-82	448	12,044	38.3
GFT-64	258	15,194	21.4



Fig. 9 Failure Patterns of Fabric Tensile Test Specimen

3. 결론

단일방향의 복합재료를 ASTM 시험방법기준에 따라 인장, 압축, 평면전단시험을 수행하고, 섬유와 황 적층 비율에 따른 직물복합재료의 재료시험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 각 시험별 ASTM 시험기준에 따라 단일방향복합재료를 인장, 압축, 면전단시험을 한 결과 인장과 압축시험의 응력-변형률은 파괴시까지 선형거동을 보이지만, 면전단시험은 초기에 선형거동을 보이다 파괴시까지 비선형거동을 보였다.
2. 단일방향복합재료의 시험결과 인장과 압축시험의 탄성계수는 유사하고 최대압축강도와 변형률이 인장시험보다 작게 측정되었다.
3. 직물복합재료의 섬유와 황 적층비율에 따른 인장 시험결과 9:1과 8:2의 응력-변형률은 시험체 파괴시까지 선형을 보이지만, 적층비율이 6:4인 경우 초기에 선형거동을 보이다 파괴시까지 비선형거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.
4. GFT-64는 최대인장변형률은 크게 측정되었으나, 최대인장강도와 탄성계수가 다른 변수에 비하여 작게 측정되었고, GFT-82는 최대인장강도와 탄성계수는 가장 크게 측정되었으나 최대인장변형률은 가장 작게 측정되었다. GFT-91은 최대인장강도, 변형률과 탄성계수가 비교적 크게 측정되었다. 이를 바탕으로 용도에 적합한 직물복합재료를 제작할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 : 11첨단도시C10)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- ASTM D 3039/ D 3039M (2007). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- ASTM D3410/ D 3410M (2008). Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading
- ASTM D3518/ D 3518M (2007). Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate
- Kim, J. W. (2004), "Experimental Investigations of Material properties of Fiber Reinforced Composites." *M.S. Thesis*, Inje university
- Park, H. Y., Ahn, M. S., and Na, M. K. (2006), "Compressive Strength of FRP in Variation with Fiber Orientation." *The korean institute of electrical engineers*, pp. 1349-1350.
- Sim, J. S., Kwon, H. W., Lee, H. H., and Kim, H. J. (2011), "The Suggestion of Testing Method for Analysis of Tensile Strength of Multi-Directional GFRP Plate." *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(6), pp. 799-808.