

아마/비닐 에스테르 자연 섬유 복합재료의 기계적 특성 분석 연구

박현범* · 공창덕**† · 이정환*** · 김인권**** · 이호연*****

Investigation on Mechanical Properties of Flax/Vinyl Ester Natural Fiber Composite

Hyunbum Park*, Changduk Kong**†, Jeongwan Lee***, Ingwon Kim****, Hoyeon Lee*****

ABSTRACT: In this study, an investigation on mechanical properties of flax/vinyl ester natural fiber composite was performed as a precedent study on the design of eco-friendly structure using flax/vinyl ester composite. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding(VARTM) manufacturing method was adopted for manufacturing the flax fiber composite specimen. The mechanical properties of the manufactured flax composites were compared with flax composite data cited from some references. Based on this, the experimental data showed that the flax/vinyl ester composite has some advantages when it is applied to environment-friendly structure.

초 록: 본 연구에서 아마/비닐에스테르(Flax/vinyl ester)를 적용한 친환경 구조물 설계를 위한 선행 연구로서 아마/비닐 에스테르 자연 섬유 복합재료의 기계적 물성치를 분석하였다. 시편 제작을 위해 VARTM 제작 공법이 적용되었다. 참고문헌에서 제시한 자연 섬유 복합재료의 물성치와 본 연구에서 제작된 시편의 물성치를 비교하였다. 이 결과를 바탕으로 아마/비닐 에스테르 복합재료가 친환경 구조물에 적용하는 것이 유리함을 확인하였다.

Key Words: 자연 섬유 복합재료(natural fiber composite), 아마 섬유(flax fiber), 비닐 에스테르 수지(vinyl ester resin), 기계적 물성치(mechanical properties)

1. 서 론

최근 친환경 소재에 대한 관심이 증대되면서 복합재료 분야에서도 자연에서 획득된 친환경 섬유 연구가 활발하게 수행되고 있다. 자연 섬유는 카본 섬유와 같은 고강도 섬유 보다는 강도가 낮지만 유리 섬유와 비교했을 때는 거의 유사한 강도를 지닌다. 따라서 적절한 수지를 채택했을 때 상당히 유리한 복합재료로 적용 가능하다.

본 연구에서 향후 항공기 출입문 및 내장재 등에 친환경

재료를 적용하여 설계하기 위해 자연 섬유 물성치를 평가하였다. 적용이 용이한 자연 섬유를 선정하기 위해 각 섬유의 기계적 강도를 분석하여 비교하였다. 다양한 자연 섬유의 종류를 분석한 후 자연섬유에 적용될 수지를 분석하여 각 수지를 적용했을 때 강도 특성 차이를 비교하였다. 최종 친환경 구조물 설계를 위해 선정된 섬유 및 수지는 아마(Flax) 섬유와 비닐 에스테르(Vinyl ester) 수지로서 비용이 저렴하면서 타 자연 섬유보다 강도가 우수한 것을 확인하였다[1]. 제작 공법은 VARTM 제작 공법이 채택되었으며 아마/비닐

Received 2 October 2013, received in revised form 24 February 2014, accepted 25 February 2014

*호원대학교 국방기술학부 항공정비기술학전공

**†조선대학교 항공우주공학과, Corresponding author (E-mail: cdgong@chosun.ac.kr)

***AMRC with Boeing, The University of Sheffield

****전남테크노파크

***** (주)지우테크

에스테르 시편을 제작하여 시편 시험을 통해 기계적 물성치를 분석하였다.

2. 자연 섬유

2.1 자연 섬유의 종류

복합재료로 적용되는 자연 섬유는 크게 유기물과 무기물로 구분된다. 유기물은 식물의 섬유가 대표적인 복합재료이고 무기물은 광물 섬유 등으로 분류된다. 본 연구에서 다루어지는 자연 섬유는 식물 섬유인 유기물로서 그 종류를 살펴보면 아마(Flax), 대마(Hemp), 황마(Jute), 용설란 종류인 사이잘(Sisal), 헤네켄(Henequen), 아자열매 겉껍질인 코이어(Coir) 등이 대표적인 자연 섬유로 사용되고 있다[1-3].

2.2 아마 섬유 선정

본 연구에서 향후 친환경 구조물 설계를 위해 다양한 자연 섬유의 특성을 비교하였다. 먼저 섬유질의 함량을 비교했을 때 아마는 71%, 황마는 65%, 대마는 72%, 사이잘은 69%로 분석되었다. 또한 기계적 강도를 비교한 결과 아마 섬유가 우수한 것으로 검토되었다[3]. Table 1에 대표적인 자연 섬유의 물성치를 제시하였다[3]. 따라서 본 연구에서는 아마 섬유를 향후 자연 섬유 구조물에 적용할 재료로 선정하였다. 아마 섬유는 진동 흡수 능력도 뛰어나며 가격이 다른 섬유와 비교했을 때 저렴하고 쉽게 구매할 수 있다. 아마 섬유는 유럽에서 많이 생산되고 있으며, 프랑스가 공급량의 80%를 점유하고 있다. 최근에 아마 섬유는 항공기의 내장재, 자동차의 내장재, 건축 구조물, 원예공예, 휴대폰 케이스 등에 활용도가 증가하고 있다[2].

3. 자연 섬유용 수지

자연 섬유에 사용되는 수지는 크게 열가소성(Thermoplastic) 수지와 열경화성(Thermoset) 수지로 구분된다. 대표적인 열

Table 2 Mechanical properties of thermosetting matrix materials

Property	Polyesters	Vinyl esters	Epoxies	Phenolics
Tensile strength (MPa)	34-105	73-81	55-130	50-60
Flexural strength (MPa)	70-110	130-150	110-150	80-135
Specific gravity	1.1-1.4	1.1-1.3	1.2-1.3	1.2-1.3

가소성 수지를 분석해 보면 폴리에틸렌(Polyethylene), 폴리프로필렌(Polypropylene), 폴리아미드(Polyamide)이다. 열경화성 수지는 에폭시(Epoxy), 비닐 에스테르(Vinyl ester), 페놀(Phenolic) 등이 사용된다[4]. 최근에는 생분해성 수지도 개발되고 있는데 열대 나무의 열매 껍질에서 채취된 캐슈넛 셸 수지(CNSL: Cashew nut shell oil resin)가 대표적인 자연 수지로 활용되고 있다[5].

복합재료 섬유에 적용되는 수지는 열경화성 수지가 많이 적용된다. 본 연구에서 폴리에스테르, 비닐 에스테르, 에폭시, 페놀 수지에 대한 기계적 특성을 분석하여 Table 2에 제시하였다[4]. 페놀 수지는 화염 저항성이 뛰어나지만 제작 공정이 어려운 단점을 지니고 있다. 에폭시 수지는 기존의 탄소, 유리 섬유 복합체에 많이 사용되고 있고, 자연 섬유 복합체에도 연구를 위하여 다양하게 사용되고 있는데 단점은 상대적으로 재료 비용이 높은 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 물성치가 에폭시에 비해 다소 떨어지지만 재료 비용이 저렴한 비닐 에스테르를 일차적으로 선정하였고 에폭시는 비교연구 수지로서 사용되었다.

최근에는 자연 섬유 복합재료를 제작할 때 수지도 자연에서 획득할 수 있는 생분해성 수지를 적용하는 연구가 진행 중이다. 대표적인 수지가 식물의 오일에 기반을 둔 수지가 있으며, 단백질 섬유에 기반을 둔 수지도 있다. 또한 자연 수지에 기반을 둔 폴리우레탄 수지 및 페놀 수지나 젯산에 기반을 둔 열경화성 수지 등도 연구되고 있다. 캐슈넛 셸 수지는 열매 껍질에서 채취한 오일을 페놀 포르말데히드 수지와 중합시켜 제조된 수지로서 최근 자연 섬유의 수지로 활용도가 증가하고 있다[5].

Table 1 Mechanical properties of natural fibers

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Jute	1.3-1.45	393-773	13-26.5
Hemp	-	690	-
Kenaf	-	-	-
Flax	1.5	345-1100	27
Ramie	1	400-938	61.4-128
Sisal	1.45	468-640	9.4-22.0
Coir	1.15	131-175	4-6
Lyocell	1.5	1400	36

4. VARTM 제조 공법

4.1 VARTM 제조 공법 선정

최근 들어 복합재료 대형 구조물 성형 및 생산성 등의 향상을 고려하여 RTM(Resin Transfer Molding) 공법이 부각되고 있다. RTM은 성형품 구조 중에서 섬유로 구성되는 부분인 프리폼(Preform)을 미리 제작 해두고, 그것을 금형에 장착해서 수지를 주입하는 것으로 복합재료를 성형하는 방법이다. 점도가 낮은 고분자상의 수지를 사용하면, 저압 0.7 MPa 정도로 수지 주입이 가능하기 때문에 성형장치와 금형이 간단하게 되고 사출 성형이나 압축 성형에 비교해

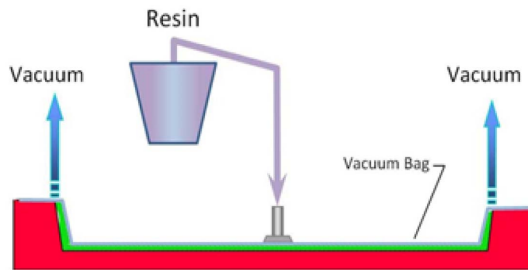


Fig. 1. VARTM manufacturing method

서 성형 비용을 절감할 수 있다[6].

본 연구에서는 제작 공법으로 RTM 공법을 개선한 VARTM(RTM-Light) 성형법을 채택하였다. RTM-Light 공법은 양쪽 면이 모두 견고한 금형으로 되어 있는 RTM과는 달리 한쪽 면은 견고한 금형을 사용하고 다른 면은 진공과 함께 유연한 금형을 사용하여 압력 차를 이용하여 금형 내부에 적층된 프리폼에 수지를 신속하게 함침시켜 성형하는 방법이다. 본 공법은 진공의 흡입력과 진공 면에 가해지는 수직 압력을 이용하여 금형 내부의 기포를 줄여 섬유 체적율을 높이면서 수지 충전시간을 짧게 할 수 있어 대형 구조물 제작에 손쉽게 적용이 가능한 장점이 있다. 본 공법은 기존 RTM 성형과 오토클레이브 공법에 비해 성형비용이 적게 들면서 수축률 공정보다 매우 좋은 품질의 제품 성형이 가능한 기술로 최근 각광을 받고 있는 성형법이다. VARTM 제작 공법의 개념도를 Fig. 1에 명시하였다.

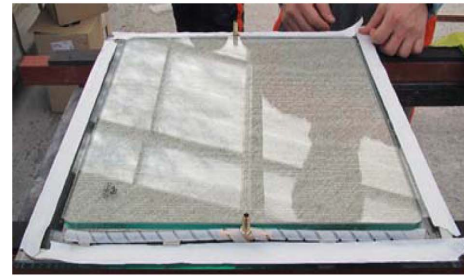
4.2 VARTM 제조 공법을 적용한 아마/비닐 에스테르 복합재 시편의 제작

본 연구에서 제작 공법으로 채택된 VARTM 공법을 활용하여 아마/비닐에스테르 복합재 시편을 제작하고 기계적 특성을 평가하였다. 시편 제작에 적용된 아마 섬유는 영국의 Composite Evolution 사[10]에서 구매한 섬유이며, 일방향(UD) 및 $\pm 4^\circ$ 로 직조된 2-D Fabric 두 가지 형태의 섬유를 제작하여 물성치를 평가하였다. 수지로는 CCP Composite 사의 KRF-1031 비닐 에스테르를 선정하였다. 시편 제작은 Table 6에 제시한 ASTM의 물성치 평가 규정에 의거하여 제작하였다.

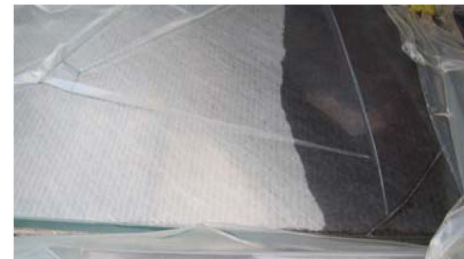
아마 섬유의 강도를 증가시키기 위한 방법으로 잔여 수분 제거를 위한 전처리가 필요하다. 따라서 오븐에서 110°C 온도로 2시간 아마 섬유를 건조시킨 후 적층하였다. 적층된 아마 섬유에 수지를 주입하고 진공상태를 유지하면서 시편을 성형하였다. 시편 성형 온도는 80°C 온도에서 2시간 후 120°C 온도로 1시간 유지하여 성형하였다. 시편의 제작 과정을 Fig. 2에 명시하였다. 제작 후에 시편의 결함 유무를 확인하기 위해서 C-Scan 검사법이 적용되었다. Fig. 3은 2-D Fabric 아마 복합재 시편의 C-Scan 시험 결과이다. 기공도를 검토한 결과 2% 이하인 것으로 검토되었다.



(a) Flax dry using oven



(b) Setting up resin injection and vent



(c) Resin injection and curing under vacuum condition

Fig. 2. Manufacturing process of specimen

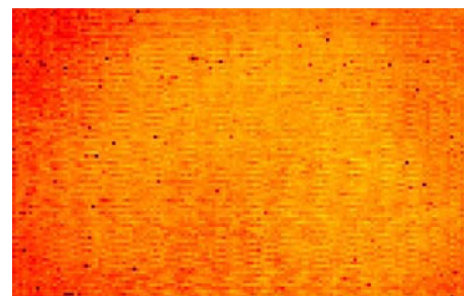


Fig. 3. C-scan image of flax laminate (2-D Fabric)

5. 아마 섬유 복합재료 기계적 물성치

5.1 선행 연구의 아마/열경화성 수지 복합재 시편의 기계적 물성치 분석

본 연구에서 VARTM 공법으로 제작된 아마 시편의 물성치를 분석하기 전에 선행 연구 결과를 분석하여 제시된 아마/열경화성 수지 복합재료 시편의 기계적 물성치를 나타내었다.

열경화성 수지로 가장 적용 범위가 넓은 수지는 에폭시 수지이다. Oksman는 섬유체적비가 21~47%인 RTM 공법의

로 제작된 UD 아마/에폭시 시편의 강도를 분석하였다. 분석결과 섬유방향 탄성계수는 15~39 GPa, 인장강도는 132~280 MPa로 나타났다[7].

Van de Weyenberg 등은 섬유체적비가 50%인 유사한 아마/에폭시 섬유를 시험한 결과 섬유방향 탄성계수가 32 GPa, 인장강도는 268 MPa의 결과로 나타났다[8]. 또한 섬유의 수분 제거를 위한 표면 처리 효과로 인한 굽힘 강도 변화 효과를 분석하였다. 1~3%의 수산화나트륨 표면 처리 후 오토 클레브 성형을 수행하였다. 섬유체적비는 40%로서 시편의 굽힘 강도 분석 결과 표면 처리 후 강도가 개선되는 결과를 나타내었다. Table 3에 수산화나트륨 표면 처리에 따른 강도 개선 결과를 명시하였다.

본 연구와 동일한 재료인 아마/비닐 에스테르 복합재료 물성치 평가 연구는 Hughes 등이 수행하였다. 섬유체적비 25%인 UD 아마 섬유와 비닐 에스테르 수지를 적용하여 VARTM 공법으로 제작하였다. 물성치 평가는 인장, 굽힘, 전단에 대한 강도와 탄성 계수를 나타내었다. Table 4에 각각의 물성치를 명시하였다. 또한 제시된 연구 결과에서 동일한 섬유체적비 25%인 Fabric 아마 섬유와 비닐 에스테르 시편의 물성치도 평가하였다. 제작 공법은 UD 섬유와 동일하게 VARTM 공법으로 제작되었다. Table 5에 Fabric 아마/비닐 에스테르 복합재료의 물성치를 나타내었다[9].

Table 3. Flexural properties of untreated and treated flax fiber/epoxy composites (Fiber volume fraction: 25%)

Flexural Property		Fiber Treatment			
		Untreated	NaOH		
			1%	2%	3%
Longitudinal direction	Strength [MPa]	218	237	261	283
	Modulus [GPa]	18	23	20	22
Transverse direction	Strength [MPa]	8	20	15	19
	Modulus [GPa]	0.4	2.3	1.1	1.2

Table 4. Mechanical properties of UD flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction: 25%)

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	122.4	13.2
Flexure	170.0	10.3
In Plane Shear	51.3	2.1

Table 5. Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction: 25%)

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	62.0	7.9
Flexure	107.3	6.7
In Plane Shear	41.1	1.7

5.2 아마/비닐 에스테르 복합재 시편의 기계적 물성치 시험

본 연구에서 VARTM 공법으로 제작된 아마 시편의 물성치를 분석하기 전에 선행 연구 결과를 분석하여 제시된 아마/열경화성 수지 복합재료 시편의 기계적 물성치를 검토하였다. 본 연구에서 선행 연구를 통해 평가된 아마 섬유의 기계적 특성과 비교하기 위해 VARTM 공법으로 제작된 아마/비닐 에스테르의 UD 시편과 Fabric[45/-45] 시편의 기계적 물성치를 평가하였다. 본 논문에서는 총 5개의 시편을 제작하여 시험하여 평균값으로 분석하였다.

시편 시험은 국내의 두 기관이 각각 수행하였다. 국내는 복합재료 시험 분석 센터인 전남테크노파크가 기계적 물성치를 평가하였다. 국외는 자연 섬유에 대한 연구 경험이 풍부한 영국의 첨단 복합재 제조센터(Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, The University of Sheffield, UK)에 의뢰하여 UD 시편 한 종류만 물성치를 분석하였다[11]. 국외 기관은 동일한 재료를 사용하여 제작을 의뢰하였으며 섬유 제거 조건은 해당 기관이 보유하고 있는 방법을 적용하도록 하였다. 국외 기관의 섬유 제거 방법은 0.7bar의 진공 상태에서 100°C로 4시간 건조하는 방법을 적용하였다. 각 시편의 시험 방법은 Table 6에 명시한 바와 같이 ASTM 규정에 의거하여 수행하였다.

국내 기관의 시편 시험 결과 본 연구에서 제시한 제작 공법으로 제작한 UD의 경우 섬유 체적비가 35%이며, Fabric의 경우 34%로서 참고문헌에서 제시된 시편보다 우수하게 제작된 것으로 검토되었다. 따라서 인장 강도를 비교해보면 기존에 RTM 공법으로 제작되어 시험된 선행 연구 결과는 Table 4에 제시한 바와 같이 122.4 MPa(섬유함유율 25%)인 반면 본 연구에서 제작 및 시험한 시편의 인장 강도는 157.5 MPa(섬유함유율 35%)로 검토되었다. 2-D Fabric인 경우는 참고 문헌의 결과인 Fabric 아마 섬유의 인장 강도가 62.0 MPa(섬유함유율 25%)인데, 본 연구에서 제작하여 시험한 Fabric 아마 섬유 인장 강도가 76.7 MPa(섬유함유율 34%)로서 보다 높은 강도임을 확인하였다. Table 7은 강도 시험을 통해 분석된 UD 시편의 물성치이며, Table 8은 Fabric 시편의 물성치이다. 시편 시험 후 파손 형상은 Fig. 4~6에 명시하였다.

국외 복합재료 시편 시험 기관에는 비교 자료로 활용하기 위하여 UD 시편 시험을 의뢰하였다. 국외 첨단 복합재 제조센터의 시편 시험 결과는 제작 전 섬유 수분제거 기법이 우수하여 보다 더 높은 강도를 제시하였다. Table 9에 명

Table 6. Specimen test method

Test type	ASTM Standard
Tension property test	ASTM D3039
Flexure property test	ASTM D790
Shear property test	ASTM D5379



Fig. 4. Specimen after tension test (2-D fabric)



Fig. 5. Specimen after flexure test (2-D fabric)



Fig. 6. Specimen after shear test (2-D fabric)

Table 7. Mechanical properties of UD flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction: 35%)

Test Institute	Jeonnam Technopark	
Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	157.5	10.4
Flexure	188.0	9.7
In Plane Shear	26.24	3.8

Table 8. Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction; 34%)

Test Institute	Jeonnam Technopark	
Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	157.5	10.4
Flexure	188.0	9.7
In Plane Shear	26.24	3.8

Table 9 Mechanical properties of UD flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction: 51%)

Test Institute	Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, The University of Sheffield, UK	
Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	227.2	22.3
Flexure	252.1	14.3
In Plane Shear	27.6	-

시한 바와 같이 국외 기관에서 제시한 시편 시험 결과는 인장 강도가 227.2 MPa(섬유함유율 51%)로 검토되었다.

본 연구에서 제작한 시편의 물성치가 참고문헌 자료보다 높게 나타난 이유는 섬유체적비가 높아진데 주요 원인이 있는 것으로 분석되었다. 이는 섬유 수분제거 방법을 적

용한 결과로 섬유가 함유하고 있는 수분이 제거되어 강도가 개선되었다.

선행 연구에서 제시한 아마 섬유의 기계적 물성치와 본 연구에서 분석한 물성치를 비교한 결과 채택한 제작 공법인 VARTM 공법이 적용이 용이하며, 자연 섬유 중에서 아마 섬유가 친환경 구조물 적용에 타당한 것으로 확인되었다.

6. 결 론

본 연구에서 향후 친환경 구조물 설계를 위해 적용이 용이한 자연 섬유를 선정하기 위해 선행 연구에서 제시한 자연 섬유 물성치를 분석하고 비교하였다. 다양한 자연 섬유의 종류를 분석한 후 자연섬유에 적용될 수지를 분석하여 각 수지를 적용했을 때 강도 특성 차이를 비교하였다.

본 연구를 통해 최종 친환경 구조물 설계를 위해 선정된 섬유 및 수지는 아마 섬유와 비닐에스테르 수지로서 타 자연 섬유보다 강도가 우수한 것을 확인하였다. 자연 섬유 제작 공법은 VARTM 제작 공법이 채택되었다. VARTM 공법으로 제작된 아마/비닐 에스테르 UD와 Fabric 시편의 기계적 물성치를 분석한 결과 타 연구 결과보다 우수한 것으로 검토되었다. 이는 VARTM 제작공법으로 섬유체적비를 향상시키고 섬유 수분제거를 위한 사전 건조와 후경화처리를 하여 개선시킨 결과인 것으로 분석되었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부에서 시행한 2012년 국제공동 기술사업화 사업으로 광주연구개발특구 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Jorg Mussig, Mark Hughes, *Flax and Hemp Fibers: A Natural Solution for the Composite Industry*, JEC Composites, 2012.
- Tran, L.Q.N., Fuentes, C., Dupont-Gillain, C., Van Vuure, A., and Verpoest, I., "Coir Fibre Composite: From Fibre Properties to Interfacial Adhesion and Mechanical Properties of Composites," *Proceeding of European Conference on Composite Materials*, Venice, Italy, June. 2012, pp. 1-6.
- Foisal Ahmed Mirza, Ali Md. Afsar, Kim, B.S., and Song, J.I., "Recent Developments in Natural Fiber Reinforced Composites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 4, 2009, pp. 41-49.
- Aranguren, M.I., and Reboredo, M.M., Plant-Based Reinforcements for Thermosets: Matrices, *Handbook of Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends and Composites - Processing, and Properties*, in Fakirov, S., Bhattacharyya, D., eds, Hanser, 2007.
- Nah, C., Go, J.H., Byun, J.-H., and Hwang, B.S., "Curing of

- Epoxy Resin with Natural Cashew Nut Shell Liquids,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 1, 2008, pp. 16-21.
6. Michael C. Y. Niu, *Composite Airframe Structures*, Hongkong Conmilit Press LTD, 1992, pp. 176-276.
 7. Oksman, K., “High Quality Flax Fibre Composites Manufactured by the Resin Transfer Moulding Process,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 20, No 7, 2001, pp. 621-627.
 8. Van de Weyenberg, I., Chi Truong, T., Vangrimde, B., and Verpoest, I., “Improving the Properties of UD Flax Fibre Reinforced Composites by Applying an Alkaline Fibre Treatment,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 9, 2006, pp. 1368-1376.
 9. Hughes, M., Carpenter, J., and Hill, C., “Deformation and Fracture Behavior of Flax Fibre Reinforced Thermosetting Polymer Matrix Composites,” *Journal of Material Science*, Vol. 42, 2007, pp. 2499-2511.
 10. <http://www.compositesevolution.com>
 11. <http://www.amrc.co.uk/>