

황마 단섬유 강화 폴리유산 샌드위치 복합재의 제작 및 굽힘 특성

이규희* · 노정우* · 이우일*†

Processing and Flexural Properties of Chopped Jute Fiber Reinforced PLA Sandwich Composites

Gyu Hee Lee*, Jeong U Roh*, Woo Il Lee*†

ABSTRACT: In this study, we fabricated jute fiber reinforced polylactic acid (PLA) composite in the form of sandwich panel structure which includes core foam of chopped jute fiber reinforced PLA and outer skin layer of continuous glass fiber reinforced PLA. Flexural properties of the composite were assessed for different jute fiber weight fractions. Density of the core foam ranged from 0.31 to 0.67 g/cm³ and void content fraction 0.51 to 0.71. The maximum flexural strength was 92.7 MPa at 12.5 wt.% of jute fiber content, and the maximum flexural modulus was 7.58 GPa at 30.0 wt.%. Cost analysis was also conducted. The cost to enhance the flexural strength of the applied structure was estimated to be 0.010 USD/m³/MPa for 12.5 wt.% fiber content.

초 흑: 본 연구에서는 황마 단섬유 강화 폴리유산을 코어 폼으로 하고 연속 유리 섬유 강화 폴리유산을 외곽 스킨으로 하는 샌드위치 패널 구조의 황마 단섬유 강화 폴리유산 복합재료를 제작하였고, 황마 섬유 무게 비에 따른 복합재의 굽힘 특성을 관찰하였다. 코어 폼의 밀도는 0.31-0.67 g/cm³ 기공함량비는 0.51-0.71이었다. 최대 굽힘 강도는 황마 섬유 무게비 12.5 wt.%에서 92.7 MPa, 최대 굽힘 탄성계수는 황마 섬유 무게비 30.0 wt.%에서 7.58 GPa으로 측정되었다. 경제성 분석을 실시했으며 적용 부재의 굽힘 강도를 향상시키기 위한 비용은 황마 섬유 무게 비가 12.5 wt.%일 때 0.010 USD/m³/MPa로 계산되었다.

Key Words: 황마 섬유(Jute fiber), 폴리유산(Polylactic acid), 샌드위치 복합재료(Sandwich composite), 샌드위치 패널 구조(Sandwich panel structure), 굽힘 특성(Flexural properties)

1. 서 론

가벼우면서도 강한 기계적 특성을 갖는 복합재료는 에너지 절감 및 효율의 향상이 화두인 현대 산업분야의 운송/수송 분야의 요구사항을 충족시키며, 안전성을 만족시킬 수 있어 경량 복합재료에 대한 관심이 모아지고 있다. 경량 복합재료는 복합재의 총 밀도가 복합재를 구성하는 개별 재료의 밀도 분율의 합보다 작은 복합재를 뜻한다. 이를 위

해서 재료 내에는 상당한 부피의 기공(void)이 포함되어야 만 한다[1]. 일반적으로 복합재에 포함된 기공의 비가 증가하면 복합재의 기계적 특성이 저하되기 때문에, 경량복합재료를 제작하기 위해서는 재료의 경량 특성과 기계적 강도가 서로 상충됨을 감안하여 최적의 기공비를 가지고 설계하는 것이 중요하다.

미국의 한화 아즈델 사(Hanwha Azdel Inc.)는 IXIS라고 이름붙인 경량 복합재료 제품군을 개발하였는데, 외곽의 연

Received 6 January 2014, received in revised form 20 June 2014, accepted 23 June 2014

*서울대학교 기계항공공학부 기계전공 대학원

*†서울대학교 기계항공공학부 기계전공, Corresponding author (E-mail: wilee@snu.ac.kr)

본 논문의 일부는 The 9th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials에서 초록으로 발표된 바 있습니다.

속 유리섬유 강화 폴리프로필렌 프리프레그를 $0^\circ/90^\circ$ 로 교차 적층한 시트가 중심부에 위치한 유리섬유 강화 열가소성 플라스틱 폼을 지지하고 있는 샌드위치 패널 구조로 이루어져 있다. 샌드위치 패널 구조는 중심부의 저밀도 재질의 코어가 관성 모멘트를 증가시키는 역할을 하여 중량 대비 높은 굽힘 강도 특성을 나타낼 수 있기 때문에, 가벼우면서도 높은 힘 하중을 지탱해야 하는 자동차의 헤드라이너, 후드와 같은 차량용 소재로 사용되고 있다[2-5].

근래에는 기존의 유리섬유가 사용되던 건축자재나 스포츠 제품, 자동차 산업 분야에서 친환경성을 향상시키고자, 천연섬유 사용에 대한 관심이 증가하고 있다. 한 글로벌 시장 조사 기관의 연례 보고서에 따르면, 유럽에서는 천연섬유 강화 복합재료를 적용한 제품 중 자동차 내외장재 시장이 가장 규모가 크며, 북미에서는 천연섬유를 이용한 건축자재 시장이 주요한 것으로 평가되었다. 전 세계 천연섬유 강화 복합재료 시장의 규모는 2005년부터 2010년 사이에 15% 증가하였으며, 2016년의 시장규모는 2010년에 대해 10% 더 증가될 것으로 예측되고 있다[6].

황마(Jute), 아마(Flax), 양마(Kenaf) 그리고 삼(Hemp)과 같은 천연섬유를 강화재로 이용하면 다수의 장점이 있을 수 있다. 먼저, 천연섬유는 생분해가 가능하고 합성섬유에 비해 재활용이 용이한 특성을 가지며, 재료의 생산 공정 또한 단축할 수 있어 전체적인 생산 단가를 낮추는 효과도 가질 수 있다. 뿐만 아니라 공정에서 소모되는 에너지 총량을 절감할 수 있어 탄소 배출량 절감에 기여할 수 있다[2,4,7-10].

이러한 다수의 긍정적인 면과 더불어, 몇몇 천연섬유는 낮은 밀도와 함께 양호한 기계적 성능을 지니고 있다. Table 1에서 볼 수 있듯이 황마 섬유는 E-glass 섬유에 비해 인장 강도는 낮지만 유리섬유 대비 52%의 밀도와 뛰어난 비탄성률을 갖는다[9]. 황마섬유는 유리섬유보다 값이 저렴하고 인체에 미치는 영향이 작기 때문에 특정한 활용목적에 있어서는 천연섬유가 합성섬유의 좋은 대체재가 될 수 있다[2,7,11,12].

천연섬유를 사용하여 경량 복합재료를 제작하여 굽힘 특성을 관찰한 대표적인 선행연구로, 밀짚(Wheat straw)과 그 물상의 폴리프로필렌(PP)을 반복 적층하여 제작한 경량 복합재료의 굽힘 강도를 측정한 연구가 있는데 밀도 $0.38\text{--}0.51\text{ g/cm}^3$, 최대 굽힘 강도 12 MPa , 그리고 최대 굽힘 탄성계수 1.4 GPa 를 보인 바 있다[1].

본 연구에서는 한화 아즈델 사의 경량 복합재료의 구조를 참고하였으며 코어에 사용된 유리섬유 대신 황마 섬유를 사용하여 보다 친환경적인 복합재료를 제작하고자 하였다. 구체적으로는 황마(Jute) 단섬유 강화 폴리유산(PLA) 코어를 연속 유리섬유 강화 폴리유산 외곽 스킨 사이에 삽입하여 샌드위치 복합재료를 제작하였으며 앞서 소개한 WS/PP 복합재와 비슷한 밀도를 갖도록 코어의 기공함량비를 조절하였다. 황마 섬유 무게 비에 따른 굽힘 물성을 고려한

Table 1. Mechanical properties of jute fiber and E-glass fiber [9]

Materials	Specific gravity	Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)	Specific modulus
Jute	1.3	393	55	38
E-glass	2.5	3400	72	28

최적 혼합비를 결정하였고 파단면 관찰을 통해 황마 섬유 무게 비에 따른 상이점을 관찰하였으며 위 소재의 경제성을 분석하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 제작된 샌드위치 패널 구조 복합재는 중심부의 황마 단섬유 강화 폴리유산 복합소재 코어 폼(Foam)과 외곽의 $0^\circ/90^\circ$ 로 교차 적층한 연속 유리섬유 강화 폴리유산 프리프레그 스킨으로 이루어져 있다. 외곽 스킨으로 사용된 연속 유리섬유 강화 폴리유산 복합재는 장섬유 강화 폴리유산에 비해서 매우 우수한 기계적 물성을 보이며, Table 2에서 보듯이 높은 인장 강도와 굽힘 강도 및 굽힘 탄성계수를 갖는다[13].

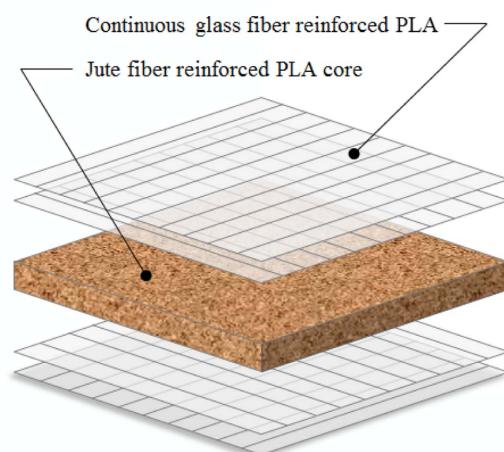


Fig. 1. Structure of jute fiber reinforced PLA lightweight composite

Table 2. Mechanical properties of PLA and PLA composite [13]

Materials	Tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
Neat PLA	62.9	98.8	3.3
Extruded long glass fiber reinforced PLA	80.2	108.9	8.2
Continuous glass fiber reinforced PLA	331.1	528.6	24.0

2.1 재료

경량 복합소재 코어의 강화재로 사용한 황마 단섬유는 5-20 mm 길이를 가지고 있으며 밀도는 1.3 g/cc이다. 경량 복합소재 코어의 기재로 사용된 폴리유산은 평균지름이 100 μm 인 분말상을 사용하였으며 밀도는 1.24 g/cc이다. 외곽 스키는 0.3 mm의 두께를 갖는 연속 유리섬유 강화 폴리유산 프리프레그를 0°/90° 방향으로 적층하였으며, 약 400 cm^2 의 표면적을 갖는 정방형으로 제작하였다.

2.2 복합재료 제작 공정

코어를 제작하기 위해서 황마와 폴리유산 분말을 혼합하였다. 폴리유산은 수분이 있는 환경에서는 수분에 의한 분해가 일어나기 때문에 건조 환경에서 혼합하였다. 실험에서 사용한 코어의 폴리유산/황마 조성을 Table 3에 정리하였다. 코어는 황마의 무게를 다르게 하여 총 7개의 실험군으로 구분하였으며, 황마 단섬유 무게 비에 따른 굽힘 물성의 변화를 관찰하고자 하였다. 유리섬유 강화 폴리유산 프리프레그로 제작한 외곽 스키 주변으로 약 6 mm의 두께를 갖는 프레임을 얹고 혼합한 재료를 최대한 균일하게 스키 위에 얹었다. 그 위에 다시 외곽 스키를 얹은 후, 180°C의 고온 프레스에서 5분간 5 MPa로 가압하였다. 이후 압력을 유지한 상태로 실온까지 냉각하여 시편을 제작하였다.

2.3 굽힘 시험

각 실험군의 시편에 대한 3점 굽힘 시험은 ASTM 790 규격을 따라 수행하였다. Fig. 2는 제작된 복합재료 시편에 대한 3점 굽힘 시험 모습이다. 만능 재료 시험기(UTM, LLOYD

Table 3. Compositions of core material experimental groups

Materials	Weight (g) [weight fraction (wt.%)]						
PLA	70 [93.3]	70 [87.5]	70 [77.8]	70 [70.0]	70 [58.3]	70 [50.0]	70 [43.8]
Jute	5 [6.67]	10 [12.5]	20 [22.2]	30 [30.0]	50 [41.7]	70 [50.0]	90 [56.2]



Fig. 2. Three-point bending fixture and flexural test specimen under loading

LR 50K model)를 사용하여 실험군 별로 최소 5개의 시편을 제작하여 굽힘 시험을 진행하였으며 cross-head speed는 2 mm/sec을 적용하였다. 3점 굽힘 시험을 수행한 시편의 일부는 코어의 비균질한 분포로 인해 중앙에서 벗어난 위치에 초기 파단이 생성되어 굽힘 물성이 저하되는 모습을 보였다. 향후 4점 굽힘 시험을 통해 황마 단섬유 무게 비에 대한 굽힘 특성의 변화 양상을 더욱 명확하게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

2.4 파단면의 관찰

굽힘 시험을 마친 시편의 코어 파단부를 절단하여 전자 방출 주사 전자 현미경(FE-SEM, JSM-6700F model)으로 단면을 관찰하였다. Sputter-coating 방식으로 시편 표면에 백금을 코팅하였으며, SEM 구동 시의 가속 전압은 7.30 kV의 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 밀도 및 기공함량비

시편의 밀도와 기공함량비(VCF, void content fraction)를 측정하였다. 코어에 포함된 기공함량비는 아래의 식 (1)을 통해 계산하였다[1,14].

$$VCF = 1 - \frac{w_f \rho_c}{\rho_f} - \frac{w_m \rho_c}{\rho_m} \quad (1)$$

w_f : 황마 단섬유(fiber) 무게 비

ρ_f : 황마 단섬유(fiber) 밀도

w_m : 폴리유산(matrix) 무게 비

ρ_m : 폴리유산(matrix) 밀도

ρ_c : 복합재(composite) 총 밀도

계산 결과 코어의 기공함량비는 황마 단섬유 무게 비가 증가할수록 0.75에서 0.51로 감소하는 경향을 보였다. 이는 황마 단섬유의 무게 비가 증가함에 따라 코어의 총 밀도

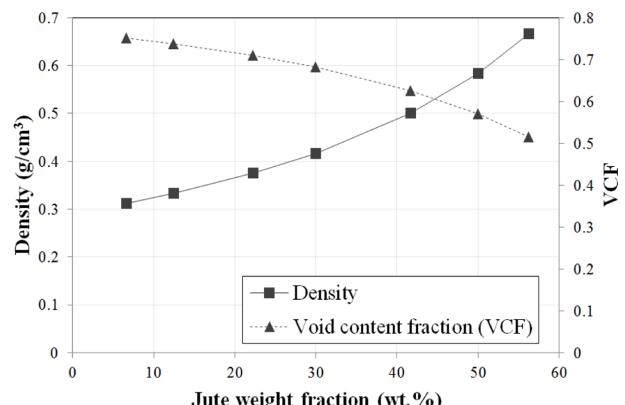


Fig. 3. Density and void content fraction as a function of jute weight fraction

ρ_c 가 증가하기 때문이며, 폴리유산보다 밀도가 높은 황마 단섬유 무게 비가 증가함에 따라 코어의 밀도는 0.31에서 0.67 g/cm³으로 섬유 무게 비에 비례하여 증가하였다. 각 실 험군의 조성에 따른 코어의 밀도와 기공함량비를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 굽힘 특성

Fig. 3은 복합재료의 굽힘 강도와 굽힘 탄성계수를 도시한 결과이고, Fig. 4는 굽힘 인장률을 도시한 결과이다. 굽힘 강도의 최댓값은 황마 단섬유 무게 비가 12.5 wt.%일 때 92.7 MPa로 측정되었다. 굽힘 탄성계수의 최댓값은 황마 단섬유 무게비가 30.0 wt.%일 때 7.58 GPa이었다.

황마 단섬유 무게 비가 12.5 wt.%보다 낮을 때에는 매우 기공함량비가 높아 굽힘 특성이 나쁘다. 황마 단섬유 무게 비가 12.5 wt.% 보다 높은 경우에도, Fig. 5에서 보듯이 단위 체적 당 황마 단섬유 무게 비 증가로 대략적인 강성(Stiffness)은 증가하지만, 섬유의 양이 과다하여집에 따라 용융점도가 높은 폴리유산의 흐름성이 제한되어 수지의 섬유로의 함침, 분말상 수지 간의 용융 후 상호결합이 불충분하기 때문에 굽힘 강도는 낮아진다.

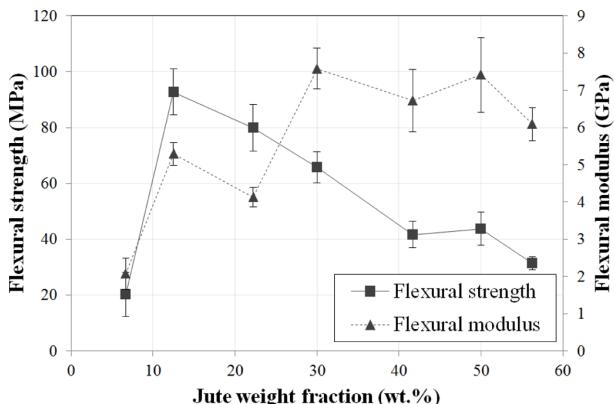


Fig. 4. Flexural strength and flexural modulus as a function of jute weight fraction

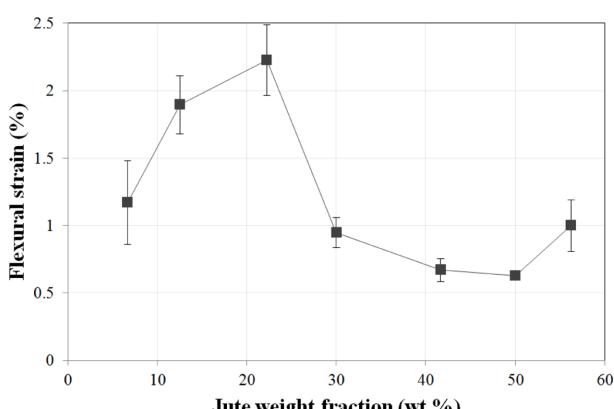


Fig. 5. Flexural strain as a function of jute weight fraction

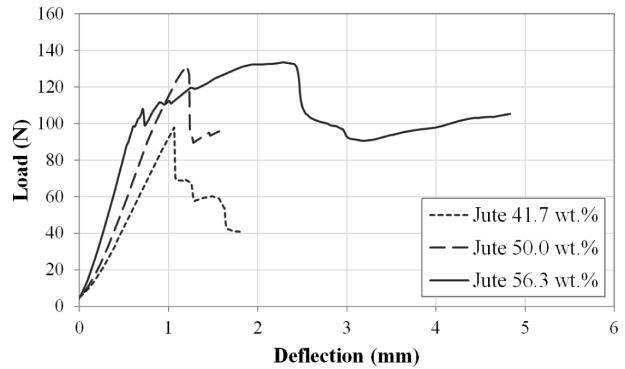


Fig. 6. Load-deflection curves of high jute weight percent groups

굽힘 인장률은 섬유 무게 비 22.2 wt.% 이상에서 현격하게 낮아졌으며 이는 굽힘 강도는 낮아졌으나 굽힘 탄성계수가 증가했기 때문이다. 굽힘 인장률은 이후 50.0 wt.% 이후에서 살짝 증가하는데, 섬유 무게 비 41.7 wt.% 이상의 시편에 대해 굽힘 시험의 하중-변형을 도시한 Fig. 6을 보면 무게 비가 56.2 wt.%인 시편은 변형이 증가함에 따라 미소 균열이 산발적으로 발생하여 부하 증가율이 점진적으로 감소하지만 코어 내부에 높은 밀도로 존재하는 황마 단섬유에 의해 복합재의 코어부가 지지되어 하단부 스킨의 일방향 연속 유리섬유의 파손이 일어나기 전까지는 catastrophic failure가 일어나지 않는 양상을 보였다. 이와 비교하여, 섬유 무게 비 41.7, 50.0 wt.%의 시편에서는 코어에서 발생한 균열이 성장하여 코어부의 파단이 일어나면 부하가 급격히 감소하며 파손이 일어나는 양상을 보였다.

3.3 파단면의 관찰

Fig. 7은 굽힘 시험이 끝난 복합재료 시편의 모습을 보여주고 있으며, Fig. 8은 Fig. 7의 시편 파단부의 절단면을 SEM으로 확대 관찰한 모습이다.

Fig. 8의 (a)는 샌드위치 복합재 파단 시편의 외곽부 단면으로, 스킨의 보강재인 유리섬유와 코어의 보강재인 황마 섬유가 기지재인 폴리유산에 의해 각각 함침되어 있음을 확인할 수 있었다. (b)는 코어의 파단 과정에서 황마 단섬



Fig. 7. Composite specimen after three-point bending test

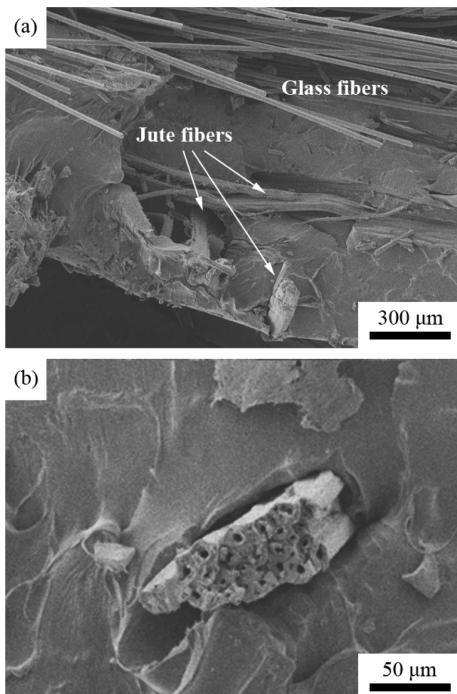


Fig. 8. SEM micrographs of the fracture surface of core foam (a) morphology near skin (b) jute fiber pull-out

유의 일부가 뽑혀져 나온 모습을 보여주고 있다. 파단면 전반에 걸쳐 이러한 파단 양상을 확인할 수 있었으며, 황마 단섬유와 폴리유산 간의 계면결합력이 강하지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 9는 황마 단섬유의 무게 비가 낮은 하위 세 그룹(6.67, 12.5, 22.2 wt.%)의 코어 파단면을 보여주고 있다. 황마 단섬유 무게 비가 6.67 wt.%인 코어 (a)에서는 황마 단섬유의 밀도가 다른 두 그룹과 비교하여 현저히 떨어지는 것과 공동이 상당한 부피를 차지하는 것을 확인할 수 있었으며, 황마 단섬유가 균열 면에서 그대로 뽑혀 나와 기지 내에 전파되는 균열의 진행을 우회시키지 못하는 모습을 보였다.

모든 실험군에 대해서 가장 높은 굽힘 강도를 보인 12.5 wt.% 무게 비의 코어 (b)에서는 섬유 표면에 기지재인 폴리유산이 결합된 채로 함께 뜯겨져 나온 모습을 관찰할 수 있었다. 섬유와 수지 계면간의 결합이 비교적 양호하여 응력의 전달이 효과적이었던 것으로 보인다.

이에 반해 무게 비가 22.2 wt.%인 시편의 파단면 (c)에서는 내부에 수지가 함침되어 있지 않은 황마 단섬유가 둉어리 형태로 뭉쳐 함께 뽑혀져 나온 모습을 관찰할 수 있었다. 무게 비 22.2 wt.%의 코어에서는 황마 단섬유의 분산이 효과적이지 않았으며 이로 인해 분말상의 폴리유산 수지가 혼합 시에 섬유 둉어리 내부로 침투하지 못하여 충분한 면적의 섬유-기지간 계면을 형성하지 못했음을 파악할 수 있었다.

또한 22.2 wt.% 이상의 황마 단섬유 무게 비를 갖는 실험

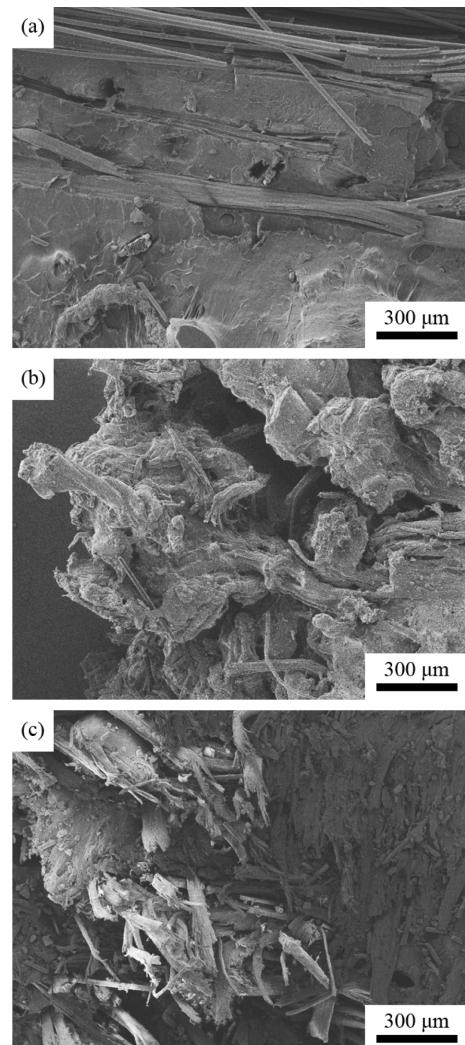


Fig. 9. SEM micrographs of the fracture surface of core foam with jute (a) 6.67 wt.%, (b) 12.5 wt.%, (c) 22.2 wt.%

군의 파단면에서는 분말 형태로 남아있는 폴리유산 수지를 확인할 수 있었는데 이는 수지 용융 시에 분말 형태의 수지 사이의 상호결합이 상대적으로 빈약하여 섬유와 수지 간의 충분한 결합이 이루어지지 못하였음을 나타낸다.

3.4 선행연구와의 물성 비교

Fig. 10은 단섬유 강화 복합재료의 굽힘 물성에 대한 선행연구와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 선행연구와의 비교를 위해 밀도 0.33 g/cm^3 , 굽힘 강도 92.7 MPa , 굽힘 탄성계수 5.29 GPa 를 나타낸 황마 단섬유 무게 비 12.5 wt.% 실험군의 데이터를 사용하였다.

밀짚과 그물상의 폴리프로필렌을 반복 적층하여 제작한 경량 복합재료의 굽힘 강도를 측정한 선행연구에서는 밀도 0.47 g/cm^3 , 최대 굽힘 강도 12 MPa , 그리고 최대 굽힘 탄성계수 1.4 GPa 를 보여 황마 단섬유 강화 샌드위치 복합재의 굽힘 강도 및 굽힘 탄성계수가 각각 7.7, 3.8배 높음을 확

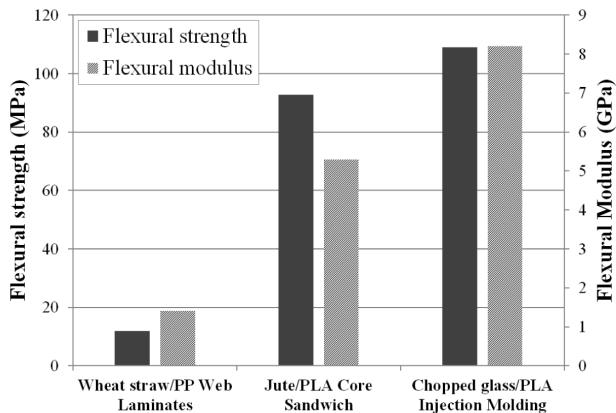


Fig. 10. Comparison of flexural properties of jute fiber reinforced PLA composite (jute 12.5 wt.%) from previous researches [1,17]

인하였다.

또한 사출 성형한 유리섬유 강화 폴리유산 복합재 대비 약 85%의 굽힘강도와 64.5%의 굽힘 탄성계수의 물성을 가지는 것으로 확인되었다. 유리섬유의 밀도가 황마 섬유 밀도의 1.9배임을 고려하면 황마 단섬유 강화 복합재의 비강도 및 비탄성 계수는 선행연구의 유리섬유 강화 복합재를 상회할 것으로 예상된다.

3.5 경제성 분석

위 소재의 경제성 분석을 위해 황마 단섬유 원자재의 단가는 2012년 방글라데시 산 기준 0.47 USD/kg[15], 폴리유산의 단가는 3 USD/kg를 적용하였다[16]. 비교를 위해 사출 성형된 유리섬유 강화 폴리유산 복합소재의 경우, 유리섬유의 단가는 1.2 USD/kg를 적용하였다[17]. 경제성 분석은 아래의 식 (2)와 (3)을 통해 계산하였다[18].

$$Q = \frac{\rho_c X_c}{\sigma_f} \quad (2)$$

$$X_c = \sum_{i=1}^n x_i V_i \frac{\rho_i}{\rho_c} \quad (3)$$

Q: 1 MPa 당 단위체적 당 복합재 단가[USD/m³/MPa]

ρ_c : 복합재의 밀도

X_c : 복합재의 무게 당 단가[USD/kg]

σ_f : 굽힘강도[MPa]

x_i : 각 요소의 무게 당 단가[USD/kg]

V_i : 각 요소의 체적분율

ρ_i : 각 요소의 밀도

실험군 중에서는 황마 단섬유 무게 비가 12.5 wt.%일 때의 굽힘강도 1 MPa 당 단위체적 당 복합재 단가는 0.010 USD/m³/MPa으로 가장 낮았다. 비교를 위해 유리섬유와 폴리유

산이 각각 3:7 무게비로 혼합되어 사출 성형된 유리섬유 강화 폴리유산 복합재를 분석해 본 결과, 굽힘강도 1 MPa 당 단위체적 당 복합재 단가는 0.033 USD/m³/MPa으로 확인되었다.

천연소재의 특성상 섬유의 생산량이 유리섬유에 비해 불규칙하고 또한 유리섬유의 공급 단가도 낮아지는 추세에 있지만, 후처리 공정의 적용을 통한 섬유-기지 간 물성 향상의 가능성이 열려있음을 고려할 때 천연섬유 강화 복합재료는 장기적 관점에서 친환경적이며 높은 비강도를 제공하는 새로운 재료로 탈바꿈 할 수 있는 가능성이 충분하다고 할 수 있다.

4. 결 론

황마 단섬유 강화 폴리유산 샌드위치 복합재를 제작하여 황마 단섬유 무게 비에 따라 기공 함량비 및 굽힘 특성의 변화를 관찰할 수 있었다. 밀도는 0.31-0.67 g/cm³로 선행 연구와 유사한 밀도를 가지고 있었으며, 굽힘 특성 고찰과 파단면 관찰을 통해 황마 단섬유와 분말 상 수지의 최적 배합 비로 황마 단섬유 무게 비가 12.5 wt.%일 때, 최대 굽힘 강도로 92.7 MPa, 최대 굽힘 탄성계수는 황마 단섬유 무게 비가 30.0 wt.% 일 때, 7.58 GPa로 선행연구[1]와 비교하여 향상된 굽힘 특성을 확인할 수 있었다. 또한 경제성 분석을 통해 사출성형 된 유리섬유 강화 폴리유산 복합재와 비교하여 굽힘 특성측면에서 경제성이 우수한 경량소재로 판단되었다. 위에 소개된 여러 궁정적 측면을 통해, 향후 다양한 분야에서 친환경적일 뿐만 아니라, 경제적인 소재로 친환경 샌드위치 복합재의 활용이 기대된다.

후 기

이 논문은 2014년도 BK21플러스 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Yi, Z., Shah, H., and Yiqi, Y., "Lightweight Composites from Long Wheat Straw and Polypropylene Web," *Bioresource Technology*, Vol. 101, 2010, pp. 2026-2033.
2. Mohanty, A.K., Misra, M., and Drzal, L.T., "Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World," *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 10, 2002, pp. 19-26.
3. Buckmaster, D., and Hwang, T.W., "Pedestrian Safety Validation of A High Performance Thermoplastic Composite Hood," *Proceeding of the 7th Automotive Composites Conference Exhibition*, 2007.
4. Holbery, J., and Houston, D., "Natural-fiber-reinforced Polymer Composites in Automotive Applications," *The Journal of The*

- Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 58, Issue. 11, 2006, pp. 80-86.
5. Stapleton, S.E., and Adams, D.O., "Core Design for Energy Absorption in Sandwich Composites," *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 10, 2002, pp. 19-26.
 6. www.lucintel.com/LucintelBrief/PotentialofNaturalfibercomposites-Final.pdf
 7. Bledzki, A.K., Reihmane, S., and Gassan, J., "Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composites," *Jornal of Applied Polymer Science*, Vol. 59, 1996, pp. 1329-1336.
 8. Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., and Arora, S., "Are Natural Fiber Composites Environmentally Superior to Glass Fiber Reinforced Composites?" *Composites: Part A*, Vol. 35, 2004, pp. 371-376.
 9. Nabi Saheb, D., and Jog, J.P., "Natural Fiber Polymer Composites: A Review," *Advanced in Polymer Technology*, Vol. 18, Issue. 4, 1999, pp. 351-363.
 10. Shim, J.H., Cho D.H., and Yoon, J.S., "Natural Fibers and Biocomposites," *Polymer Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, 2008, pp. 299-306.
 11. Bos, H.L., *The Potential of Flax Fibers as Reinforcement for Composite Materials*, Ph.D Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Nederland, 2004.
 12. Sparnins, E., *Mechanical Properties of Flax Fibers and Their Composites*, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2006.
 13. Roh, J.U., and Lee, U.I., "Manufacture of Continuous Glass Fiber Reinforced Polylactic Acid (PLA) Composite and Its Properties," *Composite Research*, Vol. 26, No. 4, 2013, pp. 230-234
 14. EL-Dessouky, H.M., and Lawrence, C.A., "Ultra-lightweight Carbon Fibre/Thermoplastic Composite Material Using Spread Tow Technology," *Composite Part B: Engineering*, Vol. 50, 2013, pp. 91-97.
 15. www.jute.org/IJSG%20Publications/Jute%20Matters%20Volume%202012Issue%205%202013.pdf
 16. www.alibaba.com//trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=glass+fiber
 17. Huda, M.S., Drzal, L.T., Mohanty A.K., and Misra M., "Chopped Glass and Recycled Newspaper as Reinforcement Fibers in Injection Molded Poly(lactic acid)(PLA) Composites: A Comparative Study," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 1813-1824.
 18. d'Almeida, J.R.M., "Analysis of Cost and Flexural Strength Performance of Natural Fiber-polyester Composites," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 40, No. 2, 2001, pp. 205-215.