

유리 섬유/열가소성 복합 재료의 기계적 및 함침 특성에 대한 직물 패턴의 영향

김늘새롬*, ** . 이은수** . 장영진* . 권동준** . 양성백*** . 염정현***†

Effect of Textile Pattern on Mechanical and Impregnation Properties of Glass Fiber/Thermoplastic Composite

Neul-Sae-Rom Kim*, **, Eun-Soo Lee, Yeong-Jin Jang*, Dong-Jun Kwon**,
Seong Baek Yang***, Jung-Hyun Yeom***†**

ABSTRACT: In various industry, the composite is tried to be applied to products and thermoplastic based composite is in the spotlight because this composite can be recycled. The use of continuous fiber thermoplastic (CFT) method increased gradually than long fiber thermoplastic (LFT). In this study, tensile, flexural, and impact test of different array types of glass fiber (GF)/thermoplastic composites were performed to compare with GF array. Impregnation property between GF mat and thermoplastic was determined using computed tomography (CT). At CFT method, thermoplastic film is not wet into GF roving and many voids are appeared into composite. This phenomenon affects to decrease mechanical properties. Plain pattern GF mat was the best mechanical and impregnation properties that distance between two roving was set closely to 100 μm.

초 록: 다양한 산업군에서 복합재료를 적용한 제품개발을 진행하고 있는 상황이며, 재활용이 가능한 장점으로 인해 열가소성 복합재료에 대한 개발이 활발하다. 장섬유 강화 열가소성 플라스틱(Long fiber thermoplastic, LFT)의 형태도 있지만, 연속섬유를 이용한 열가소성 복합재료(Continuous fiber thermoplastic, CFT)에 대한 활용도 증가하고 있다. 본 연구에서는 CFT를 제작할 때 사용되는 강화섬유의 제작 패턴에 따른 영향으로 CFT의 인장, 굴곡, 충격 강도의 변화를 확인하고자 하였다. 복합재료의 물성이 강화섬유의 제작 패턴에 의해 달라지는 원인을 기계적인 물성으로 평가하였고, CT 촬영기법을 이용하여 내부 기공발생과 섬유 제작패턴과의 상관관계를 분석하였다. CFT의 경우 열가소성 필름이 섬유로 빙내로 함침되는 수준이 낮기 때문에, 공극의 발생률이 높은 문제가 있다. 섬유로 빙과로 빙사이의 계면이 100 μm 수준으로 조밀하게 형성될 수 있는 평직 섬유 패턴이 CFT의 성형 및 기계적 물성을 안정화시키는 강화섬유의 조직임을 검증하였다.

Key Words: 폴리프로필렌(Polypropylene), 유리섬유(Glass fiber), 섬유제작패턴(Textile pattern), 기계적 물성(Mechanical property)

Received 14 December 2018, received in revised form 27 December 2018, accepted 29 December 2018

*R&D Dept, LARGE CO., LTD.

**Hybrid New Material Division, Korea Dyeing and Finishing Technology Institute

***Hybrid Nano Materials Lab, Department of Advanced Organic Materials Science and Engineering, Kyung-pook National University

****†Hybrid Nano Materials Lab, Department of Advanced Organic Materials Science and Engineering, Kyung-pook National University
Corresponding author (E-mail: jhyeon@knu.ac.kr)

1. 서 론

최근 항공기 또는 운송수단의 연비 향상을 위한 해결책으로 자동차 등의 수송기의 기체 중량 감소를 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 경량화는 연비 향상뿐 만 아니라 환경오염 문제에서도 매우 핵심적인 요소로서, 금속 대비 비강도 및 비강성이 뛰어난 섬유 강화 복합재료의 적용 및 수요가 증가하고 있는 추세이다[1].

섬유강화 복합재료는 열경화성과 열가소성 복합재료 구분할 수 있는데 열경화성의 경우 대량 생산이 어렵고, 경화 후 재가공이 힘들다는 단점을 가지고 있다[2]. 이와 달리, 열가소성 수지는 소재의 성형 온도까지 소재를 가열하여 고압에서 성형을 하며 열가소성 복합재료 중간재를 단시간에 압축성형이 가능하여, 중소 제품의 저비용 대량생산이 가능하다. 이러한 열가소성 복합재료는 강화섬유의 길이에 따라 LFT, CFT로 구분할 수 있는데 일반적으로 연속 섬유 강화 열가소성 복합재는 길이가 1 mm 수준인 LFT와 비교하여 기계적 강도, 강성 및 충격 성능이 매우 우수하다. CFT는 섬유 패턴의 형상에 따라 선택적인 복합재료의 물성을 조절할 수 있는 강점을 가진다[3].

섬유직물이 보강된 형태의 복합재료의 경우 0도 방향(Unidirection) 복합재료 보다 일반적으로 제조비용이 낮고 충격 특성 높기 때문에 차량용 범퍼 보강재나 차량용 시트 보강 부품 등 충격 특성을 필요로 하는 부품에 적용되고 있다. 직물타입의 강화재 사용은 복합재료의 제조비용을 낮추고 충격 하중에 대한 손상 내성을 향상시키기 때문에 중요한 복합재료의 요소이다.

강화섬유에 대한 제작형태는 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다. 평직, 능직, 주자직의 조건이 있다. 평직은 직물조직 중에서 경사(세로)와 위사(가로)가 한 올씩, 상하 교대로 교차되어진 직물을 이야기하고, 능직은 경사(세로) 또는 위사(가로)가 한 올, 두올 또는 그 이상의 올이 교대로 계속 교차하여 조직점(경사가 나와있는 부분)이 대각선 방향으로 연결된 선이 능선의 형태를 띠는 것을 말하며, 주자직은 경사와 위사의 조직점을 될 수 있으면 적게 하면서 조직점을 같이 붙이지 않고 떨어뜨려서 직물의 표면은 경사 또는 위사만 들어나게 만든 직물이다. 복합재 함침에 있어서 주자직과 같이 조직점을 최소화 하는것이 일방향으로의 물리적 특성이 우수하게 나타나며 평직과 같이 조직점이 많은 조직에서 cross linking되어 충격등의 성능이 우수하게 발현된다. 주로 복합재료의 강도 부분을 최적화시키며, 복합재료의 방향에 따른 물성 변화를 최적화하기 위해 평직을 이용하거나, UD sheet의 적층 순서를 구조해석 결과로 도출하여, 다양한 부품 군을 제조하기도 한다[4,5].

CFT를 제조하는데 있어 섬유이외에 중요한 부분은 열가소성 필름이 중요하다. CFT는 연속공정이 가능한 장점이

있지만, 간단한 개념으로 가압공정을 진행해야하며, 열가소성 수지는 필름의 형태로 섬유와 적층하여 중간재를 제조한다. 열가소성 필름에 대한 조성은 PP(Polypropylene), PA(Polyamide), PC(Polycarbonate), PET(polyethylene terephthalate) 등 열가소성 필름으로 활용할 수 있는 모든 수지필름들을 CFT의 기지재료로 사용할 수 있다. 하지만 소재별 흐름성과 연속가압공정(Continuos Compression Molding, CCM)의 압력, 온도 조건에 대한 최적화를 통해 CFT 소재를 제조할 수 있다.

본 연구에서는 CFT를 제조할 때 직물의 제작패턴이 복합재료에 대한 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 CFT를 제조할 때 사용하는 PP 소재를 기지재료로 이용했으며, 섬유 제작패턴의 차이로 유리섬유 평직, 능직, 주자직(Plain fabric (PF), Twill (T), Warp satin (WS)) 3가지 패턴차이를 두어 CFT를 제조하였다. CFT의 인장, 굴곡, 충격 물성을 평가하여 섬유 제작패턴에 따른 복합재료의 물성 변화를 관찰하였다. 섬유 제작패턴의 영향에 따른 CFT 내 결함을 분석하기 위해 X-ray CT 분석과 기공함유량측정법을 실시하였다. 궁극적으로 CFT를 제조할 때 섬유 제작형태가 미치는 복합재료에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에서 사용된 수지 필름은 JK corporation에서 제조된 복합재료 함침용 Polypropylene(JK) 110 μm 필름을 사용하였다. 유리섬유(GF)는 Polypropylene 수지와의 함침을 위해 오웬스코닝사의 Compatible E-glass SE4849 (1200TEX) 원사를 사용하였다[6]. Dornier사의 HTVM/S Rapier Weaving Machine으로 제작을 하였고, Fig. 1 결과와 같이 평직, 1/3 능직, 4매 주자직으로 위, 경사 6/6 610 gsm의 동일한 중량의

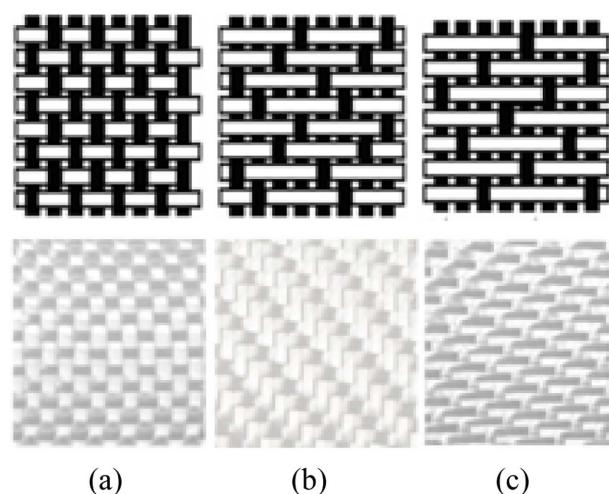


Fig. 1. Type of GF fabric pattern: (a) plain fabric (PF); (b) twill (T); and (C)warp satin (WS)



Fig. 2. Continuous compression molding (CCM) machine by Large

강화 직물을 제조하였다[7,8].

2.2 CCM 공정을 이용한 CFT 제조

평직, 능직, 주자직으로 제작된 유리섬유 제작물과 PP 필름을 합침시키기 위해 Fig. 2와 같은 Continuous compression molding (CCM, Xperion) 설비를 이용한 합침 공정은 interval hot press 방식으로 강화섬유와 수지 층에서 발생하는 보이드를 최소화하는 합침 설비를 이용하여 다섯 구간의 pre-heating(120°C), heating 1(240°C), heating 2(270°C), heating 3(270°C), cooling(80°C)의 순차적 가열, 냉각 조건에서 100 bar의 가압 조건으로 섬유 제작패턴이 다른 CFT를 제작하였다[9].

2.3 CFT의 기계적 물성 평가

각 섬유 제작패턴별로 110 μm 두께의 PP film, 660 g의 유리섬유 제작물, 110 μm PP film으로 구성된 중간재를 4 ply 적층하여 제조한 CFT 시편의 기계적 물성 평가를 위해 ASTM 규격에 맞춰 인장, 굴곡, 충격 시편을 (인장시편: ASTM D3039; 굴곡시편: ASTM D790; 충격시편: ASTM D256) Fig. 3과 같이 제조하였다. 시험은 각 조건별로 7번의 실험을 통

해 최대값과 최소값을 제거한 나머지 5번의 결과 값의 평균값을 이용하여 조건에 대한 결과로 사용하였다.

2.4 CFT의 내부기공 및 X-ray CT 분석

복합소재의 경우 성형 조건이나 섬유 비율, 배향에 따라 물성을 저해하는 요소인 기공이 발생하게 되는데 동일 성형조건 시 유리섬유 제작 패턴에 따른 기공 비율 측정하기 위해서 기공함유량 측정법을 사용하였다. 전기로를 이용하여 6 hr 동안 560°C를 유지해 기지재료를 제거한 후 섬유 무게를 측정하여 판재에 적용된 섬유 무게와 비교하고, ASTM D3171-09에 따라 아래 식에 의해 기공 체적률(V_v)을 계산하였다[10].

$$V_f = \frac{M_f}{M_i} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot 100 \quad (1)$$

$$V_m = \frac{M_i - M_f}{M_i} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot 100 \quad (2)$$

$$V_v = 100 - (V_f + V_m) \quad (3)$$

여기에서 V_f 는 섬유의 체적(%)이고, V_m 은 기지의 체적(%), V_v 는 기공의 체적(%), M_f 는 섬유 중량(g), M_i 는 초기 시험편의 중량(g), ρ_c 는 시험편의 밀도(g/cc), ρ_f 는 섬유의 밀도(g/cc)이다. 유리섬유의 밀도는 2.55 g/cc이며, PP의 밀도는 0.91 g/cc이다.

직물의 제작패턴이 다른 CFT의 내부 기공 조건을 분석하기 위해 CFT의 단층촬영을 시도하였으며 InspeXio SMX225 (JAPAN/ Shimazu corporation) 장비를 사용하여 110 kV, 40 μA/CT X-ray 3D 단층분석/Voxel Size : 0.05 (mm/voxel) 조건으로 섬유 제작패턴이 다른 CFT의 내부 상태를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 섬유 제작패턴에 따른 기계적 물성 변화

Fig. 4는 CCM으로 성형한 CFT의 인장강도 결과를 정리한 결과이다. 섬유 제작패턴의 차이에 따라 가로/세로로 시편을 발췌하는 방법에 따라 CFT의 인장강도에 차이가 보이는지 확인하였다[11].

V 방향(세로방향)이 WS 제작물에서 섬유가 0도 방향으로 배열된 방향이며, H 방향(가로방향)은 V 방향에 대한 90도 꺾인 방향이다. WS의 경우 가로 세로 방향에 따른 인장강도의 차이가 큰 편이었고, 3/1 조건으로 T 제작패턴을 이용한 CFT의 경우 가로/세로에 대한 CFT의 인장강도 차이가 WS에 비해 감소한 결과를 볼 수 있었다. PF의 경우 가장 낮은 가로 세로에 대한 인장강도 편차를 보였으며, 비교적 인장강도도 타 섬유 제작물에 비해 높은 편으로 관찰되

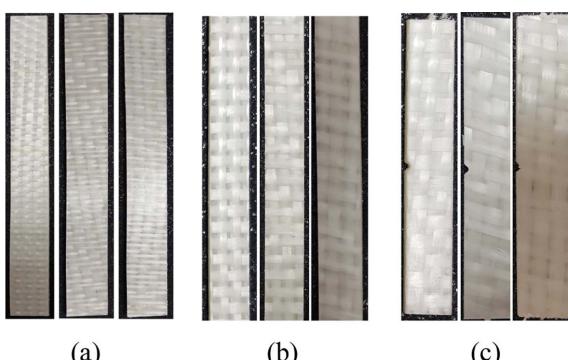


Fig. 3. Test piece of CFT plate by fabric pattern : (a) Tensile strength; (b) Flexural strength; (C) Impact strength (from the Plain, Twill, Sarin)

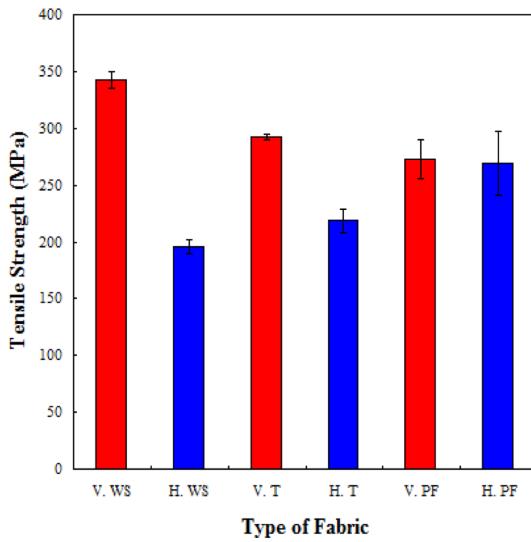


Fig. 4. Tensile strength of CFT with different reinforcement pattern

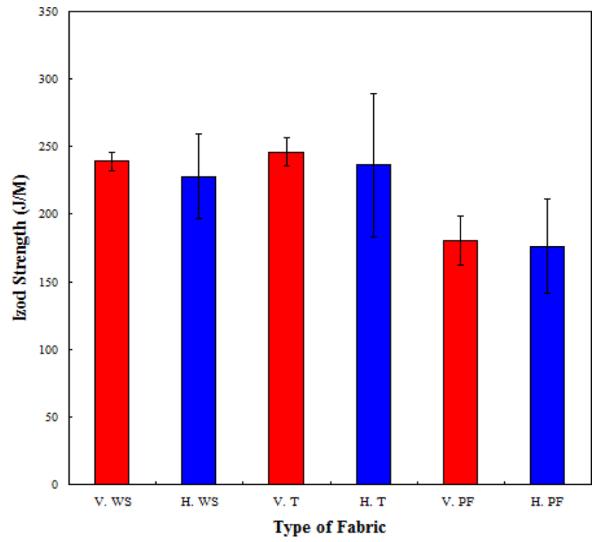


Fig. 6. Izod strength of CFT with different reinforcement pattern

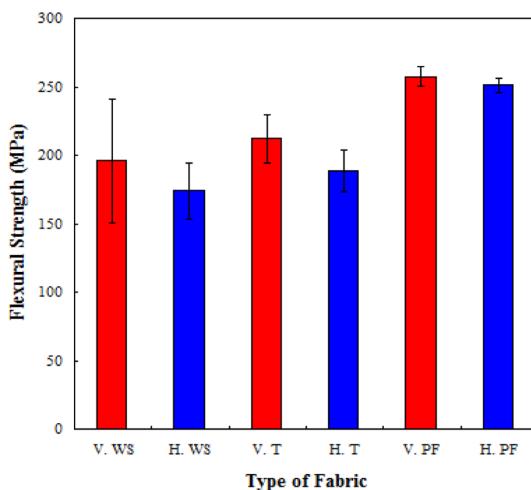


Fig. 5. Flexural strength of CFT with different reinforcement pattern

었다. 평직을 이용하는 것이 방향성에 대한 안정적인 CFT를 제품화에 할 수 있다는 장점을 가진다고 확인하였다. WS의 경우 방향에 대한 강도차이가 큰 편이지만, 방향성을 고려하지 않으며, 높은 인장강도를 유지하고자 할 경우 적용할 수 있는 섬유 패턴임을 확인하였다.

Fig. 5의 결과는 섬유 제직패턴이 다른 CFT의 방향에 따른 굴곡강도의 실험 결과를 정리한 것이다. 굴곡실험에 대해 WS 제직을 이용한 경우 가장 낮은 굴곡강도를 가지는 결과를 보였다. 결과에 대한 편차가 높으며, 굴곡강도 결과가 최저 강도임을 나타내었다. 섬유 제직패턴에 따른 복합재료의 굴곡강도가 방향성에 큰 영향을 받는 결과임을 확인하였다. T 제직물을 이용한 CFT의 경우 PF와 WS의 중간 정도의 굴곡강도를 나타내었고, 가로 세로 방향에 대한 편

자는 WS 조건에 비해 소폭 감소하였다. 마지막으로 PF 패턴을 이용한 CFT의 경우 가로 세로에 대한 가장 안정적인 강도 특성을 보이며 높은 굴곡강도의 결과를 나타내었다. 인장강도의 결과와 반대되는 경향으로 굴곡강도가 정리되었다.

Fig. 6는 섬유 제직패턴이 다른 CFT에 대한 Izod 실험 결과를 정리한 결과이다. 비교적으로 높은 인장강도와 굴곡강도를 나타내었던 WS 조건이 가장 높은 충격강도 안정성을 나타내었다. 인장, 굴곡강도 실험 결과와 다르게 충격강도의 결과에서는 가로/세로 방향에 대한 강도 편차가 낮은 편이었으며, 전반적으로 V 방향의 CFT가 높은 강도를 나타내었듯 충격강도도 높은 경향을 나타내었다. H 방향에 대해서 충격강도가 높은 편이기는 하지만, 충격강도 결과에 대한 편차가 높은 편이라 문제가 있었다. PF를 이용하는 경우 소재에 대한 충격강도는 낮지만, 가로 세로 방향에 대한 편차가 낮은 편이었으며, 결과에 대한 편차도 안정적인 상태를 나타내었다. 섬유 제직패턴의 차이에 따른 CFT의 기계적 강도를 측정해 본 결과로는 평직(PF)은 방향성에 대한 안정성을 보유하고 있지만, 비교적 낮은 강도를 가졌으며, 주직(WS) 조건이 한 방향에 대한 높은 강도를 보이는 장점이 있음을 확인하였다. T 조건을 이용하는 것보다는 주직 또는 평직을 이용하는 것이 목적에 맞는 CFT 부품을 제조 할 수 있는 조성임을 검증하였다[12].

3.2 섬유 제직패턴이 다른 CFT 소재의 내부 기공 및 CT 분석 결과

Fig. 7는 ASTM D3171-09 규격조건에 맞춰 제조한 CFT에 대한 Vv %를 분석한 결과이다. WS, T, PF 섬유 패턴 차이에 따른 CFT 내부 기공의 정도를 분석해 볼 때 가장 높은 강도를 보였고, 가로와 세로 방향에 대한 물성 편차가 높았던 WS 조건이 가장 높은 보이드 존재를 확인할 수 있었다. CFT

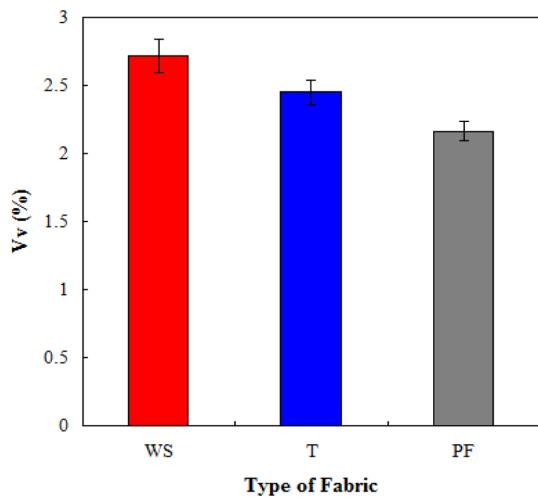


Fig. 7. Vv of CFT with different reinforcement pattern

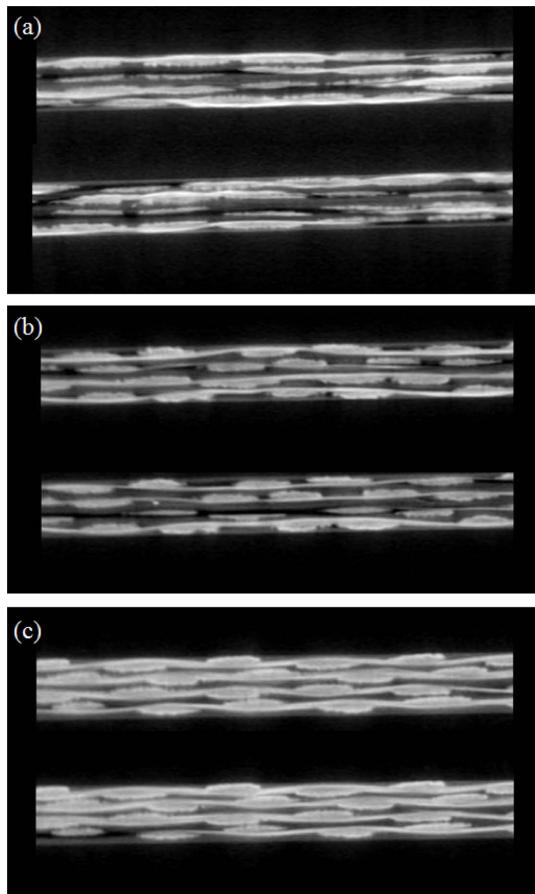


Fig. 8. Results of side slice image of CFT with different reinforcement pattern using CT: (a) WS; (b) T; and (c) PF

의 기계적 강도의 결과와 유사한 경향을 확인하였으며, PF 조건이 가장 낮은 강도를 보였으나 가장 낮은 보이드 수준을 나타내었다. Fig. 7의 결과를 통해 보이드 수준이 3% 수준으로 낮은 조건이지만, 가장 높은 강도를 가졌던 WS 조건이 가장 높은 보이드를 보유하고 있고, 가장 낮은 강도를

나타내었던 PF 조건이 가장 낮은 보이드를 가지는 상태에 대하여 CT를 이용하여 내부 기공 정도와 형태를 분석하였다.

Fig. 8은 섬유 제직패턴이 다른 CFT에 대한 측면 부분에 대한 CT 촬영 부분을 정리한 결과이다. 흰색으로 나타난 부분은 유리섬유의 형상이며, 회색부분은 GF와 PP 간의 계면 및 PP의 형상을 나타낸다고 설명할 수 있다. 검은 색이 짙은 구간은 빈 공간을 의미한다. Fig. 6(a)의 결과는 WS 조건이며, 비교적 넓은 구간에 공극이 형성되어 있으며, 선형의 형태로 빈공간이 형성되었다. 인장강도에 대한 특성이 WS 조건일 경우 가장 높았던 이유는 섬유의 배열성 때문이지만, 굽곡강도가 가장 낮은 이유는 복합재료의 빈공간이 타 소재에 비해 크고 넓은 면적의 보이드 구간이 존재하기 때문이었다. Fig. 6(b) 조건의 경우 WS와 유사한 보이드 경향을 나타내었고 보이드의 수준은 3가지 조건 중 2번째로 많은 보이드를 보유하는 상태였다. 마지막으로 Fig. 6(c)의 PF 제직 CFT의 경우 공극의 형태가 선형으로 존재하기보다는 빈 공간이 점과 같은 형태로 존재하였다. 보이드가 완벽히 없어지기는 어려운 CFT 조건의 특성상 문제로 보이지만, CCM 공정의 최적화 및 PP 필름의 함침성 개선을 통한 공극 최소화에 적합한 CFT 섬유 제직패턴은 평직임을 확인하였다. 공극이 최소화된 PF 섬유 제직 조건이었기 때문에 CFT가 굽곡강도가 가장 높게 확인되었다. 충격강도의 경우 CFT 내부에 일부분의 공극이 존재하여 재료의 충격 에너지를 완화해줄 수 있는 보이드가 존재하는 것이 높은 충격강도를 가질 수 있는 CFT가 될 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 산업용으로 사용하는 CFT 소재에 대한 섬유 제직패턴이 CFT의 기계적 강도와 보이드에 미치는 영향을 분석한 결과이다. CFT의 경우 열가소성 필름과 섬유 제직 물의 강한 가압공정으로 제작하기 때문에 섬유 제직 상태에 따라 인장 및 굽곡강도에 대한 조절이 가능하며, 선택적인 CFT 제품군의 활용이 가능하였다. 섬유 제직 상태가 0도 방향으로 치우친 WS 조건의 경우 CFT의 인장강도 강화의 장점이 있으며, PF 조건은 방향성이 안정적인 CFT를 제조 할 수 있었다. CFT 내부에 존재하는 보이드는 약 3% 이내로 적은 보이드를 보유하고 있지만, 섬유 제직패턴에 따라 약 0.5~0.8%의 차이를 보였으며, 섬유 제직조건에 따라 보이드의 형상이 달라지기 때문에 기계적 강도 및 충격강도에 영향을 미치는 요인이 됨을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2018년도 산업통산자원부의 지원을 받아 진행한 연구결과이며, 산업기술혁신사업(10076920)의 후원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. (International Journal) Vaidya, U.K., and Chawla, K.K., "Processing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites", *International Materials Reviews*, Vol. 53, No. 4, 2008, pp. 185-218.
2. (Korean Journal) Park, D.-C., Park, C.-W., Shin, D.-H., and Kim, Y.-H., "A Study on Crystallization of Thermoplastic Aromatic Polymer," *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 31, No. 4, 2018, pp. 122-127.
3. (Korean Journal) Ryoo, H.W., Lee, D.G., and Kim, E.G., "An Effect of Fiber Length on the Correlation between Separation and Orientation of Flow Molded Fiber-Reinforced Polymeric Composites", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 6, No. 1, 1993, pp. 19-28.
4. (International Journal) Naik, R.A., "Failure Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 17, 1995, pp. 2334-2363.
5. (Korean Journal) Kim, J.-W., and Lee, D.-G., "Effect of Fiber Orientation and Fiber Contents on the Tensile Strength in Fiber-reinforced Thermoplastic Composites", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 5, 2007, pp. 13-19.
6. (International Journal) Jarukumjorn, K., and Suppakarn, N., "Effect of Glass Fiber Hybridization on Properties of Sisal Fiber-polypropylene Composites", *Composites Engineering*, Vol. 40, No. 7, 2009, pp. 623-627.
7. (Korean Journal) Hwang, Y.-T., Lim, J.-Y., Nam, B.-G., and Kim, H.-S., "Analytical Prediction and Validation of Elastic Behavior of Carbon-Fiber-Reinforced Woven Composites", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 31, No. 5, 2018, pp. 276-281.
8. (Proceeding) Kilic, M.H., "Three-dimensional Micromechanical Models for the Nonlinear Analysis of Pultruded Composite Structures", Georgia Institute of Technology, 2001.
9. (International Journal) Gardiner, G., "Aerospace-grade Compression Molding: Continuous Compression Molding Process Produces Structures 30 Percent Lighter than Aluminum at Costs that have Both Airbus and Boeing Sold", *High Performance Composites*, Vol. 18, No. 4, 2010, pp. 34-40.
10. (Korean Journal) Song, S.A., On, S.Y., Park, G.E., and Kim, S.S., "Improvement of Physical Properties for Carbon Fiber/PA 6,6 Composites", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 30, No. 6, 2017, pp. 365-370.
11. (Korean Journal) Lee, W., Um, M.-K., Byun, J.-H., and Cao, J., "Characterization of In-plane Shear Behaviors of Woven Fabrics by Bias-extension and Trellis-frame Tests", *The Journal of the Korean Society for Composite*, Vol. 22, No. 1, 2009, pp. 15-21.
12. (Korean Journal) Jeon, K.-W., Shin, K.-B., and Kim, J.-S., "A Study on the Evaluation of Tension-Compression Fatigue Characteristics of Glass Fiber/Epoxy 4-Harness Satin Woven Laminate Composite for the Railway Bogie Application", *The Journal of the Korean Society for Composite*, Vol. 23, No. 5, 2010, pp. 22-29.