

장섬유강화 복합재료의 섬유 배향특성이 기계적 특성에 미치는 영향

허몽영* · 이학성**†

Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Long Fiber Reinforced Composites

Mongyoung Huh*, Haksung Lee**†

ABSTRACT: Long-fiber-reinforced composites have the advantages of cost-competitiveness and high degree of freedom of molding compared to continuous-fiber-reinforced composites. On the other hand, it is difficult to ensure uniform characteristics due to the randomly distributed fiber orientation incurred from the process of manufacturing intermediate materials. In this study, the effect of the directionality of LFPS (Long Fiber Prepreg Sheet) materials on the mechanical properties was analyzed. The eddy current measurement method was used to analyze fiber orientations, and tensile and compression tests on LFPS materials were performed according to ASTM standards. In addition, the test results and theoretical values of LFPS materials were verified using the ROM (rule-of-mixtures) theory. These results confirmed the effect of fiber orientation on mechanical properties of discontinuous-fiber-reinforced composites.

초 록: 장섬유강화 복합재료는 연속섬유강화 복합재료 대비 가격 경쟁력 및 성형 자유도가 높은 장점을 가지고 있다. 반면에 중간재를 제조하는 과정에서 무작위로 분산되는 특성으로 균일한 배향성을 확보하는데 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 LFPS(Long Fiber Prepreg Sheet) 소재의 재현성 검증을 위하여, 섬유의 배향 각도를 측정하고 이를 기반으로 기계적 물성치와의 상관관계를 분석하였다. 배향특성 분석을 위하여 와류측정방식을 사용하였으며, ASTM 기준에 준하여 LFPS 소재의 인장 및 압축 시험평가를 수행하였다. 추가적으로, 탄성강성 예측이론인 ROM(Rule of Mixture)을 활용하여 LFPS 소재의 시험결과와 이론치를 검증하였다. 이러한 결과를 통해 비연속섬유강화 복합재료의 섬유 배향특성이 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하였다.

Key Words: Long fiber prepreg sheet(LFPS), 압축성형(Compression molding), 와류(Eddy current), 섬유 방향(Fiber orientation)

1. 서 론

섬유 강화 복합 재료는 자동차 산업, 철도 및 항공 등 다양한 분야에서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 복합재료의 높은 비강성, 비강도 및 중량 감소효과를 포함한 특성으로 인해 기존 금속 구성 요소를 대체 할 수 있다[1,2]. 장섬

유강화 복합재료의 경우 단섬유강화 복합재료 대비 우수한 기계적 물성을 갖으며, 연속섬유 복합재료 대비 높은 생산 특성을 기대할 수 있다[3].

장섬유 프리프레그 시트(LFPS)는 알루미늄 수준의 기계적 물성 구현이 가능하며, 압축성형(Compression molding)을 통하여 비교적 짧은 시간에 성형할 수 있는 장점을 갖는

다. LFPS는 프리프레그(Prepreg)를 25~50 mm의 길이로 재단하여 랜덤하게 분산시킨 시트(sheet) 형태로 이루어지며, 이를 제작하기 위하여 프리프레그 슬리팅(Slitting), 분산(Dispersion) 및 시트화를 위한 압착기(Press) 등의 공정이 필요하다. 이러한 공정 조건에서 랜덤하게 분산된 LFPS는 다양한 분산특성을 갖으며, 이러한 특성은 기계적 강성 등에 영향을 미친다. 이는 적용하고자 하는 응용 제품의 설계허용치(Design allowable values)를 결정하는 중요한 요소로 작용된다[4].

비파괴 및 와류 측정 장치 등을 통한 소재의 분산 및 방향성 분석에 대한 연구는 대부분 연속섬유 기반 복합재료의 품질 안정성 및 내부 기공도 분석 등의 목적으로 사용되어왔다[5]. 최근에는 이러한 와류 측정 장비를 이용하여 에어레이드(Air-laid) 공정을 통해 제작된 부직포상의 복합재료의 분산도 및 방향성 측정 등의 다양한 분야로 응용되고 있다[6].

본 연구에서는 이러한 와류 측정 장비를 통하여 LFPS소재의 방향성을 측정하고 ASTM 시험 기준에 준하여 인장, 압축 시험을 수행하였다. 이를 통해 측정된 LFPS 소재의 방향성이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 추가적으로, 이러한 실험결과를 Richardson[7]이 제시하는 복합재료 강성 예측이론인 ROM(Rule of Mixture) 및 Krenshel's Factor를 고려하여 LFPS 소재 시험결과와 이론치를 비교 검증하였다.

2. 구 성

2.1 LFPS 소재 및 제작공정

LFPS 소재는 S社에서 개발된 장섬유강화 복합재료 중간재이다. 수지는 속경화형(Rapid curing) 에폭시 수지를 사용하였다. Table 1은 LFPS 소재 제조에 사용되었던 탄소섬유와 에폭시 수지의 기본적인 물성정보를 나타내고있다[3]. 이 물성치는 강성 예측 이론인 ROM을 통해 유효물성치(effective mechanical properties)를 산출하는데 사용되었다.

Table 1. Material properties

Material properties	Fiber	Epoxy resin
Tensile modulus (GPa)	233	3.1
Density (kg/m ³)	1,800	1,200
Poisson's ratio	0.2	0.36

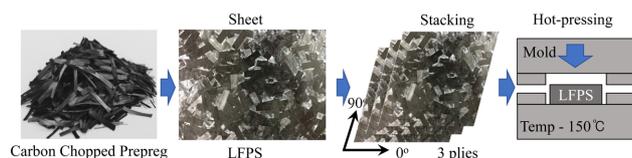


Fig. 1. Molding for LFPS test specimens

LFPS 소재를 통한 시험편 제작 공정으로 Fig. 1에서와 같이 슬리팅된 프리프레그를 시트(Sheet) 형태로 제작하고, 이를 3겹(3-ply)으로 적층 후에 열성형을 통하여 시험편을 제작하였다. 성형 온도는 150 °C, 성형 압력은 10 MPa로 10분 동안 온도와 압력을 가하였다.

2.2 와류측정

LFPS 섬유의 방향성 측정을 위하여 Suragus社의 EddyCus CF Map 5050iso 장치를 사용하였다. 와류 측정을 위한 평판 샘플은 2종이며, 평판 치수 330 mm × 330 mm, 스캔을 위한 피치(Pitch) 간격은 x, y 방향으로 각각 2.5 mm로 설정하였다. 시험을 위해 사용된 주파수는 10 kHz~100 MHz 범위 내에서 측정하였으며, 탄소섬유의 전기전도도는 5·10³~5·10⁴ S/m 범위로 설정하였다. 측정을 위한 침투 깊이는 10 MHz에서 1 mm 간격 기준으로 시행되었다. 식 (1)은 표준 침투 깊이 δ , 시험 주파수 f , 투자율 μ (H/mm) 및 소재의 전도도 σ 와의 관계를 보여주고 있다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

2.3 탄성 강성 예측 이론

ROM은 탄성 강성 예측을 위한 가장 기본이 되는 이론으로, 식 (2)-(4)를 통하여 강화재, 기지재의 강성과 체적비를 통하여 복합재료의 탄성을 예측할 수 있다[6,8].

$$E_x = E^f V^f + E^m (1 - V^f) \quad (2)$$

$$\nu_{xy} = \nu^f V^f + \nu^m (1 - V^f) \quad (3)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{V^f}{G^f} + \frac{1 - V^f}{G^m} \quad (4)$$

LFPS는 랜덤하게 분산된 복합재료 이므로 섬유방향에 대한 강성 보상 계수 반영을 위하여 기본 ROM 이론식에 추가적으로 Krenschel's Factor에 관한 식 (5)-(7)을 고려하였다[9].

$$E_{x,y} = \eta_{ip} \eta_{op} E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (5)$$

$$\eta_{ip} = \sum \alpha_{ip} \cos^4 \theta_{ip} \quad (6)$$

$$\eta_{op} = \sum \alpha_{op} \cos^4 \theta_{op} \quad (7)$$

$E_{x,y}$ 는 방향 별 인장 탄성계수, G_{xy} 는 전단 탄성계수, η_{ip} 는 강화재의 방향성 보상계수, η_{op} 는 섬유의 곡률 보상계수를 나타낸다. α_{ip} 는 총 섬유비율, α_{op} 는 섬유의 직조 등으로 발생하는 총 곡률을 말한다. E_f , V_f 는 강화재의 탄성강성과 체

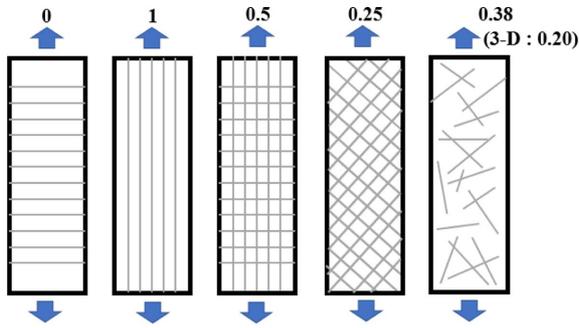
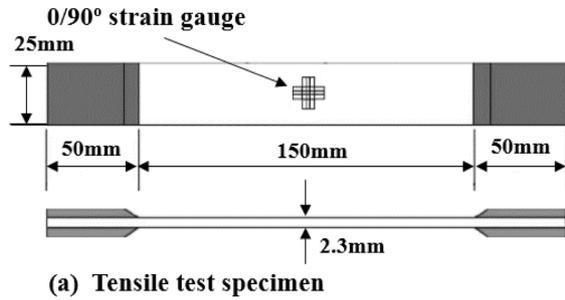
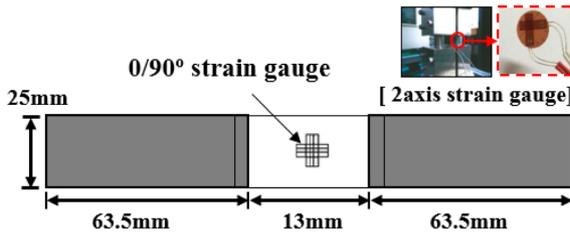


Fig. 2. Krenchel's factors (η_p) for reinforcement direction[9]



(a) Tensile test specimen



(b) Compressive test specimen

Fig. 3. Specification of tensile and compressive test specimen

적이며, E_m , V_m 은 기지재의 탄성강성과 체적이다. Fig. 2은 대표적으로 보여지고 있는 소재의 형태 및 방향 별 Krenchel's Factor를 나타내고 있다. 탄성강성 산출시에 섬유율의 곡률보상계수는 무시하였다.

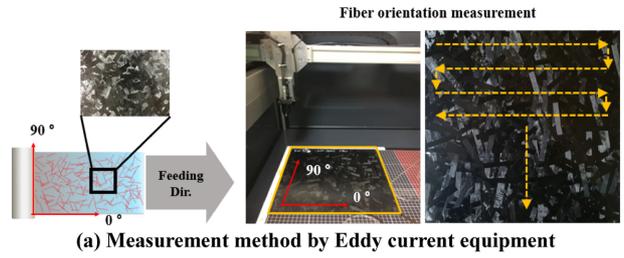
2.4 인장 및 압축시험

Fig. 1의 과정을 통해서 시험편을 제작하고, ASTM D 3039와 ASTM D 6641 기준에 준용하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 장치는 Instron社의 만능시험기(Instron 8801, 10 tons, USA)를 활용하였으며, 변위 제어 2.0 mm/min의 속도로 인장 및 압축 시험을 수행하였다. Fig. 3은 인장 및 압축시험편의 세부 치수 정보를 나타내고 있다.

3. 결 과

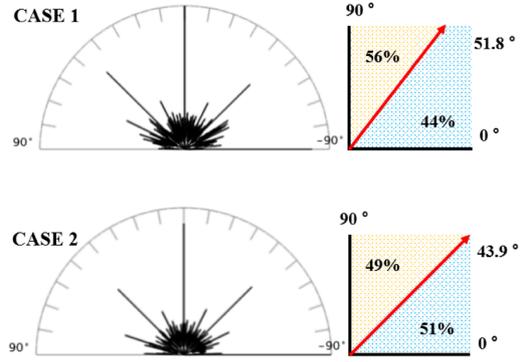
3.1 와류측정에 따른 섬유 배향특성

Fig. 4는 와류측정 장치를 통해 측정된 두 가지 경우(Case 1~2)에 대한 섬유 배향텐서(Fiber orientation tensor) 결과



(a) Measurement method by Eddy current equipment

Histogram of oriented gradients Total orientation Tensor



(b) Measurement of orientation characteristics for 2-specimens

Fig. 4. Orientation tensor results for Eddy current method

보여주고 있다. LFPS 중간재 제조 조건을 고려하여 섬유의 공급 (Feeding) 방향을 0°(x축)로 설정하고, 이에 직각방향을 90°(y축)로 설정하였다. 2가지 시험편에 대한 전체 방향 텐서(Total orientation tensor) 값은 조건 (Case) 1의 경우 90° 방향으로 치우친 51.8°, 조건 2의 경우 상대적으로 0°, 90° 방향 모두 고르게 분포된 43.9°로 나타났다.

3.2 인장 및 압축시험 결과

인장 및 압축시험을 통해 획득한 각 재료의 방향 별 강도 및 강성 값을 Table 2에 정리하였다. 조건 1의 경우 90° 방향 섬유 배향 비율이 56%로 0° 44%보다 높은 섬유 배향 비율을 보였으며, 이로 인해 90° 방향에서 높은 인장강성 값을 나타냈다. 조건 2의 경우 조건 1과 비교하여 상대적으로 균일한 섬유 배향 특성을 보이며, 이로 인해 0°, 90° 방향 별 강도 및 강성 값의 차이가 10% 내외에서 유사한 결과 값을 나타냈다. 압축강도의 경우 인장강도와 동일하게 섬유배향 정도에 따라 동일한 경향을 보이는 반면, 강성의 경우 인장강성이 높은 경우 압축강성이 낮고, 인장강성이 낮을 경우 압축강성이 높은 상반되는 경향을 보였다.

3.3 탄성 강성 예측 결과

Table 1의 탄소섬유와 수지(resin)의 물성을 기초로, 식 (2)-(4)의 ROM 이론을 적용하여 일 방향 탄소섬유 프리프레그 (prepreg)의 물성을 Table 3과 같이 도출할 수 있었다. 탄소

Table 2. Mechanical properties of LFPS obtain from test

Case		Fiber orientation ratio	Tensile test		Compressive test	
			Stress (MPa)	Modulus (GPa)	Stress (MPa)	Modulus (GPa)
# 1	0°	44%	158.07±23.2	29.11±3.9	338.26±13.8	47.37±13.1
	90°	56%	434.83±60.6	54.23±1.5	486.32±40.4	40.40±7.5
# 2	0°	51%	340.02±69.0	49.03±7.9	318.63±36.6	39.54±11.7
	90°	49%	302.84±18.1	44.86±7.3	323.42±32.0	45.30±5.2

Table 3. Calculated results of unidirectional carbon fiber prepreg

Properties	ROM
E_x	131.85
E_y	6.05
G_{xy}	2.24
ν_{xy}	0.27

Table 4. Comparison of experimental and theoretical values for LFPS

	ROM (K. factor:0.5)	ROM (K. factor:0.38)	Case 2 (Tensile test)
0°	65.93	50.10	49.03 ± 7.9
90°			44.86 ± 7.3

섬유 프리프레그의 체적비율은 실험을 통해 확보된 56.4%로 설정하였다. ROM 이론을 통해 도출된 물성치를 기준으로 랜덤하게 분산된 LFPS 복합재료의 탄성 강성 예측을 위하여 Krenche's Factor를 통한 강성 보상계수를 고려하였다. 강성 보상계수를 적용한 이론치와 LFPS 시험편을 통해 확보된 인장 강성 비교 결과를 Table 4에서 확인할 수 있다. LFPS 소재에 대하여 직물과 같은 0.5의 보상계수를 적용할 경우 실험 값 대비 약 30% 이상의 강성 값이 도출되었다. 반면, 섬유 배향특성이 균일한 조건 2의 실험결과와 Fig. 2의 무작위로 분산된 소재에 대한 보상계수 0.38을 적용했을 경우, 이론치와 매우 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 0° 방향의 경우 인장 강성 실험치와 약 2.2%의 오차범위를 갖으며 90° 방향의 경우 약 11.7%의 오차범위를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속섬유강화 복합재료 대비 가격 경쟁력 및 성형자유도가 우수한 장점을 가지고 있는 LFPS 소재에 대하여 섬유 배향특성이 기계적 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

섬유 배향특성을 분석하기 위하여 와류측정방식을 사용하였으며, 이를 통하여 LFPS 시험편 면적 전체에 대한 섬유 배향 텐서(overall orientation tensor) 값을 도출할 수 있었

다. 인장, 압축 시험 결과 섬유 배향 특성에 따라 강성 값의 차이를 수반하고 인장 강성은 섬유 배향율이 많은 방향으로 강성 값이 높은 반면, 압축 강성은 반대의 경향을 나타냈다. 추가적으로 ROM 예측이론 및 Krenchel's Factor 강성 보상계수를 도입하여 무작위로 분산된 LFPS의 이론 강성치를 도출하고 실험 결과와 비교하였다. 비교 결과 무작위로 분산된 소재에 대한 보상계수 0.38을 적용할 경우 LFPS 소재의 0도 방향의 강성의 경우 약 2.2%의 오차범위를 갖으며, 90도 방향의 강성은 약 11.7%의 오차범위를 나타냈다.

이를 통하여, LFPS 소재를 포함한 비연속섬유강화 복합재료의 섬유 배향특성이 기계적 특성에 미치는 영향을 가늠할 수 있는 기초자료가 될 수 있으며, 이를 기반으로 적용하고자 하는 제품에 설계요구치를 사전에 예측하고 검증하는데 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 국방부 민군기술협력사업(드레이핑용 탄소장 섬유 강화 열경화성 Sheet제조 및 부품성형기술 개발, No. 15-CM-MA-15), 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업(No.10052724) 및 연구재단 신진연구자지원사업(NRF-2018R1C1B6002221)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- Lee, H., Huh, M., Yoon, J., Lee, D., Kim, S., and Kang, S., "Fabrication of Carbon Fiber SMC Composites with Vinyl Ester Resin and Effect of Carbon Fiber Content on Mechanical Properties," *Carbon Letters*, Vol. 22, 2017, pp. 101-104.
- Kim, D.-H., Kim, H.-G., and Kim, H.-S., "Design Optimization and Manufacture of Hybrid Glass/carbon Fiber Reinforced Composite Bumper Beam for Automobile Vehicle," *Composite Structures*, Vol. 131, 2015, pp. 742-752.
- Lee, S.-W., and Chang, S.-H., "Design of a Stainless Steel Insert for Mechanical Joining of Long Fiber-reinforced Composite Structures," *Composites Research*, Vol. 31, No. 4, 2018, pp. 139-144.
- Kim, S.J., Park, S.W., and Kim, T.U., "Study for Determining Design Allowable Values of Light Weight Composite Unmanned Aircraft Structures," *Journal of Aerospace System*

- Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2017, pp. 1-7.
5. Schmidt, C., Schultz, C., Weber, P., and Denkena, B., "Evaluation of Eddy Current Testing for Quality Assurance and Process Monitoring of Automated Fiber Placement," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, 2014, pp. 109-116.
 6. Lee, H., Choi, C.-W., Jin, J.-W., Huh, M., Lee, S., and Kang, K.-W., "Homogenization-based Multiscale Analysis for Equivalent Mechanical Properties of Nonwoven Carbon-fiber Fabric Composites," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33, No. 10, 2019, pp. 4761-4770.
 7. Richardson, D., "The Fundamental Principles of Composite Material Stiffness Predictions," University of the West of England, Presentation, 2012.
 8. Lee, S.-P., Jin, J.-W., and Kang, K.-W., "Probabilistic Analysis for Mechanical Properties of Glass/epoxy Composites Using Homogenization Method and Monte Carlo Simulation," *Renewable Energy*, Vol. 65, 2014, pp. 219-226.
 9. Lee, J.E., Kang, D.S., Lee, B.H., Baek, J.H., Kim, J.G., and Hwang, K.M., "A Study on Elastic Modulus Predictions and Dynamic Characteristics Analysis of Composite Structures using CFRP (HPW193/RS1222)," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 33, No. 10, 2016, pp. 821-828.