

30kW 풍력터빈용 아마섬유 복합재 블레이드 제조를 위한 구조 시험 분석 연구

신혜진*[†] · 이지현** · 문성영** · 이정환*

Structural Test Analysis Study for Manufacturing of Flax Fiber Composite Blades for 30kW Wind Turbines

Hye-Jin Shin*[†], Ji-Hyun Lee** , Sung-Young Moon** , Jounghwan Lee*

ABSTRACT: Recently, as global environmental issues for sustainable development, such as carbon neutrality, have emerged, disposal methods of glass fiber composites, a material of existing wind turbines, have become a problem. To solve this problem, in this study, 30kW wind turbine blades were manufactured using flax fiber-based composites, which are eco-friendly natural fiber composites that can replace existing glass fiber composites, and their suitability was evaluated. First, mechanical strength tests were conducted to verify the feasibility of using eco-friendly natural flax fiber composites as a wind turbine blade material, and as a result, better strength were confirmed compared to previous studies on the properties of flax fiber composites. In addition, the suitability was confirmed through a static strength performance evaluation test to measure the static strength of the flax fiber composite blade using the manufactured 30kW class flax fiber composite blade.

초 록: 최근 탄소 중립 등 지속 가능한 발전을 위한 지구환경 문제가 대두되면서 기존 풍력터빈의 소재인 유리 섬유 복합재의 폐기 시 처리 방안이 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 기존의 유리섬유 복합재를 대체할 수 있는 친환경 복합재인 아마섬유 기반 복합재를 활용하여 30kW 풍력터빈 블레이드를 제조하고 적합성을 평가하였다. 먼저 친환경 천연 아마섬유 복합재의 풍력터빈 블레이드 소재로 활용 가능성을 검증하기 위해 기계적 강도 시험을 수행하였으며, 그 결과 선행 아마섬유 복합재 물성 연구 대비 좀 더 우수한 강도가 측정된 것을 확인하였다. 또한 제작된 30kW 급 아마섬유 복합재 블레이드를 활용하여 아마섬유 복합재 블레이드의 정적 강도를 측정하는 정적강도 성능평가 시험을 통하여 적합성을 확인하였다.

Key Words: 소형 풍력터빈 (Small wind turbine), 천연섬유 복합재(Natural fiber composite), 아마섬유(Flax fiber), 기계적 물성(Mechanical property), 블레이드 구조 시험(Blade structural test)

1. 서 론

최근 유엔기후변화협약에 의한 온실가스 감축목표가 상향되면서 온실가스 배출 저감은 당면한 문제로 대두되고

있다. 국내 온실가스 배출량은 Table 1과 같이 2018년 기준 대부분 에너지분야에서 발생하여 전체 배출량의 86.9%를 차지하고 있으며, 정부에서는 2050 탄소 중립 달성을 위해 신재생에너지에 투자하고 있다[1]. 풍력 발전 분야는 태양

Received 28 December 2022, received in revised form 9 January 2023, accepted 10 February 2023

*Korea Advanced Manufacturing Research Institute

**Samwon Millennia

[†]Corresponding author (E-mail: h.shin@kamri.re.kr)

광 발전과 함께 유력한 신재생에너지분야 중에 하나로 최근에는 소음과 주민 민원 등의 문제로 육지와 먼 해상풍력과 소음 등의 피해가 적은 도시형 소형풍력 등이 떠오르고 있다.

탄소 중립 등 지속 가능한 발전을 위한 지구환경 문제가 대두되면서 기존의 유리섬유로 제작된 풍력터빈의 폐기 시에 발생하는 폐기물의 처리 방법이 문제가 되고 있다. 기존 복합재료의 강화섬유로 주로 사용되는 유리섬유는 제조과정에서도 많은 양의 이산화탄소가 발생하며, 복합재의 사용 후 폐기 시에도 자연적으로는 분해되지 않는다. 또한 복합재 폐기물 소각시에도 유리섬유는 소각되지 않고 잔여 폐기물로 남게 되어 심각한 환경문제를 야기하고 있다[2]. 이를 해결하기 위해 아마(flax), hemp 등의 천연섬유를 복합재 강화재로 사용하려는 시도가 증가하고 있으며, 최근에는 유럽을 중심으로 자동차 부품, 스포츠용품 등으로 적용되고 있다[3]. 천연섬유는 생분해가 가능한 천연수지와 결합한 복합재료로 제작될 경우 완전 생분해성을 가질 수 있으며, 소각 시에도 잔여 폐기물 없이 완전 소각할 수 있다[4]. 또한 천연섬유 작물을 경작하는 과정에서도 많은 양의 CO₂를 흡수할 뿐만 아니라 재활용이 가능하고, 생산 시 에너지가 적게 소요되는 장점이 있어 매우 친환경적인 소재이다[4].

천연섬유로 제조된 복합재는 충격성능이 탁월하고 유리섬유에 비해서도 무게대비 강도 및 강성이 크게 뒤쳐지지 않아 풍력터빈 블레이드 제조를 위한 복합재 섬유강화재로 충분히 활용가능하다[3]. 천연섬유의 강도나 탄성계수는 기존 풍력터빈용 복합재 재료로 많이 활용되는 유리섬유의 절반 정도로 나타나지만 밀도 또한 유리섬유의 50~60% 정도로 동일 중량으로 비교 시 유리섬유와 견줄만한 물성을 나타낸다[4]. 특히 천연섬유 중에서도 아마, 황마, 대마 등의 섬유는 셀룰로오스 함량이 높아 우수한 기계적 강도를 나타내므로 복합재 구조강화재로 적합하다[5]. 아마 섬유 복합재를 풍력터빈 블레이드 소재로 활용하려는 연

구는 국내외적으로 시도된 적이 있으나 주로 10kW 전후의 소형 풍력터빈 블레이드 제작 연구에서 그쳤으며, 그 이상 크기의 풍력 블레이드 상용화 사례는 없는 상황이다[6,7]. 본 연구에서는 기존의 유리섬유 복합재를 대체할 수 있는 친환경 천연 아마섬유 복합재를 제조하여 기계적 물성 시험과 30kW 급 아마섬유복합재 블레이드를 활용한 구조 시험을 수행하여 30kW 급 풍력터빈 블레이드 소재로 활용 가능성을 검증하였다.

2. 아마섬유 복합재 기계적 강도 시험 분석

30kW급 풍력터빈 블레이드의 소재로 활용 가능 여부를 검증하기 위해 아마섬유 복합재의 기계적 강도를 평가하여 선행연구에서 수행된 유리섬유 복합재 시험 결과와 비교하였다. 천연섬유 복합재 강도 평가를 위해 Table 2와 같이 아마섬유 UD 패브릭을 사용하였으며, 에폭시 수지와 비닐에스테르 수지를 각각 사용하여 복합재 물성시편을 제조하였다. 아마섬유 복합재 평판은 Fig. 1과 같이 RIM(Resin Infusion Molding) 공정을 사용하였고, ASTM 절차에 준하여 시편으로 제작하였다.

먼저 아마섬유 패브릭과 에폭시 수지, 비닐에스테르 수지를 사용하여 시편을 제작하고 공인시험기관인 중소조선 연구원에 의뢰하여 Table 3에 기재된 장비로 강도 측정 시험을 수행하였으며, 시험 결과는 7개의 시편을 사용하여 평

Table 2. Materials for flax composite manufacturing

Materials	Manufacturer	Model
Flax fabric (UD)	BCOMP	ampliTex 5025
Epoxy	Kukdo chemical	Epoxy Resin KFR-120
Vinyl ester	Polynt composite	EPOVIA [®] KAYAK KRF-1031

Table 1. Greenhouse Gas Emissions by Sector [1]

Sectors	2017	2018	Emissions Propotion by Sector in 2018 (%)	Compared to 2017 (%)
Total emissions (Excluding LULUCF)	709.7	727.6	100	2.5
Net emissions (including LULUCF)	668.3	686.3	-	2.7
Energy	615.7	632.4	86.9	2.7
Industrial Processes	55.9	57.0	7.8	1.9
Agriculture	21.0	21.2	2.9	1.1
LULUCF	-41.5	-41.3	-5.7	-0.5
Waste	17.2	17.1	2.4	-0.7

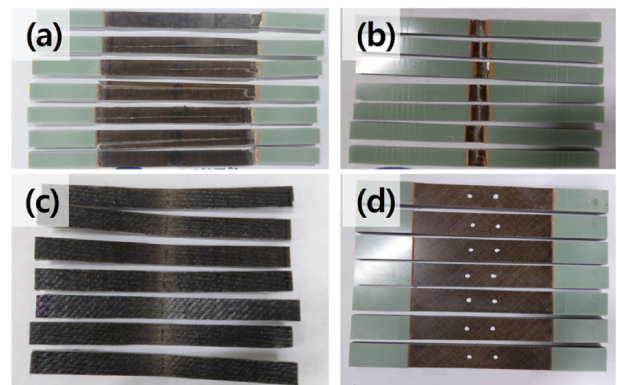


Fig. 1. Natural fiber composite specimen after mechanical test, (a) tensile (ASTM D3039), (b) compression (ASTM D3410), (c) flexure (ASTM D790), (d). In-plane shear (ASTM D3518)

Table 3. Equipment for measurement

Equipment	Manufacturer	Model	Test condition
Universal testing machine	Instron	Model 5985	Temperature (18~22°C), Humidity (45~55%)
Universal testing machine	Shimadzu	AG-50KNX	
Universal testing machine	Shimadzu	UH-FX 500KN	

Table 4. Mechanical properties of Flax/Epoxy composites (Strength (MPa))

Parameters (Strength (MPa))	Literature [8]		Test results
	Glass/epoxy	Flax/epoxy	Flax/epoxy
Tensile	1143.0	193.2	229.68 (S. Dev.: 18.03)
Compressive	778.73	131.77	146.24 (S. Dev.: 1.12)
Flexural	1161.82	234.61	297.45 (S. Dev.: 12.60)
Shear [MPa]	63.66	26.88	31.98 (S. Dev.: 1.03)

Table 5. Mechanical properties of Flax/Vinyl ester composites (Strength (MPa))

Parameters (Strength (MPa))	Literature [5]	Test results
	Flax/vinylester	Flax/vinylester
Tensile	227.2	278.96 (S. Dev.: 18.03)
Compressive	-	74.72 (S. Dev.: 18.03)
Flexural	252.1	256.48 (S. Dev.: 18.03)
In Plane Shear	27.6	30.93 (S. Dev.: 18.03)

균값을 결과값으로 제시하였다.

비교를 위해 제시된 아마섬유 복합재 시편 시험 결과는 Table 2와 같이 선행연구를 통해 영국의 첨단 복합재 제조 센터(Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, The University of Sheffield, UK)에 의뢰하여 수행된 결과이다[5,8]. 아마섬유 복합재의 기계적 강도 시험결과는 Table 4, Table 5와 같이 나타내었다.

시험 결과 아마섬유/에폭시 복합재보다 아마섬유/비닐에스테르 복합재의 인장강도가 23% 정도 높게 나타났으나, 압축강도는 절반 정도인 51% 정도 낮게 나타났으며, 굽힘강도와 전단 강도 시험 결과 또한 아마섬유/에폭시 복합재가 다소 높게 측정되었다. 선행연구에서 수행된 시험 결과

와 비교한 결과에서는 Flax/epoxy 복합재, Flax/vinylester 복합재에서는 동일 소재 비교 시 우수한 성능을 보였다. 유리섬유 복합재와의 비교에서는 유리섬유 복합재 강도의 약 20% 정도에 해당하는 인장 강도를 나타내어 성능적으로 열세인 것으로 나타났으나, 아마섬유의 밀도는 유리섬유의 절반 정도이므로 비강도 차이는 다소 줄어들며, 최적화 설계를 통해 낮은 물성 문제를 해결하였다[5,8].

3. 30kW급 풍력터빈 블레이드 정적 하중 시험

3.1 30kW급 풍력터빈 블레이드 설계 및 제작

30kW급 풍력터빈 블레이드의 설계 및 구조해석은 선행 연구를 통해 수행되었으며, 그 결과 Fig. 2(a)와 같이 Hyper-X를 사용하여 최적화 설계를 수행하였다[8]. 이 최적화를 통해 설계된 아마섬유 복합재 블레이드의 중량은 기존 설계 방법으로 설계된 유리섬유 풍력블레이드의 중량에 비해 7.4% 무게가 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 설계

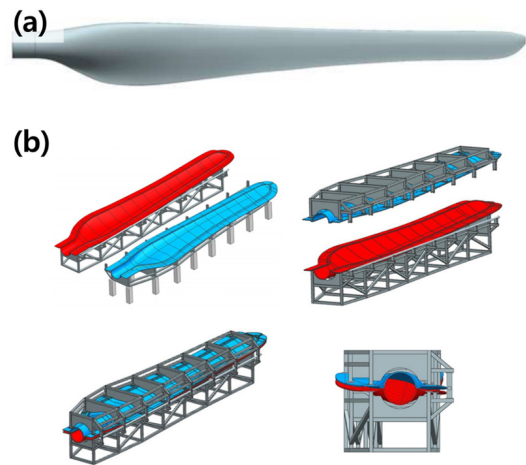


Fig. 2. Natural fiber composite specimen after mechanical test, (a) tensile (ASTM D3039), (b) compression (ASTM D3410), (c) flexure (ASTM D790), (d) In-plane shear (ASTM D3518)

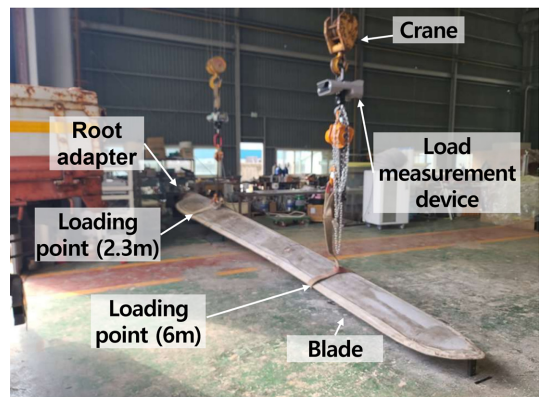


Fig. 3. Test setup of Natural fiber composite wind turbine blade

를 기반으로 길이 7.4 m, 최대 코드길이 0.956 m의 블레이드를 제작하였다.

제조를 위해 Fig. 2(b)와 같이 몰드를 설계, 제작하였으며, 제작과정은 핸드레이업 방식으로 적층하여 레진 인퓨전 몰딩(Resin infusion molding) 방식으로 제조하였다. 완성된 블레이드는 Fig. 3과 같이 나타내었다.

3.2 30kW급 풍력터빈 블레이드 정적 하중 시험

아마섬유 복합재로 제작된 30kW급 풍력터빈 블레이드의 적합성을 확인하기 위해 정적 하중 시험을 수행하였다. 아마섬유 복합재 블레이드의 정적시험을 위해 IEC 61400-23 로터 블레이드의 실 규모 구조 시험 표준에 따라 시험 장치를 설치하고 공인 시험기관인 한국산업기술시험원의 입회 하에 시험을 수행하였다[9]. 시험장치는 자체 개발하였으며, 블레이드 고정을 위해 블레이드의 루트부를 고정장치에 부착하여 지지하였고 고정장치는 철골구조로 지반에 고정시켜 설치하였다. 시험환경은 온도 27.4(±5.0)℃, 습도는 55.0(±10.0) % R. H.이며, 블레이드의 정하중 시험 셋업은 Fig. 3과 같이 루트로부터 2.3 m, 6 m 두 곳에 하중 부하지점에 슬링으로 고정하였고 하중부하장비(천장 크레인)를 통해 하중을 모사하였다. 하중을 유지하는 동안 Table 6의 측정장비를 통해 하중과 변위를 측정하였다. 시험하중은 블레이드 설계상 한계하중을 고려하여 Table 7과 같이 각 슬링 위치에서 7단계로 나누어 가하고 각 하중단계에서

10초간 정지하였다.

하중은 크레인과 슬링 사이에 설치된 하중측정장비를 통해 측정하였으며, 변위는 각각 하중 부하지점에서 레이저 변위센서를 지면과 수직하게 설치하여 측정하였으며, 이때 초기 변위는 2.3 m 지점에서 342.5 mm, 6 m 지점에서 236.2 mm으로 측정되었으며, 변위 측정 시 초기값을 고려하였다.

하중단계별 블레이드 정적 강도 측정 결과는 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 1차 슬링부(2.3 m)에서 하중을 약 100 kg 정도씩 증가시켜 블레이드의 변형량을 측정한 결과 Fig. 4와 같이 변형량이 선형적으로 증가하여 최대 39.9 mm까지 변형되는 것을 확인하였다. 2차 슬링부(6 m)에서도 하중을 약 2~3 kg 정도씩 증가시켜 블레이드의 변형량을 측정한 결과 Fig. 5와 같이 변형량이 선형적으로 증가하여 최대 100.1 mm까지 변형되었다.

변형량 분석 결과 한계 하중까지 하중을 증가시켰을 때 블레이드의 변형량은 1차 2차 측정 위치 모두에서 선형의 경향성을 유지하였으며, 이를 통해 블레이드의 파손 및 좌굴 가능성은 낮은 것으로 분석되었다. 또한 측정 후 육안 검

Table 6. Sensors and device for measurement

Equipment	Manufacturer	Model	Device number	Next calibration date
Length meter	KOISS	5.0m	-	2023.05.24
Laser displacement sensor	BOSCH	GLM250VF	510266815	2023.05.24
Load measurement sensor (Crane scale)	CAS	CASTON2	OT180	2023.06.09
			OT145	2023.06.09

Table 7. Test load by position

Load level	2.3 m	6 m
1	101.2 kg	2.4 kg
2	202.0 kg	5.0 kg
3	304.0 kg	7.0 kg
4	404.0 kg	9.0 kg
5	506.0 kg	12.0 kg
6	606.0 kg	14.0 kg
7	708.0 kg	17.0 kg

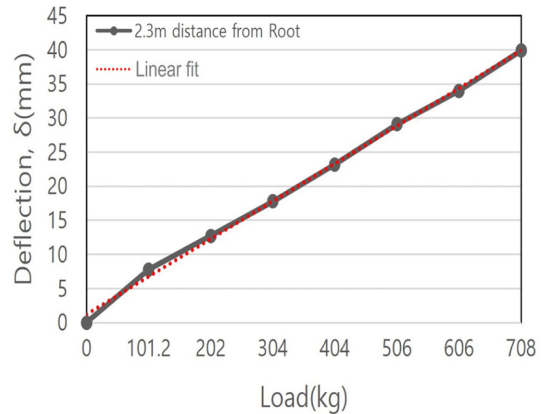


Fig. 4. Displacement measurement result by load (2.3m sling position)

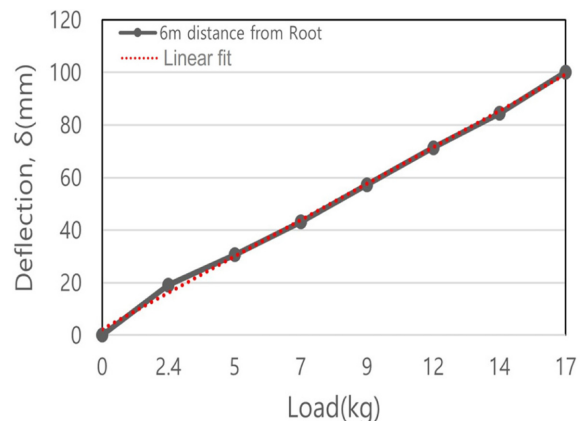


Fig. 5. Displacement measurement result by load (6m sling position)

사를 통해 블레이드의 파손 여부를 검증한 결과 파손이 발생하지 않은 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 친환경 천연 아마섬유를 활용한 기계적 특성 시험과 30kW 급 아마섬유 복합재 블레이드 제조하여 이를 활용한 구조 시험을 수행하였다. 먼저 아마섬유 패브릭과 에폭시, 비닐에스테르 등의 수지를 활용하여 시편을 제조하고 각 수지별 기계적 강도 특성 측정 시험을 수행한 결과 아마섬유/에폭시 복합재가 가장 적합함을 확인하였다. 또한 이를 바탕으로 30kW 급 아마섬유 복합재 블레이드를 제조하여 정적 하중시험 장치를 구성하여 정하중시험을 수행한 결과 30kW 급 풍력터빈 블레이드로 적합성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지기술 개발사업의 지원으로 산업통상자원부로부터 재원(20203030020400)을 지원받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. "Fourth Biennial Update Report," *The Government of the Republic of Korea*, 2021, pp. 1-164.
2. Lee, H.G., "A Direction for the Development of High Performance Concrete using Recycled Waste Low-grade FRP and Waste Glass Sludge," *Magazine of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 17, No. 1, 2022, pp. 15-21.
3. Park, K.L., Kong, C.D., Lee, H.S., and Park, H.B., "A Study on Design of 500W Class High Efficiency Horizontal Axis Wind Turbine System (HAWTS) Blade Using Natural Fiber Composites," *Composite Research*, Vol. 28, No. 3, 2015, pp. 104-111.
4. Cho, D.H., and Kim, H.J., "Naturally Cyclable Biocomposites," *Elastomers and Composites*, Vol. 44, No. 1, 2009, pp. 13-21.
5. Park, H.B., Kong, C.D., Lee, J.H., Kim, I.G., and Lee, H.Y., "Investigation on Mechanical Properties of Flax/Vinyl Ester Natural Fiber Composite," *Composite Research*, Vol. 27, No. 1, 2014, pp. 19-24.
6. Shah, D.U., Schubel, P.J., and Clifford, M.J., "Can Flax Replace E-glass in Structural Composites? A Small Wind Turbine Blade Case Study," *Composites: Part B*, Vol. 52, 2013, pp. 172-181.
7. Park, H.B., "A Study on Manufacturing and Structural Test of Wind Turbine System Blade using Natural Composite," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2017, pp. 30-35.
8. Lee, J.H., Collier, C., Ainsworth, J., Cho, K.N., and Lee, Y.S., "A Study on Failure Strength of Composite Key Joint," *Proceeding of T EAM2020/21- The 34th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures*, Istanbul, Turkey, Dec. 2021, pp. 14-20.
9. IEC 61400-23, *Structural Test for Full-scale Wind Turbine Rotor Blade*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2014.