

特輯

자연 섬유 복합재료의 국내외 기술 및 시장 현황

이진우, 이정훈, 황병선, 김병선
(한국기계연구원 복합재료팀)Domestic/overseas Market and Technical Issues
of Natural Fiber-reinforced Polymer Composites

Jin Woo Yi, Jung Hoon Lee, Byung Sun Hwang, Byung Sun Kim

ABSTRACT

Natural fibers can refer to all types of fibres only produced by nature. Their lengths vary from particles to long strands. Natural fibers are categorized roughly by six types, depending on the types of sources; base, leaf, seed, grasses, fruit and wood. Of these fibers, jute, flax, sisal and ramie are the most commonly used as reinforced materials in preparing polymer composites. In development and improvement of these composites, many studies have been implemented to overcome the drawbacks such as incompatibility, moisture problems and so on. The range of industry sectors of natural fiber-reinforced polymer composites becomes more extensive gradually and many of the companies all over the world are engaged in fabrications or applications. This paper mainly discussed the recent status of the domestic/overseas market and research issues of natural fiber-reinforced polymer composites. We made an exception of wood-polymer composites market which have played a great role because they had been often dealt with.

Key Words : 자연섬유(Natural fiber), 고분자 복합재(Polymer composite), 시장(Market), 기술적 이슈(Technical Issue)

1. 서론

자연 섬유는 lignocellulose로 구성되어 있으며 매우 풍부한 재생 재료로서 연간 2×10^{11} 톤 정도 생산되는 것으로 추정된다.¹ 수십 년 동안 이 lignocellulose로 고분자 재료를 보강하기 위한 연구가 프로세스와 재료 측면에서 다양하게 이루어졌다. 자연 섬유 보강 고분자 복합재료는 상용성, 흡습성² 등의 해결해야할 문제를 가지고 있으나 저렴한 가격, 고 비강도, 풍부한 공급선 및 내마모성 등의 장점으로 인해 세계 시장은 성장일로에 있다. 본고는 자연 섬유 복합재료에서 큰 축을 차지하고 있는 목분^{3,6}을 제외한 국내외의 자연 섬유 고분자 복합재료 시장 동향과 최근 기술 연구에 대해 서술하였다.

2. 자연 섬유

자연 섬유는 그 공급선에 따라 fruit, grasses, seed, bast,

leaf, wood로 크게 6 종류로 나눌 수 있다.⁷ 예를 들어 목화는 seed 종류이며 ramie, jute, hemp, kenaf 및 flax는 bast fiber, sisal, pineapple, abaca는 leaf fiber이다. 이 중 jute, ramie, flax 와 sisal은 일반적으로 고분자 복합재료의 보강재로서 적용되고 있다. 특히, wood flour (목분) 형태는 다양한 열가소성 수지와 결합하여 많은 양의 자연 섬유 복합재료로 재생산 되고 있다. 자연 섬유 자체의 물성적인 측면을 유리 섬유와 비교하여 보면, 유리 섬유의 인장 강도는 절대적으로 자연 섬유에 비해 높으나 강성은 유사한 수준임을 알 수 있다. 그러나 비강성과 비강도를 고려하면 자연 섬유는 매우 높은 값을 나타내고 있으며 중량 감소가 요구되는 응용 분야에서는 이러한 특징이 큰 강점이 될 수 있다.

자연 섬유의 미세 구조는 lignin과 hemicellulose로 이루어진 비결정 기지에 microfibril로 구성되어 있다.⁸ 자체적으로는 cellulose 섬유로 보강 물질이라 할 수 있다. microfibril은 자연 섬유 전체를 통해 길이 방향으로 배향되어 있으며 그 사이에서의 수소 결합이 높은 강도와 강성을 구현하고 있다.

Table 1 자연 섬유의 종류

구 분	종 류
Bast	Flax, Hemp, Kenaf, Jute, Mesta, Ramie, Urena
Leaf	Pineapple, Banana, Sisal, Henequen, Abaca, Curaua, Agaves, Cabuja, Srew pine, Africa palm
Seed	Cotton, Kapok, Coir
Grasses & Reeds	Wheat straw, Oat, Barley, Rice straw, Bamboo, Bagasse, Reed, Corn, Rape, Rye, Esparto, Elephant grass
Fruit	Coconut
Wood	Hard wood, Soft wood

자연 섬유의 화학 조성은 그 종류에 따라 달라진다. 기본적으로 자연 섬유는 cellulose, hemicellulose, pectin 및 lignin으로 구성되어 있으며, 그 조성 조합이 물성에 영향을 미친다. hemicellulose는 생분해성, 흡습성과 열 노화 특성에 영향을 주며 lignin은 열에는 안정하나 UV에서 분해된다. 조성 조합은 자연 섬유 종류에 따라 다르나 일반적으로 60~80% cellulose, 5~20% lignin 과 20% 정도의 수분은 공통적으로 가지고 있다.⁸

3. 연구동향

자연 섬유 복합재료 기술 중 가장 중요한 연구 분야는 섬유-기지재간의 접합문제이다. 자연섬유의 친수성은 고분자 기지재의 소수성에 접착을 방해하므로 복합재료는 낮은 특성을 갖게 된다. 따라서 자연섬유 복합재료 분야에서는 많은 연구가 계면특성의 향상 부분에 맞춰져 있다. 자연섬유 표면 개질 기술은 수분저항과 함께 복합재료용 고분자와의 계면 결합력 향상을 위하여 화학적 처리 (acetylated) 및 표면처리 (silane, MAPP) 방법을 사용하고 있으며 고분자 재료에 접착 촉진제를 처리하여 섬유 표면 처리를 대신하는 경우도 있다. 자연섬유 표면 개질에 있어서는 표면처리제나 접착촉진제 등의 사용량, 코팅 두께 등에 따라 복합재료의 성질이 달라지므로 복합재료 성형 시 이 모든 인자를 충분히 검토해야 한다.

계면 문제와 흡습 문제는 연구를 통하여 개선이 가능한 분야이므로 주요 기지재료인 polyolefin계 고분자 수지와 자연섬유의 계면 특성의 향상을 시키는 것이 주요 연구주제로 되어 왔다. Silane^{9,10} NaOH 활용^{11,12}, plasma 처리 등의 방법이 있어 왔지만 80년 후반에서 90년 초반부터 자연섬유/polyolefin계 복합재료에서 섬유의 표면 개질을 위하여 Maleated polyolefin을 coupling agent로 활용하면서 물성 향상을 가져왔다.¹³⁻¹⁵ 초기 Maleated polyolefin은 유리섬유와의 접착향상을 위하여 개발되었지만 극성을 띤 자연섬유와의 우수한 화학적 결합, 공정 적용상의 용이성 등으로 인하여 다른 표면처리 방법보다는 많이 사용되고 있다.

Coupling agent 적용이 가능한 자연섬유에는 목분, wood fibers, agrofiber 등이 있다. 이들은 cellulose가 주요성분이므로 계면에 존재하는 -OH기와 maleated coupling agent와의 화학적 결합 메커니즘은 유사하여, 참고 문헌¹⁴⁻¹⁶ 등에 제시된 결합 메커니즘이 가장 좋은 설명으로 알려져 있다. 말레익산과 polyolefin의 반응으로 graft 공중합체가 되고 maleic anhydride (MA)링이 열려서 cellulose의 표면에 있는 -OH기와 반응하여 에스테르화과정을 거쳐 공유결합 및 2차 결합에서 오는 van der Waals 힘 및 수소 결합력에 의한 접합성이 매우 높아진다.

자연섬유와 polyolefin계 수지의 접착력 향상에 의한 기계적 특성 향상을 확인하기 위하여 대개의 연구자들은 섬유와 수지의 혼합을 mixer나 스크류 extruder를 이용하여 실험하였다. 최근까지의 예를 보면, T. J. Keener¹⁷는 flax와 jute 섬유를 PP와 maleated coupler와 함께 extruder에서 혼합하여 시편을 제작하였다. 이 과정에서 6.25mm이던 섬유는 1~2mm로 분쇄된다. 균일한 혼합은 이뤄지고, coupling agent의 첨가에 의한 상대적인 물성 향상 값을 얻을 수 있었다. M. H. Snijder¹³는 flax 섬유를, R. Carnani¹⁸는 Kenaf 섬유를 extruder에 의하여 coupling agent 영향을 제시하였다. I. Chun¹⁹은 mica를 PP와 H. Dalvag²⁰는 wood flour를 extruder를 이용하여 압출하여 시편을 제작하여 비교하였다. 압출장치를 사용하는 것은 실험상의 신속성, 균일한 혼합 등의 장점은 있으나, 비교적 장섬유를 활용해야하는 실질적인 구조물의 재료의 특성을 제시하기에는 부족하다.

다른 coupling agent의 적용방법은 MAPP 용액에 섬유를 침적시켜 처리한 다음 복합재료를 만드는 방법이다. J. Z. Lu¹⁵는 목재의 표면에 용액을 적용하여 coupling agent의 역할을 비교하였고, P. Gatenholm²¹은 cotton 섬유에 coupling agent 용액 처리를 한 다음 PP film을 적층하여 시편을 제작하였다. 이와 같은 방법도 물성의 증가는 가져오지만 실제적 제품 제작에서 공정이 늘어나는 문제가 있어 비경제적이다. 올레핀계의 고분자재료에 Maleic Anhydride coupling agent를 혼합하여 사용하는 것은 silane 처리나 수산화나트륨 등과 같은 섬유의 전처리를 이용하는 것 보다는 공정상에서 단계를 줄일 수 있는 큰 장점이다.

Snijder¹³는 복합재료의 기계적 물성은 MAPP의 양에 따라서 증가하였지만 양이 많아짐에 따라서 그 영향은 급격히 줄어들어 일정한 물성을 유지하였다고 보고하고 있다. 아홉 가지의 다양한 MAPP를 첨가량에 따라서 굽힘 강도를 측정하였다. 대개 3~5%의 정도에서 최대 물성을 보인 후에 감소하였고, 동일한 MA 함량에서도 분자량이 높은 MAPP가 우수한 강도를 보여 주었다.

Felix와 Gatenholm¹⁴은 10%와 40%의 cellulose 섬유와 MAPP-PP 복합재료의 경우에 계면 접착성의 향상으로 인장강도 및 인장율이 크게 증가함을 보여주고 있다. 이상과 같이 Maleated coupler를 이용하여 셀룰로우스 섬유의 표면과 올레핀계 수지의 화학적 결합을 활성화시켜 물성을 향상시킨 연구자들의 결과를 검토하였다.

Table 2 미국 주요 자연 섬유 복합재료 제조업체

회 사	취급 섬유	동 향
Composite America	Flax, Hemp, Jute	<ul style="list-style-type: none"> •인테리어 분야, 농업용차, 설상차, 건축용차 •진공 성형이 주 기술
Composite Products Inc.	Flax, Hemp, Corn, Kenaf, Switchgrass	<ul style="list-style-type: none"> •장섬유 보강 열가소성 수지 컴파운드 기술 보유 •사출, 압출, 압축 가공 •운송용차, 농업용차
Danforth Technologies	Flax, Hemp, Kenaf, Abaca, Sisal	<ul style="list-style-type: none"> •주로 flax만 취급 •종이, 직조 등에 적용
Findlay Industries	Hemp, Kenaf, Sisal	<ul style="list-style-type: none"> •자연 섬유 매트를 이용한 압축 성형 기술 •자동차, 트럭
Flexform Technologies	Hemp, Jute	<ul style="list-style-type: none"> •Jute 매트 (50%)+PP(50%) •자동차, 트럭 인테리어, 가구
Ford Motor Company	Hemp	<ul style="list-style-type: none"> •자연 섬유를 이용한 SMC 성형 공정 이용 (hemp+polyester) •흡습 문제 극복 연구 중
Lear Corporation	Flax	•(Flax+PP) 압축 성형 공정
Natural Fiber Composites Corporation	Flax, Kenaf, Jute	<ul style="list-style-type: none"> •자연 섬유 복합재료 공장 설립을 위한 오하이오주 연구비 수령
Teel GRT	Flax, Hemp, Kenaf, Rice hulls	•자연 섬유+PP 또는 나일론

Keener¹⁷는 maleic acid number와 분자량이 다른 MAPP coupling agent로써 시험한 결과 medium acid number 및 분자량을 가진 MAPP가 3% 정도의 함량일 때 가장 좋은 물성을 나타냄을 보여주었다. 이 논문도 역시 커풀러의 영향을 보기 위하여 screw extruder를 사용하여 절단된 시편의 물성을 측정해야만 했다.

또한 물리적인 개질 방법으로는 표면을 거칠게 하거나, 전기적 방전 방법(corona, cold plasma)등을 사용한다. 이러한 물리적인 방법은 표면을 변화시켜 기계적 결합력을 향상시킨다. 결합력에 대한 측정 연구방안으로써 계면에서의 micromechanical 특성을 시험하는 방법들이 있는데, IFSS (interfacial shear strength)의 측정을 위하여 pull-out test, single fiber fragmentation test등의 방법으로 연구하고 있다.

4. 북아메리카 시장 동향

자연 섬유 고분자 복합재료의 북아메리카 시장은 2004년 1.2억 파운드이며 2009년에는 2억 파운드로 예상되며 연 평균 성장률은 9.9%에 이른다.²² 주로 미국과 캐나다가 자연 섬유 고분자 복합재료의 생산과 소비를 주도하고 있는 실정이다.

Table 3 캐나다의 주요 자연 섬유 복합재료 제조업체

회 사	취급 섬유	생산 제품	적용 분야
Above Board	Wheat	자연 섬유 보드	건축
Avanti Polymers	Hemp	벌크 섬유, hurd	건축, 직조, 가축용
Bio-Fibre Industries	Flax	벌크 섬유, shive	건축
Biolin Research Inc.	Flax	벌크 섬유, shive	직조, 건축, 원예, 가축용
Canada Cordage	Flax, Hemp, Abaca, Sisal, Jute	로프, 직물	직조
Canadian Natural Fibre Industry Value-Chain Alliance	Hemp	벌크 섬유	-
Erosion Control Blanket	Wheat, Coconut	마모 제어 천	geotextiles
Forintek Canada Corp.	Flax, Hemp, Wheat, Rice straw, Corn stover	자연 섬유 보드	건축, 컨설팅
Hempline Inc.	Flax, Hemp	벌크 섬유, hurd	직조, 자동차, 원예, 가축용
Hemptown Clothing Inc.	Hemp, Soy, Bamboo	의복	직조
Hurter Consult	Flax, Hemp, Wheat, Straws, Cotton, Jute, Sisal, Abaca	자연 섬유 보드	건축, 컨설팅
Interface flooring	Hemp	카펫	직조
Parkland BioFibre	Hemp	벌크 섬유, 매트	건축, geotextiles
PSA Composites	Wheat, Corn stover, Soy	갑판, 지붕	건축
Queen Leaf Industries	Hemp	hurd	건축
Sanelink	Flax, Hemp	벌크 섬유, 매트	직조, 자동차, 건축, geotextiles
Schweitzer-Mauduit	Flax	벌크 섬유, shive	건축, 직조, 가축용
Tekle Technical Services	Flax, Hemp, Wheat, Oat hulls, Barley straw	자연 섬유 보드	건축, 컨설팅
Wellington Polymer Tech.	Flax, Hemp	지붕 널빤지	건축

4.1 미국

미국은 갑판, 철도 레일, 건물 판자벽, 창문, 문짝 등 목분 고분자 복합재료가 많은 시장을 차지하고 있다. 최근 들어 공기를 이용한 공정에서는 목분 보다는 kenaf 나 flax와 같은

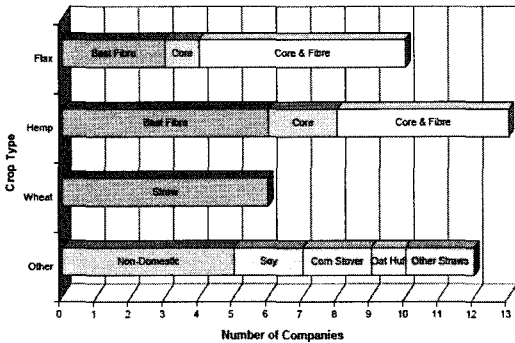


Fig. 1 캐나다 자연 섬유 복합재료 업체의 자연 섬유 사용 현황²⁴

Table 4 유럽의 주요 자연 섬유 복합재료 제조업체

국 가	회 사	취급섬유	동 향
Austria	Svoboda Umformtechnik	-	<ul style="list-style-type: none"> • (장섬유+PP) • 사출 가공
Belgium	Procotex	Flax	<ul style="list-style-type: none"> • 자동차용 flax felt (부직) • Flax(50%)+PP 섬유(50%)
France	AFT Plasturgie	-	<ul style="list-style-type: none"> • 압사출용 키파운드, 압축용 부직 매트 • 프로파일, 방음방열, 필터
France	Techni-Lin	Flax	<ul style="list-style-type: none"> • 자동차용 flax 섬유 • 프레스 가공
Germany	BaFa	Hemp	<ul style="list-style-type: none"> • 단섬유 hemp • 자동차, 직조, 카펫트, 매트
Germany	Krauss-Maffei	다수	<ul style="list-style-type: none"> • 사출용 자연 섬유 키파운드
Italy	G.O.R. Applicazioni Speciali SpA	Sisal	<ul style="list-style-type: none"> • Sisal(5~35%)+PP sheet • 자동차용
Netherlands	HempFlax	Flax, Hemp	<ul style="list-style-type: none"> • 4~12cm 장섬유 이용 • 자동차, 절연체, 가축용, 가구, 인테리어
U.K.	Hemcore	Hemp	<ul style="list-style-type: none"> • 펄프, 종이, 건축, 자동차

자연 섬유를 사용하고 있는 추세이다.²³ 그러나 미국은 유럽보다 환경에 대한 인식이 상대적으로 낮기 때문에 자동차 분야에 자연 섬유 보강 복합재료 성장은 매우 느린 편이다. 한 시장 보고에 따르면 미국에서 자동차 문에 적용되는 PP/자연섬유, Polyester/자연섬유 복합재료 제조는 독일 기술을 채택하고 있으며 다른 자동차 실내 부품도 비슷한 실정이다.²³ 표 2는 미국 내 자연 섬유 복합재료와 관련된 주요 기

업에서 취급하는 자연 섬유와 동향에 대해 서술하였다.

4.2 캐나다

캐나다는 많은 양의 flax, hemp 등의 자연 섬유를 생산하고 있다. 자연 섬유는 1~10cm 정도 길이의 벌크와 부직포 mat 형태가 주를 이룬다. 그러나 실제로 상업적으로 자연 섬유 고분자 복합재료를 만드는 기업은 소수이다. 특히 육상 운송 분야에서는 자연 섬유가 보강된 복합재료를 적용한 자동차 회사는 캐나다에는 없다. 자연 섬유 복합재료를 육상 운송 분야에 응용하고 있는 지역은 대부분 유럽이며 미국에서 소수의 자동차가 자연 섬유 복합재료를 채택하고 있다.²⁴

캐나다는 육상 운송 분야에 자연 섬유 복합재료를 상업적으로 생산하고 판매하는 회사는 적지만 그 잠재 수요는 매우 높다. 몇 개의 대학들이 열가소성 수지를 이용한 자연 섬유 복합재료 연구를 많이 수행하고 있으며 BioCar Initiative, Biofibre Initiative 등의 정부 발의안들이 자연 섬유 복합재료 사용을 촉진 시키고 있다.

캐나다에서 hemp가 가장 많이 사용되고 있으며 그 다음이 flax, wheat 순이다. 자연 섬유를 이용한 제품은 다양한 분야에 적용되고 있는데 특히 건축 분야에 비중이 높으며 hemp와 flax는 효과적인 충전제로 인식되고 있다.²⁴

5. 유럽

자동차 산업에서 소요되는 자연 섬유는 유럽 전체를 통해서 1996년 5000톤, 1999년 21,000톤, 2000년 28000톤이나 그 이후 소비는 어느 정도 정체를 보이고 있다.^{22,25} 그러나 유럽의 자동차 산업에서는 대학과 기업 연구 기관들이 함께 고성능 자연 섬유 복합재료 개발에 계속적으로 협동 연구를 수행하고 있다. 현재 유럽의 모든 자동차는 평균 10kg 까지 자연 섬유가 사용되고 있으며 독일이 주도적인 역할을 하고 있다. 독일은 hemp, flax를 포함하여 고분자 복합재용 자연 섬유가 1998년 4000톤이 소비 되었으나 환경에 대한 인식이 강화되는 1999년에는 급속히 증가하여 9600톤이었고 2003년에는 18000톤 까지 사용량이 증가하였다.²⁵

6. 아시아

6.1 중국

중국은 국토의 16.35%가 삼림으로 이루어져 있으나 목재에 대한 수요가 매우 높아서 북아메리카, 러시아, 남아시아에서 수입하고 있다. 이러한 수요를 충족시키기 위해 목분을 이용한 고분자 복합재료에 대한 연구가 1980년대에 시작되었다. 중국은 열가소성 고분자 수지에 대한 연구 및 생산이 활발하기 때문에

이와 더불어 2003년에는 50개 정도의 목분 고분자 복합재료 제조업체가 설립되었다.²⁶ 또한 쌀 껍질, 옥수수 짚 및 목화 짚 등

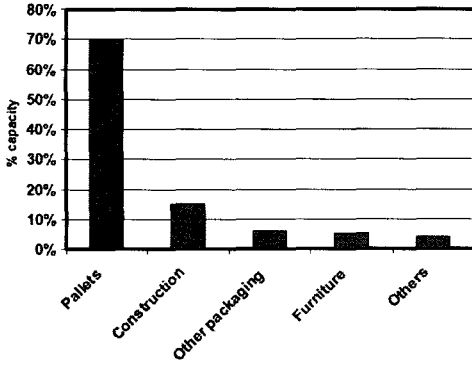


Fig. 2 중국의 자연 섬유 복합재료의 적용 분야별 생산능력²⁶

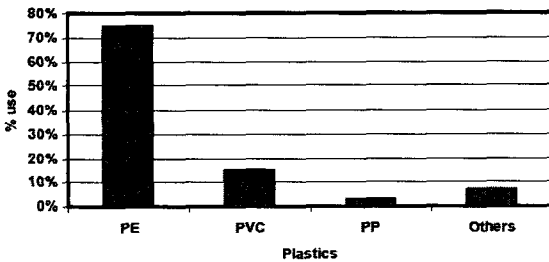


Fig. 3 중국 내 고분자 재활용 현황²⁶

의 자연 섬유 등이 6톤/년 정도 풍부하게 생성되기 때문에 이를 이용하여 팔레트, 보드, 갑판, 마루, 가구 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 팔레트는 전 세계적으로 약 8 억개/년 정도씩 생산되고 있고 그 중 중국에서 2 억개/년을 제조하고 있어서 매우 전망이 밝다.²⁶

자연 섬유는 목분과 쌀 껍질이 주류를 이루고 있으며 PE, PP, PVC 등과 같이 재활용률이 높은 고분자 수지와 혼합되어 사용된다. 최근의 중국 내 자연 섬유 고분자 복합재료의 기술 동향은 자연섬유/수지 컴파운딩 및 formulation 기술을 중심으로 생산성을 향상시키기 위한 컴퓨터 자동화 시스템을 구축하는 방향으로 진행되고 있다. 이를 위해 새로운 가공 기술을 개발하고 시뮬레이션을 이용하여 생산성을 예측하고 효율적인 die 디자인 및 압출기 디자인 설계를 병행하고 있다.

중국은 향후 20년 동안 약 200억 ft²의 규모의 건설이 계획되어 있으며 자동차, 가구, 포장 및 농업 분야를 포함하면 자연 섬유 고분자 복합재료의 잠재 수요는 연간 천만톤 정도로 평가되고 있다.²⁶

6.2 일본

최근 환경오염에 대한 관심 증가와 CO₂ 배출량 규제와 관련하여 일본 내 자연 섬유 고분자 복합재료 연구가 활발히

Table 5 국내 주요 자연 섬유 관련 업체

재료 및 부품	회사	취급 섬유/제품
자연섬유 공급	헵코코리아, 수통상, 성우산업 등	jute, kenaf 섬유, 기타 자연섬유
고분자 수지 및 중간재	코오롱 글로텍, 동일산업 등	PP fibers
자연섬유 중간재	서진테크, 성우산업, 가람테크	자연섬유 매트 및 felt
자동차부품	(주)일광, 한일이화, KASCO, 가람테크, 헵프로하스	헤드라이너, 팬더, 필러, 트렁크 컴파트먼트 등
건축재 부품	서진테크, 가람테크	건축패널

수행되고 있다. 특히 국제 공동 연구를 통해 정보 교환, 기술 협력을 추진하고 있다.²⁵ 최근의 주요 기술 동향을 살펴보면 NEC와 Unitika는 PLA+kenaf 복합재료를 개발하여 휴대 전화 하우징 및 전자 부품 소재를 활용하는 기술을 개발하였다. 또한 kenaf 섬유에 입자를 보강하여 충격 강도를 향상시켰으며 ABS와 같은 열가소성 수지와 복합화도 연구되고 있다. 미쯔비시 자동차는 대나무 섬유를 보강재로 한 PBT 복합재료를 개발하여 경자동차에 적용 예정이다.

7. 국내

자연 섬유 복합재료 기술과 관련한 연구는 미미한 수준이며 시장 또한 소규모이다. Jute, hemp, kenaf 등의 자연 섬유는 주요 수입품이고 가장 활발하게 활용하는 재료는 jute, kenaf, 주 응용분야는 자동차, 건축 분야이다.²⁷ 고분자 수지는 대부분 PP이며 압축 성형이 주류를 이루고 있다. 최근 연구는 hemp를 이용한 자동차용 내장재 개발을 시도하고 있으며 섬유와 수지의 계면 강도 향상 연구가 대학에서 연구 중이다.²⁷

참고 문헌

- 1) A. K. Mohanty, M. Misra and G. Hinrichsen, "Biofibres, Biodegradable Polymers and Biocomposites: an Overview," *Macromolecular Materials and Engineering*, 276/277, 2000, pp. 1-24.
- 2) M. Tajvidi, and G. Ebrahimi, "Water Uptake and

- Mechanical Characteristics of Natural Filler-Polypropylene Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, 88, 2003, pp. 941-946.
- 3) X. Yuan, K. Jayaraman and B. Bhattacharyya, "Effects of Plasma Treatment in Enhancing the Performance of Woodfibre-Polypropylene Composites," *Composites: Part A*, 35, 2004, pp. 1363-1374.
 - 4) M. Tajvidi, M. M. Shekaraby and N. Motiee, "Effect of Chemical Reagents on the Mechanical Properties of Natural Fiber Polypropylene Composites," *Polymer Composites*, 27, 2006, pp. 563-569.
 - 5) M. P. Wolcott, P. M. Smith and J. Hermanson, "Opportunities and Challenges for WPC's in Emerging Product Areas," Presentation in 8th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites.
 - 6) C. Foster, B. Hackwell, D. Mann and G. Pritchard, "The European Wood Plastics Composites Market 2003: Construction, Furniture and Automotive Applications," Hackwell Group Report, 2003, pp. 121-157.
 - 7) D. H. Cho, J. M. Seo, W. H. Park, S. O. Han, T. W. Hwang, C. H. Choi, S. J. Jung and C. S. Lee, "Enhanced Flexural Properties of Jute/PLA Biocomposites and Bioboards by Improvement of the Interfacial Strength," Presentation in 2nd Korea-Japan Green Composites Workshop.
 - 8) D. N. Saheb and J. P. Jog, "Natural Fiber Polymer Composites: a Review," *Advances in Polymer Technology*, Vol. 18, No. 4, 1999, pp. 351-363.
 - 9) I. V. Weyenberg, J. Ivens, A. De Coster, B. Kino, E. Baetens, and I. Verpoest, "Influence of Processing and Chemical Treatment of Flax Fibers on their Composites," *Composite Science and Technology*, 63, 2003, pp. 1241-1246.
 - 10) A. Valadez-Gonzalez, Cervantes-Uc, J. M. Playo and P. J. Herreta-Franco, "Effect of Fiber Surface Treatment on the Fiber-Matrix Bond Strength of Natural Fiber Reinforced Composites," *Composites: Part B*, 30, 1999, pp. 309-320.
 - 11) P. Augustine, J. Kuruvilla, and T. Sabu, "Effect of Surface Treatments on the Electrical Properties of Low-Density Polyethylene Composites Reinforced with Short Sisal Fibers," *Composite Science and Technology*, 57, 1997, pp. 67-79.
 - 12) J. Kuruvilla, T. Sabu, and C. Pavithran, "Effect of Chemical Treatment on the Tensile Properties of Short Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composites," *Polymer*, Vol. 37, No. 23, 1996, pp. 5139-5149.
 - 13) M. H. Snijder and H. Bos, "Reinforcement of Polypropylene by Annual Plant Fibers: Optimization of the Coupling Agent Efficiency," *Composite Interfaces*, Vol. 7, No. 2, 2000, pp. 69-75.
 - 14) J. M. Felix, and P. Gatenholm, "The Nature of Adhesion in Composites of Modified Cellulose Fibers and Polypropylene," *Journal of Applied Polymer Science*, 42, 1991, pp. 609-620.
 - 15) J. Z. Lu, Q. Wu, and I. I. Negulescu, "The Influence of Maleation on Polymer Absorption and Fixation, Wood Surface Wettability, and Interfacial Bonding Strength in Wood-PVC Composites," *Wood and Fiber Science*, 34(3), 2001, pp. 434-459.
 - 16) D. Maldas and B. V. Kokta, "Interfacial Adhesion of Lignocellulosic Material in Polymer Composites: an Overview," *Composite Interfaces*, Vol. 1, No. 1, 1993, pp. 87-108.
 - 17) T. J. Keener, R. K. Stuart, T. K. Brown, "Maleated Coupling Agents for Natural Fiber Composites," *Composites: Part A*, 25, 2004, pp. 357-362.
 - 18) R. Carnani, M. Krishnan, and R. Narayan, "Biofiber-Reinforced Polypropylene Composites," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 37, No. 2, 1997.
 - 19) I. Chun and R. T. Woodhams, "Use of Processing Aids and Coupling Agents in Mica-Reinforced Polypropylene," *Polymer Composites*, 5(4), 1984, pp. 250-257.
 - 20) H. Dalvag, C. Klason and H.E. Stronvall, "The Efficiency of Cellulosic Fillers in common Thermoplastics. Part II. Filling with Processing Aids and Coupling agents," *Journal of Polymer Materials*, 11, 1985, pp. 9-38.
 - 21) P. Gatenholm and J. M. FELIX, "Interphase Design in Cellulose Fiber/Polypropylene Composites," in T. C. Chung, ed. *New advances in polyolefins*. Plenum Press NY, 1993, pp. 237-244.
 - 22) M. Schlechter, "Plastic wood: Technologies, Market," From BCC research, 2005.
 - 23) Craig Clemons, "Wood-Plastic Composites in the United States," *Forest products Journal*, Vol 52, No. 6, 2002, pp. 10-18.
 - 24) "State of the Art, Status of Biofibres in Canada," Composites Innovation Centre report, No. 06-020-02-R01,

2006.

- 25) S. O. Han, H. S. Kim, J. S. Park, Y. S. Ahn, J. S. Kim, S. K. Kim, Y. J. Yoo, C. H. Cho and L. T. Drzal, "Environmentally Friendly Nano-Bio Hybrid Biocomposite"
- 26) W. Song and D. Weng, "Woodfibres and Natural Fiber Plastic Composites in China: Opportunities and Obstacles," Presentation in 7th International Conference on Woodfiber Plastic Composites.
- 27) B.S Hwang, J. H. Lee, J. H. Byun and B. S. Kim, "Mechanical Property Improvement of Jute/PP Composite Panels Using a Coupling Agent," Presentation in Korea-Japan Workshop on Natural Fibers and Wood Plastic Composites, 2005.