

# 천연섬유와 바이오복합재료

심재훈 · 조동환 · 윤진산

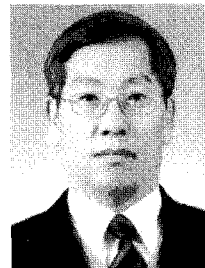
## 1. 서론

섬유강화 플라스틱(Fiber-Reinforced Plastics, FRP)은 1908년에 개발된 페놀수지에 셀룰로오스 섬유를 첨가하면서 시작되었다. 이어서 urea 수지, melamine 수지 등의 열경화성 물질에 적용되기도 하였으며, 1940년대에 불포화 폴리에스터에 유리섬유를 함께 적용하면서 선박부품, 낚시용품 및 일용품에도 FRP의 응용이 확산되기 시작하였다.<sup>1-3</sup> 연주용 기타, 스포츠용품, 자동차, 선박 등 각종 산업, 수송 및 스포츠/레저 분야로부터 초경량 비행기, 전자재료, 항공우주 및 국방소재 등 첨단 분야에 이르기까지 FRP 즉, 섬유강화 고분자복합재료는 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 기존의 복합재료는 자연 환경 내에서 쉽게 분해되지 않고, 재활용도 어려운 일반 보강재 및 충전재를 포함하고 있으며, 환경에 대한 사회적 인식의 변화 및 이에 따른 환경 규제의 강화와 함께 이러한 소재의 활용이 점점 제한을 받고 있는 추세이다.<sup>4-8</sup>

이를 극복하기 위하여 1989년에 독일의 Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt Institute of Structural Mechanics는 flax(아마), hemp(대마), ramie(모시) 등의 천연섬유(natural fiber)를 고분자수지의 보강섬유로 도입한다는 획기적인 방법을 제안했다.<sup>9,10</sup> 생분해성 고분자수지에 적용된 이 기술은 바이오복합재료(biocomposite)라 명명되었으며 다른 열가소성 고분자수지에 비해 성형온도가 상대적으로 낮은 생분해성 고분자수지의 물성 향상에 매우 효과적이다. 또한 매트릭스 고분자와 보강재 모두 생분해성이기 때문에 환경 친화성이 매우 높은 재료로 각광받고 있다. 근래에는 합성고분자의 보강재

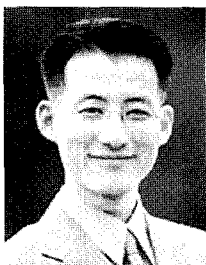
로도 천연섬유를 활용하고자 많은 노력이 이루어지고 있다. 비록 매트릭스인 합성 고분자 물질이 완전 생분해되지 않더라도 천연섬유 성분은 생분해되기 때문에 매립 폐기물의 양을 줄이며 매립지의 수막현상을 완화시켜 주기 때문에 비교적 환경 친화적이라고 할 수 있다. 따라서 최근에는 천연섬유와 함께 생분해성 고분자수지 혹은 난분해성 고분자수지로 이루어진 복합재료를 포괄적인 의미에서 바이오복합재료 또는 그린복합재료(green composite)이라고 부르기도 한다.<sup>1-3,10</sup>

환경에 대한 사회적 변화와 높은 석유가격, 천연자원 활용의 중요성 등을 고려할때, 기존의 유리섬유강화 고분자복합재료를 대체할 수 있는 가장 적합한 친환경 소재는 바이오복합재료라 할 수 있으며 이는 유리섬유복합재료에 필적할 만한 물성을 가질 뿐만 아니라 경량성, 응용성과 가격경쟁력을 갖춘 대체소재이다. 따라서 천연섬유를 활용한 친환경 바이오복합재료에 대한 연구개발의 중요성이 최근 강조되



조동환

1984 인하대학교 공과대학 고분자공학과(BS)  
 1987 미국 Univ. of Akron, Department of Polymer Science(MS)  
 1990 미국 Univ. of Akron, College of Polymer Science and Engineering (Ph.D.)  
 1990~1991 미국 Univ. of Akron, Institute of Polymer Science(Postdoctoral Fellow)  
 1991~1994 국방과학연구소 복합재료연구실(선임연구원)  
 1998~1999 미시간주립대 Composite Materials & Structures Center 방문교수  
 1994~현재 금오공과대학교 고분자공학과 교수



심재훈

2003 인하대학교 고분자공학과(학사)  
 2005 인하대학교 고분자공학과(석사)  
 2005~현재 인하대학교 고분자공학과 박사과정



윤진산

1973 서울대학교 화학공학과(공학사)  
 1972~1976 농양나일론(주) 사원  
 1980 프랑스, University of Compiègne(공학박사)  
 1985~1986 미국위스콘신대학교 방문교수  
 1981~현재 인하대학교 교수

### Natural Fibers and Biocomposites

인하대학교 고분자공학과 (Jae Hun Shim and Jin San Yoon, Department of Polymer Science & Engineering, Department of Polymer Science and Engineering, Inha University, 253, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea) e-mail : jsyoon@inha.ac.kr  
 금오공과대학교 고분자공학과 (Donghwan Cho, Department of Polymer Science & Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi, Kyungbuk 730-701, Korea)

고 있다. 이 방법으로 천연섬유가 합성고분자의 보강제로 사용될 경우, 합성고분자의 기존 생산 공정의 변형 없이도 여러 환경 규제에 유연하게 대처할 수 있는 소재를 개발할 수 있다는 장점이 있어 여러 선진국뿐만 아니라 남미, 동남아, 인도 및 아프리카 등지에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.<sup>6-10</sup>

본고에서는 천연섬유와 합성고분자로 구성된 바이오복합재료를 중심으로 천연섬유의 개질 그리고 바이오복합재료 제조와 물성 및 응용에 대하여 서술하고자 한다.

## 2. 천연섬유 보강재

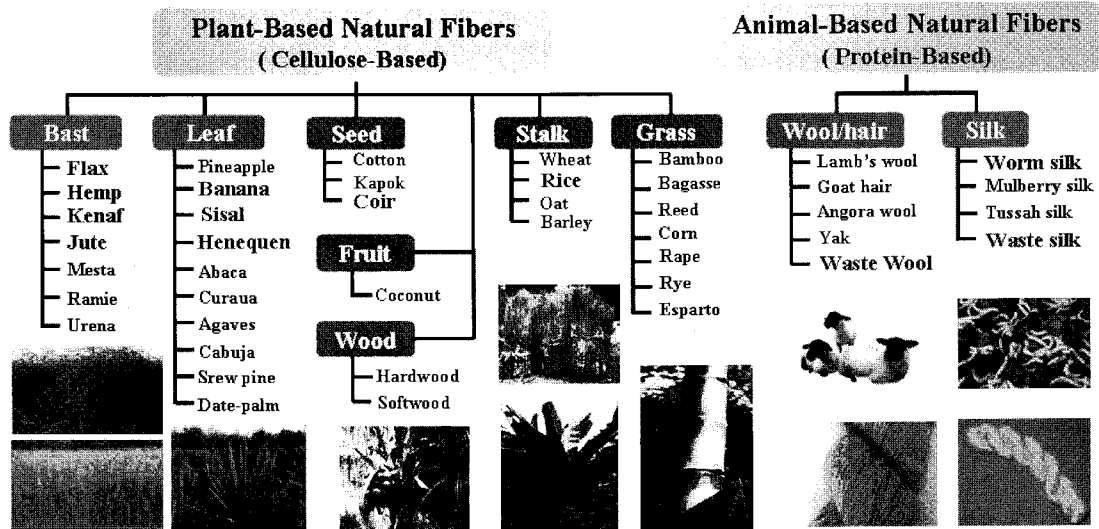
천연섬유는 크게 원료물질에 따라 식물성 섬유와 동물성 섬유로 분류된다. 식물성 천연섬유는 주로 셀룰로오스 성분으로 이루어져 있으며, 동물성 천연섬유는 단백질 성분이 주된 성분이다. 식물성 천연섬유는 값이 싸고 쉽게 얻을 수 있으며 농업이 지속되는 한 고갈되지 않는다. 반면, 동물성 천연섬유는 원료 수급에 제한이 따르며 처리 비

용이 높아 식물성계에 비하여 상대적으로 경제성이 떨어진다. 따라서 일반적으로 바이오복합재료에는 식물성 천연섬유를 활용한 복합소재로 주로 사용하고 있다.<sup>11-13</sup> 따라서 본 원고에서는 응용성, 공급성, 그리고 상업성이 높은 식물성 천연섬유를 중심으로 서술하고자 한다.

**그림 1**은 바이오복합재료에 적용되고 있는 여러 가지 식물성 천연섬유와 동물성 천연섬유를 분류한 것이다. 각각의 천연섬유는 섬유가 지니고 있는 고유 특성뿐만 아니라 가격, 경량성, 가공성, 품질 및 사용 목적, 목표물성, 국가 환경 정책에 따라 선택적으로 사용된다.<sup>13</sup>

고분자매트릭스 수지의 보강섬유로 활용되고 있는 셀룰로오스계 천연섬유들은 아마(flax), 대마(hemp), 황마(jute), 케나프(kenaf), 아바카(abaca), 대나무(bamboo), 코이어(coir), 파인애플, 모시(ramie), 사이잘(sisal), 헤네켄(henequen) 등이 있다. 이들은 주로 남미나 인도, 방글라데시, 동남아시아의 여러 나라에서 생산되고, 최대 연 삼모작이 가능할 정도로 빨리 자라며 쉽게 수확할 수 있다는 장점이 있으며 가격도 매우 저렴한 편이다(**그림 2**).

**표 1**과 **2**는 천연섬유의 화학적 조성, 밀도 및 수분함량을 나타내고 있다. 천연섬유의 특성은 그 종류와 천연섬유가 얻어진 줄기, 잎, 열



**그림 1.** 바이오복합재료에 적용되고 있는 식물성 천연섬유와 동물성 천연섬유.

**표 1.** 천연 섬유의 화학 조성

Type of Fibre	Cellulose	Lignin	Hemicellulose	Pectin	Wax	Micro-fibrillar/ Spiralangle (Deg.)	Moisture Content
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%		wt%
<b>Bast</b>							
Jute	61~71.5	12~13	13.6~20.4	0.2	0.5	8.0	12.6
Flax	71	2.2	18.6~20.6	2.3	1.7	10.0	10.0
Hemp	70.2~74.4	3.7~5.7	17.9~22.4	0.9	0.8	6.2	10.8
Ramie	68.6~76.2	0.6~0.7	13.1~16.7	1.9	0.3	7.5	8.0
Kenaf	31~39	15~19	21.5	-	-	-	-
<b>Leaf</b>							
Sisal	67~78	8.0~11.0	10.0~14.2	10.0	2.0	20.0	11.0
PALF	70~82	5~12	-	-	-	14.0	11.8
Henequen	77.6	13.1	4~8	-	-	-	-
<b>Seed</b>							
Cotton	82.7	-	5.7	-	0.6	-	-
<b>Fruit</b>							
Coir	36~43	41~45	0.15~0.25	3~4	-	41~45	8.0

표 2. 천연섬유의 물성

Type of Fibre	Density	Diameter	Tensile Strength	Young's Modulus	Elongation at Break
	g/cm <sup>3</sup>	μm	MPa	GPa	%
Cotton	1.5~1.6	-	287~800	5.5~12.6	7.0~8.0
Jute	1.3~1.45	25~200	393~773	13~26.5	1.16~1.5
Flax	1.50	-	345~1100	27.6	2.7~3.2
Hemp	-	-	690	-	1.6
Ramie	1.50	-	400~938	61.4~128	1.2~3.8
Sisal	1.45	50~200	468~640	9.4~22.0	3~7
PALF	-	20~80	413~1627	34.5~82.51	1.6
Coir	1.15	100~450	131~175	4~6	15~40
E-glass	2.5	-	2000~3500	70	2.5
S-glass	2.5	-	4570	86	2.8
Aramid	1.4	-	3000~3150	63~67	3.3~3.7
Carbon	1.7	-	4000	230~240	1.4~1.8

매 등과 같은 근원에 따라서 차이가 있다. 또한 천연섬유가 재배된 지리적 특성과 생장 기간 동안의 강수량, 공정과 환경 등에 따라 서로 천연섬유를 구성하고 있는 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 리그닌(lignin), 펙틴(pectin) 그리고 왁스의 함량은 다를 수 있다. 천연섬유는 그동안 고분자수지의 보강섬유로 널리 쓰여 왔던 기존의 유리섬유와 비교할 때 섬유의 인장강도와 인장탄성률이 낮아 획기적인 기계적 물성의 향상을 기대하기는 어렵다. 그러나 천연섬유 밀도(1.2~1.5 g/cm<sup>3</sup>)는 유리섬유(2.5 g/cm<sup>3</sup>)보다 상대적으로 낮아 비강도 및 비탄성을 관점에서 유리섬유에 비견할 만한 복합재료의 물성을 얻을 수 있으므로 경량 소재 개발에 유용하다.<sup>10-17</sup>

천연섬유의 기본 구조는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌, 펙틴과 함께 약간의 왁스로 이루어져 있다. 또한 천연섬유 내부에 본질적으로 지니고 있는 물분자 때문에 수중에 따라 약 8~13%의 수분을 포함하고 있다. 셀룰로오스는 각각 베타 1,4 글루코시딕 가교에 의해 연결된 무수 d-글루코스 단량체로 구성된 선형 고분자이다. 세 개의 수산기는 각 글루코스 단위에서 다른 셀룰로오스 분자와 함께 내외부의 수소결합을 형성한다. 이러한 수산기는 8~13% 정도의 수분을 흡수하고, 셀룰로오스의 중합도와 결정화도는 섬유마다 차이가 있다. 이러한 천연섬유의 종류에 따른 화학조성 상의 차이는 섬유의 기계적 특성에 영향을 미친다.<sup>14-17</sup>

결정성인 셀룰로오스는 섬유의 물성과 셀(cell)의 안정성을 유지시키는 데 크게 기여한다. 마와 같은 줄기섬유내 셀룰로오스는 가장 높은 10,000 정도의 중합도를 가지므로 인장물성도 높은 편이다. 헤미셀룰로오스는 셀룰로오스보다 사슬 가지가 더 많이 존재한다. 따라서 헤미셀룰로오스는 결정화되지 않으며, 섬유에서 리그닌이 제거된 후에도 헤미셀룰로오스는 셀룰로오스에 붙어 남아 있고 많은 양의 수분을 흡수한다. 헤미셀룰로오스는 약하게 가교된 상태로 존재하며 섬유의 물성에 크게 기여는 하지 않으나, 친수성을 띠고 있고, 알칼리에 용해된다. 리그닌은 지방족과 방향족의 복잡한 구조를 가지고 있는 폐쇄계 화합물 형태의 탄화수소 고분자로 cell 벽 사이에서 브리지 역할을 하며, 매트릭스가 섬유를 둘러싼 sheath 구조이며 마이크로 피브릴을 이루고 있다. 리그닌은 탄화수소가 기본을 이루어 미생물에 의한 분해를 방지한다. 헤미셀룰로오스는 리그닌이 자외선 분해성인데 비하여 섬유의 생분해, 수분 흡수 및 열분해에 중요한 역할을 한다. 펙틴은 폴리사카라이드의 혼합물이며 왁스는 다양한 알코올로 구성되어 있는 보호 층과 같이 섬유의 표면에 주로 존재한다.<sup>18-20</sup>

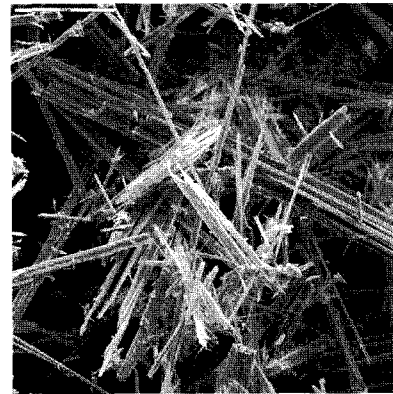


그림 2. SEM micrograph of degumming ramie(<http://www.wikipedia.org/org/>).

### 3. 식물성 천연섬유 보강재의 종류

모시섬유는 가시가 없는 췌기풀의 일종인 *boehmeria nivea* 또는 *boehmeria tenacissima*라는 식물에서 얻는다(그림 2). 전자는 주로 열대 지방에서 재배되며, 후자는 중국이 원산지이다. *Boehmeria tenacissima*는 중국의 유리섬유라고도 불리며 67~76%의 셀룰로오스와 13~17%의 헤미셀룰로오스 성분을 포함하고 있다. 모시로 만들어진 직물은 이미 기원전 5000년에서 3300년경에 이집트에서부터 사용된 것으로 알려져 있다. 모시는 다년생이며 약 2미터에 이를 정도로 키가 크고 일 년 삼모작이 가능하다. 다 자란 식물은 세로로 길게 있을 잘라서 수확한 후 피질을 제거하고, 줄기부터 껍질을 벗긴다. 가닥이나 리본의 형태를 하고 있는 모시섬유는 칼로 껍질을 벗길 때 물속에서 껍질이 잘 분리되며 수산화나트륨(NaOH) 용액으로 리그닌을 제거한다. 화학처리된 모시섬유는 약 900 MPa의 강도를 나타내기 때문에 가격경쟁력이 확보된다면 바이오복합재료 분야에 활용이 기대된다.

사이잘삼, 황마, curaua 등의 섬유는 리그노셀룰로오스 섬유라 한다. 이것은 가격이 저렴하고, 밀도가 낮으며, 제조 공정이 단순하여 최근 많은 주목을 받고 있다. 일반적인 천연섬유와 마찬가지로 재생이 가능하고, 경작 면적이 넓어서 공급량이 충분하다. 또한 이방성을 가지고 있으며 표면이 매끄럽고 공극을 가지고 있고 점탄성을 나타내며 생물학적 분해가 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다. 최근 유럽의 자동차 업체들은 자동차 문, 천장과 브레이크 패드의 석면 대용으

로 주로 flax를 사용하는 바이오복합재료를 개발하였다. 두꺼운 종이판이나 계란상자 등의 포장재에도 상당부분 식물성 천연섬유가 사용되고 있다. 이중 황마(jute)는 가장 쉽게 구할 수 있는 섬유로서 인도, 방글라데시, 브라질, 중국과 같은 국가에서 저렴한 비용으로 쉽게 얻을 수 있다. 천연섬유는 수산화나트륨을 이용한 알칼리 처리를 하여 사용하기도 하며 알칼리 처리를 통하여 리그닌 함량이 약 11%에서 약 7%로 감소한다. 또한 헤미셀룰로오스 성분도 상당부분 제거될 수 있다. 알칼리 처리에 의한 리그닌의 감소는 섬유의 재배향을 초래하여 인장강도가 약 50% 정도 증가되는 효과를 얻을 수 있으며, 궁극적으로 천연섬유 바이오복합재료의 물성을 향상시킬 수 있는 것으로 보고되었다.<sup>10</sup>

대나무 섬유는 예술 소재, 정원, 조경 또는 건축 재료에 사용된다. 대나무는 줄기와 잎을 가지고 있으며, 일본, 우리나라, 베트남, 중국 등 아시아와 남미의 여러 나라에서 많이 생산된다. 대나무는 황마, 케나프(kenaf) 등에 비해 생산성이 매우 높다. 대나무섬유는 후처리하면 유리섬유에 비해 상대적으로 높은 비강도를 가지고 있고 보강재로 사용될 때 친환경성 등을 고려하면 유리섬유보다 활용성이 더 높을 수 있다.<sup>10</sup>

그림 3에서 보여주는 바와 같이, 대나무는 목질부에 수많은 관다발이 있으며, 관다발의 주요 성분은 셀룰로오스와 리그닌이다. 일정한 길이의 대나무 자체를 증기압을 이용하여 또는 물리적인 방법으로 대나무 섬유를 얻을 수 있다. 얻어진 대나무 섬유를 수 mm에서 수십 mm로 짧게 잘라 바이오복합재료의 보강섬유로 사용할 수 있으며, 또한 분말 상태의 죽분(bamboo flour)을 고분자수지와 함께 이용할 수도 있다.<sup>10-13</sup>

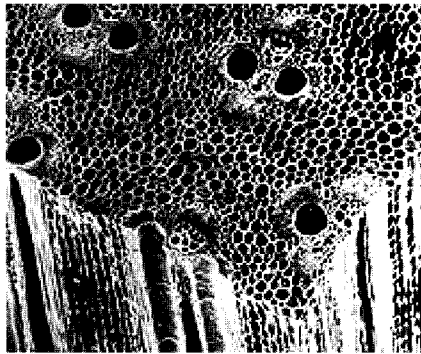


그림 3. 대나무 섬유의 단면.

#### 4. 천연섬유의 표면개질

섬유와 매트릭스 사이의 강한 계면결합은 복합재료의 높은 기계적 특성을 얻는 데 매우 중요하다. 천연섬유는 친수성이 높아 소수성인 고분자 매트릭스 수지와는 상용성이 매우 낮다. 천연섬유의 친수성은 바이오복합재료의 수분 흡수를 초래하며, 이는 나아가 응용분야의 확대를 제한시키는 요인이 되기도 한다. 천연섬유 표면에 존재하는 왁스 성분은 섬유가 고분자수지와 결합하는데 불리하게 작용하며 표면 젖음성도 저하시킨다. 특히 수분과 히드록실 그룹의 존재는 복합재료 제조 시 천연섬유와 대부분의 고분자수지가 접착하기 어렵도록 한다.<sup>13</sup>

셀룰로오스의 함량이 높은 천연섬유는 결정 부분의 함량도 높다. 이들 결정 영역은 강한 분자 내 수소결합에 의해 서로 결합되어 있는 셀룰로오스 블록의 집합체라고 할 수 있다. 세포벽이 팽윤되거나 내부 셀룰로오스가 제거되지 않으면 바이오복합재료 성형 과정 동안 매트릭스 수지는 천연섬유 내부로 침투해 들어갈 수 없다. 그러므로 바이오복합재료의 특성을 향상시키기 위해서 복합재료 성형과정 전에 천연섬유에 대해 표면개질을 하는 것이 필요하다. 천연섬유를 개질시키기 위해 여러 가지 전처리 방법이 사용될 수 있다. 셀룰로오스의 결정구조는 히드록실 구조를 화학적 관능을 지니는 물질로 치환시킴으로써 개선될 수 있다. 이와 같은 해결정화 과정은 치환 그룹들이 가소제와 같은 역할을 하기 때문에 셀룰로오스의 열가소성을 향상시키는데 기여한다. 천연섬유의 열가소화를 통한 개질도 연구되고 있다.

그러나 가장 일반적인 표면처리 방법은 탈락스화, 알칼리 처리, 실란제 처리, 그래프트 공중합, 에스테르화 반응, 아세틸화 반응, 표백 등의 화학적 개질 방법이나 전자빔 처리, 플라즈마 및 자외선 처리 같은 물리적 개질 방법을 통하여 바이오복합재료의 섬유-매트릭스 사이의 계면결합력 향상과 함께 기계적 물성의 향상을 꾀하기도 한다. 또한 친환경적인 방법으로 물을 사용하여 전처리하는 방법도 소개되고 있다.<sup>13</sup> 이러한 방법들은 천연섬유의 종류 및 특성, 사용목적, 효율성, 처리과정성, 공정비용, 공정의 환경 친화성 등을 종합적으로 고려하여 최적의 공정 조건을 설정하는 것이 바람직하다.

그림 4는 천연섬유를 사용하여 성능이 개선된 바이오복합재료를 디자인하고 제조하는데 중요한 영향을 미치는 인자인 천연섬유 표면 개질 및 고분자수지의 개질 그리고 복합재료 제조공정에서 효율적이고 최적인 공정 조건의 선정을 통하여 시너지 효과를 얻을 수 있음을

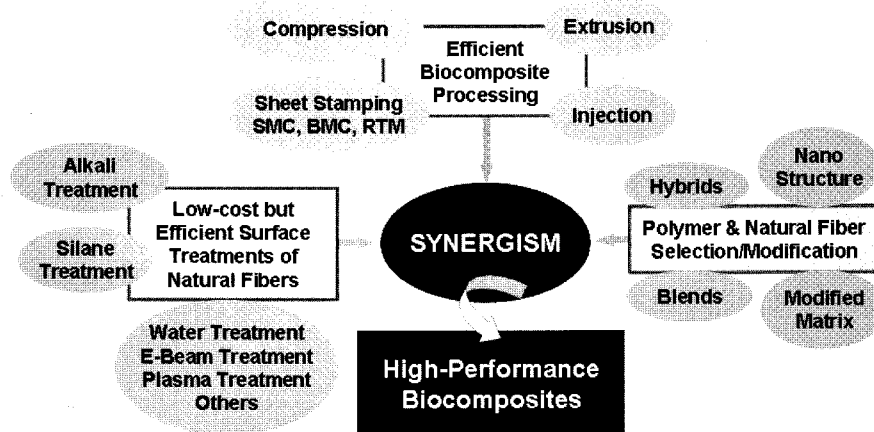


그림 4. 고성능 바이오복합재료의 설계.

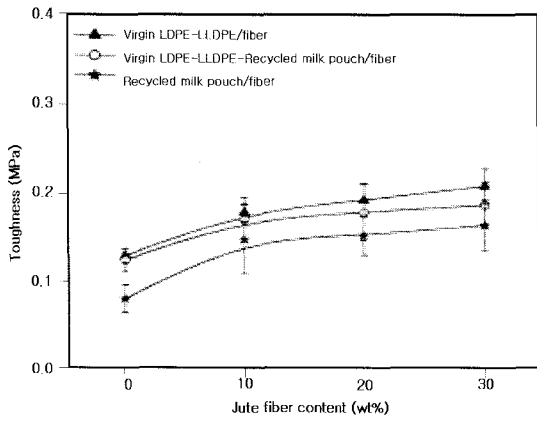


그림 5. LDPE-LLDPE/jute 복합재료의 toughness.

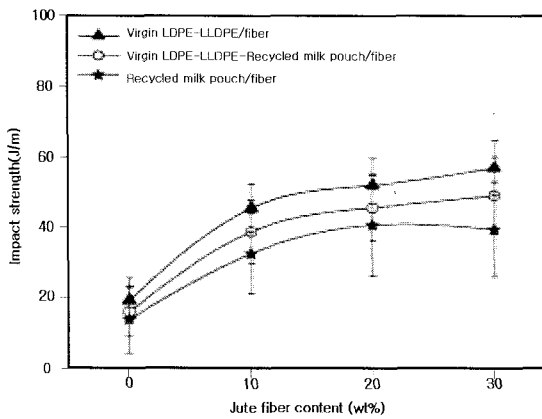


그림 6. LDPE-LLDPE/jute 복합재료의 충격강도.

도식적으로 보여주고 있다.

2007년 인도의 Adhikari 교수 연구팀은 jute 복합재료에 관하여 다음과 같은 내용의 논문을 발표하였다.<sup>21</sup> 이 연구팀은 재활용소재인 milk pouch의 물성을 향상시키기 위해서 LDPE와 LLDPE가 블렌드되어 있는 수지를 매트릭스 수지로 함께 사용하였다. 보강섬유로는 복합재료 제조 전에 알칼리 용액으로 처리한 후 결합제(coupling agent)를 도입한 jute 섬유를 사용하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 jute의 함량이 증가함에 따라 복합재료의 강인성(toughness)이 증가하였음을 확인할 수 있다. 재생된 milk pouch/jute 복합재료의 경우 jute 함량이 30 wt%일 때, 약 50% 가까운 강인성 개선 효과가 나타났다. Jute 섬유의 첨가를 통하여 충격강도도 함께 향상되었다. Jute 함량이 20 wt%인 재생된 milk pouch/jute 복합재료의 경우 그림 6의 결과와 같이 충격강도가 거의 100% 가까이 향상되었다. 이는 알칼리와 결합제를 활용한 jute 섬유의 개질이 천연섬유와 고분자간의 접착력을 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다.

### 5. 상용화제의 활용

친수성인 천연섬유와 소수성인 고분자수지 사이의 접착성 향상을 위해 활용되는 천연섬유의 표면개질 방법은 매우 효과적이지만 천연섬유 개질에 필요한 공정 설비가 요구된다. 상용화제(compatibilizing agent)는 천연섬유의 개질과 함께 바이오복합재료의 물성 향상을 위

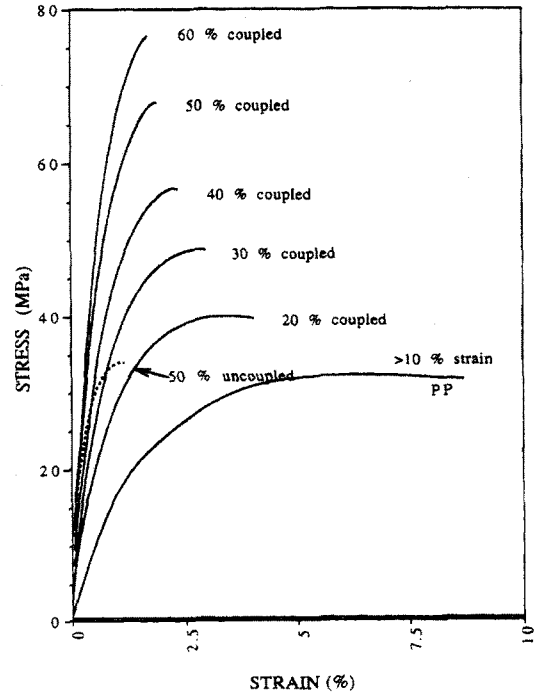


그림 7. 폴리프로필렌/kenaf 복합재료의 stress-strain curve.

하여 사용되고 있다. 상용화제는 기존의 유리섬유와 탄소섬유 등을 고분자수지 내에 분산시키는 기존 설비를 이용하여 천연섬유와 함께 분산시킬 수 있다.

그림 7은 1995년 Roger M. Rowell 박사 연구팀이 연구한 kenaf/폴리프로필렌 복합재료에 대한 응력-신장률 곡선이다. Kenaf섬유 함량이 높아질수록 인장강도와 인장탄성률 모두가 크게 향상되었다. 특히 maleic anhydride-grafted polypropylene(MAPP)이 상용화제로 사용될 경우 아주 효과적인 물성 향상이 나타났다. 이로부터 친수성인 kenaf섬유와 소수성인 폴리프로필렌수지간의 접착력 향상에 MAPP가 효과적으로 기여하였음을 확인할 수 있다.<sup>15</sup>

### 6. 바이오복합재료의 연구개발 동향

가장 먼저 바이오복합재료의 산업화를 시작한 유럽에서는 20세기에 들어와 환경 문제를 심각하게 인식하기 시작하였으며, 이에 따라 대기, 수질, 토양 오염을 최소화하는 산업 형태를 추구하게 되었다. 바이오복합재료는 이러한 사회적 필요에 의하여 유럽에서 먼저 연구되었다. 현재는 미국 및 일본과 같은 선진국에서 상용화 연구가 활발히 진행 중이다. 바이오복합재료의 선두주자인 유럽은 자동차 재료에 적용하여 차체의 경량화 및 이산화탄소 배출 감소에 관한 실용화 연구가 진행 중이다. 비교적 삼림 자원이 풍부한 미국에서는 산업체인 프라구축, 자동차 부품 등의 연구가 진행 중이다. 일본에서는 유럽, 미국과의 바이오복합재료 개발을 위한 국제협동연구가 추진 중이며, 동시에 자동차 및 전자 부품 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 외에도 인도, 중국, 호주, 브라질, 싱가포르, 말레이시아 등 천연섬유 자원 생산국들도 바이오복합재료 연구에 매진하고 있다.<sup>22-28</sup>

#### 6.1 유럽

산·학·연 공동 연구를 중심으로 바이오복합재료 연구를 실시하



**그림 8.** 독일다임러크라이슬러사에서 실용화 연구 중인 바이오복합재료를 채택한 자동차 부품.

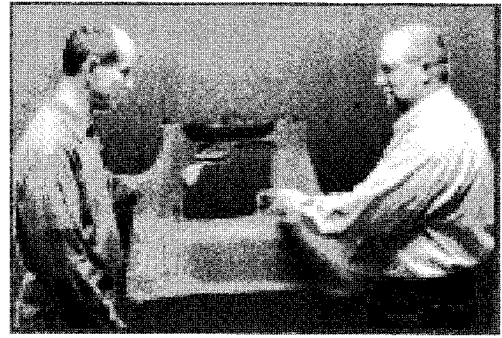
고 있는 유럽은 실용화와 고기능화에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다. 실용화에 대한 연구를 주로 실행하고 있는 기업체들은 바이오복합재료를 자동차의 내장재와 외장재로 적용하여 고성능 바이오복합재료를 개발하기 위해 노력하고 있다.<sup>29-38</sup>

특히 이중에서 프로젝트 “ECOFINA (<http://www.ecofina.org>)”는 현재 고분자재료와 함께 자동차부품 제조에 사용되고 있는 무기충진재 혹은 무기섬유를 천연소재로 대체하기 위한 연구를 추진하고 있다. 바이오복합재료 개발과 실용화의 선두주자인 독일 DLR (the german aerospace center)에서는 현재 바이오복합재료를 유리섬유강화 복합재료가 사용되고 있는 모든 분야, 예를 들면 항공우주 및 풍력발전을 위한 풍차날개 등 대체 에너지분야에도 적용하기 위한 연구를 수행 중에 있다. 또한 독일 자동차회사인 다임러크라이슬러사에서 바이오복합재료를 **그림 8**에서 보는 바와 같이 승용차의 내장재 및 외장재에 실제로 적용연구가 수행되고 있으며 버스, 전철 등에 이를 적용하는 연구도 추진 중이다.<sup>39-41</sup>

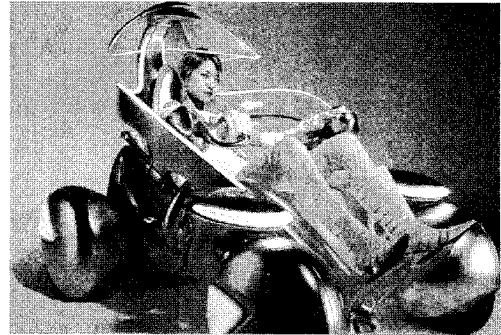
### 6.2 미국

미국에서의 바이오복합재료 개발 연구는 국립과학재단(national science foundation, NSF), 농림부(united state department of agriculture, U.S.D.A.), 에너지부(department of energy, DOE), 환경부(environmental protection agency, E.P.A) 등 정부 각 부처의 지원과 함께 활발하게 진행되고 있다. 미시간주립대학, 아이오와주립대학, 워싱턴주립대학, 오레곤주립대학, 루이지애나주립대학, 위스콘신대학, 메인대학, 노스캐롤라이나주립대학, 펜실베이니아주립대학, 테네시대학, 텔라웨어대학, 미시시피주립대학 등 많은 대학에서 바이오복합재료 개발과 관련된 기초 및 응용연구를 수행하고 있다. 이들 대학에서는 단백질을 매트릭스로 하는 바이오복합재료, 목분과 천연섬유를 보강재로 사용한 바이오복합재료, 생분해성 고분자를 매트릭스로 하는 바이오복합재료 등 바이오복합재료 개발 및 특성 분석과 관련된 전반적인 연구가 진행되고 있다.

USDA Forest Products 연구실 등 국립연구기관에서 바이오복합재료의 내구성 및 생분해성과 관련된 연구를 활발하게 진행하고 있다. 오웬스코닝사, 노스우드플라스틱사(North Wood Plastics, Inc.) 등 기업체에서는 바이오복합재료 실용화를 위한 연구를 수행하고 있다. 미국에서 수행되는 바이오복합재료의 응용분야는 자동차부품소재 분야뿐만 아니라, 주택내장재, 교량 등 토목건축산업과 기반시설 인프라 구축 등도 포함하고 있다(**그림 9**).<sup>41</sup>



**그림 9.** North Wood Plastics사에서 폴리프로필렌과 천연섬유를 혼합하여 만든 자동차 내장재.



**그림 10.** 2007년 발표된 kenaf를 보강재로 활용한 Toyota사의 i-Unit concept car.

### 6.3 아시아

아시아에서는 주로 한국, 일본, 중국, 인도에서 연구가 진행되고 있으며 이중에서 일본이 가장 활발하게 연구개발과 실용화를 추진하고 있다. 바이오복합재료의 실용화에 대해서는 일본의 도요다자동차회사에서는 kenaf와 폴리유산(olylactic acid) (PLA)으로 만들어진 바이오복합재료를 처음으로 승용차내장재로 적용하였다는 보도를 2005년에 한 바 있고, 2007년에는 kenaf를 활용한 i-Unit concept라는 concept car를 전시회에 발표한 바 있다(**그림 10**). 특히 도요다사에서는 천연섬유의 품질 제어와 가격 경쟁력 확보 등 다양한 목적으로 동남아시아에 자사 소유의 kenaf 경작지를 운영하여 소재개발에 필요한 kenaf 섬유를 자체 공급하고 있다. 최근에는 일본의 NEC 사에서는 휴대용 전화기의 하우징에 kenaf를 적용하였다고 보고하였다. 또한 일본에서는 지역적 특성을 고려하여 대나무섬유를 이용한 그린복합재료에 대한 연구개발도 여러 대학과 기업에서 큰 관심을 가지고 매우 활발하게 진행하고 있다(**표 3**).<sup>41</sup>

중국은 1980년대 중반부터 바이오복합재료 연구가 시작되어 1999년부터 바이오복합재료 제조공장이 설립되기 시작하였으며 2003년에는 중국내에 바이오복합재료 관련 연구가 8개 대학과 50여 곳의 기업체에서 이루어지고 있다. 중국 국가 “863계획(하이테크계획)” 가운데 중요한 프로젝트인 “목질(木質) 기반 복합재료 선진제조 기술”을 실시하여 목재와 합성 고분자 복합재료, 금속, 무기비금속, 대나무 재료, 농작물 줄기섬유 계면변성 및 복합기술혁신 분야에서 많은 성과를 획득한 것으로 보고되고 있다.<sup>41</sup>

표 3. 바이오복합재료에 대한 해외 연구개발 동향

국가	주요기관	연구개발 내용	현황
유럽	<ul style="list-style-type: none"> <li>영국(런던대, T.Peijs)</li> <li>독일(드레스덴대, B. Kretzschmar)</li> <li>이탈리아(페루자대, C.Bernal)</li> <li>네덜란드(TNO Institute of industrial Technology사, S. Fisher)</li> <li>벨기에(Owens Corning Fiberglass사, J. Li Thomason)</li> <li>스페인, 핀란드, 덴마크 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>복합재료 제조를 위한 마섬유의 물성 및 응용 연구(영국)</li> <li>PP/clay 바이오복합재료 연구(독일)</li> <li>Jute-PP 복합재료연구(이탈리아)</li> <li>천연고분자/나노입자 combination(네덜란드)</li> <li>자동차에 대한 NFRP(natural fiber reinforced plastics) 응용(벨기에)</li> </ul>	응용 연구, 실용화적용 단계
미국	<ul style="list-style-type: none"> <li>미국 USDA(Pobert H. Falk) · 미시간주립대(L.T. Drzal)</li> <li>위스콘신대(A. Sanadi)</li> <li>-위싱턴주립대, Ford사 -Furturesoft Technologies Inc.</li> <li>-North Wood Plastic Inc. 외</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>천연섬유-열가소성 바이오복합재료의 응용(미국 USDA)</li> <li>천연섬유 보강 복합재료의 다양한 응용 및 연구(미시간주립대)</li> <li>케나프 섬유를 이용한 복합재료 응용(위스콘신대)</li> </ul>	응용 연구, 실용화적용 단계
일본	<ul style="list-style-type: none"> <li>교토공대(H.Hamada) · 아키타대(Y.Kikuchi)</li> <li>니혼대(G. Ben) · 야마구치대(K. Goda)</li> <li>동지사대(T. Fujii)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>대나무 이용 생분해성 바이오복합재료 연구</li> <li>삼나무, 모과나무를 이용한 생분해성 복합재료 연구</li> </ul>	응용연구, 실용화 타진 단계
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>인도(L. A. Pothan) · 중국(Madiscn, WI)</li> <li>호주(호주국립대 Kate E. Semple)</li> <li>브라질, 싱가포르, 말레이시아 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>바나나섬유를 이용한 복합재료 연구</li> <li>천연/나무섬유 복합재료의 응용</li> </ul>	기초연구

### 7. 결론

환경 문제의 제기와 친환경소재 중요성의 부각으로 1990년 후반 부터 다시 활성화된 천연섬유를 활용한 바이오복합재료의 연구개발 은 유럽, 미국, 일본을 비롯한 세계 각국의 집중적인 투자와 노력으 로 급속히 발전하고 있다. 바이오복합재료에 활용되는 천연섬유는 친 수성이며, 헤미셀룰로오스, 리그닌 및 약간의 왁스가 포함되어 있어 알칼리 처리와 같은 섬유의 표면개질 과정이 필요하며, 이를 통하여 천연섬유-고분자수지의 계면특성 향상을 통한 기계적 특성 향상을 도모할 수 있다. 아울러 기존의 복합재료의 물성에 비견할 수 있는 우수한 성질의 바이오복합재료를 제조할 수 있다. 독일, 영국을 중심 으로 한 유럽의 여러 선진국들은 바이오복합재료 분야에 가장 많은 관심을 가지고 선도적인 역할을 수행하고 있다. 우수한 천연섬유 자 원과 개발 인프라를 지니고 바이오복합재료 개발을 시작한 미국과 캐 나다는 현재 가장 광범위한 연구기반을 구축하고 있으며 다양한 응용 연구를 진행하고 있어 향후 산업화 및 응용분야의 확대가 가장 기대 되고 있는 나라이다. 일본도 천연섬유와 바이오복합재료 분야 연구에 대학, 연구소, 산업체에서 많은 전문가들이 투입되어 자동차부품 이 외에 여러 다양한 응용분야에 연구개발에 박차를 가하고 있다. 최근 들어 이들 선진국들은 각종 천연섬유와 함께 생분해성 고분자수지로 이루어진 바이오복합재료 및 바이오플라스틱 개발에 많은 투자와 노 력을 아끼지 않고 있다. 특히 유럽과 미국은 자국 내에서 판매되는 모 든 자동차부품소재에 생분해성 재료의 사용을 법제화 하는 등 환경 규 제를 통해 바이오복합재료의 활용을 증대시키려 하고 있다. 이에 비 하여 우리나라에서 천연섬유를 이용한 친환경 바이오복합재료에 대 한 이해와 인식은 선진국 수준에 비하면 매우 미미한 수준이다. 현재 국내에서 소수 대학과 연구소에서 기초연구 및 응용연구를 수행하고 있다. 또한 현재 헤드라이닝이나 도어트림, 차량내부 바닥재 등 자동 차내장 분야에 일부 제조업체가 천연섬유를 활용한 부품을 생산하고 있으나, 소재의 고성능화 및 외장부품소재와 전자부품소재 및 건축내 장재 개발을 위한 연구개발은 매우 부족한 현실이다. 따라서 우리나 라에서도 바이오복합재료에 대한 연구가 더욱 활발하게 진행되어 외 국의 친환경소재 개발 기술에 견줄 수 있는 연구 인프라를 구축하고

국내의 자동차, 전자 및 건축용 친환경 소재개발 분야에 기여하고 수출 여건을 개선하기 위한 노력이 필요하다고 판단된다.

### 참고문헌

1. A. K. Mohanty, L.T. Drzal, D. Hokens, and M. Misra, *Polym. Mater. Sci. Eng.*, **85**, 594 (2001).
2. P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, *Comp. Sci. Tech.*, **63**, 1259 (2003).
3. S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufac.*, **35**, 371 (2004).
4. T. Corbiere-Nicollier, B. G. Laban, L. Lundquist, Y. Leterrier, J. A. E. Manson, and O. Jolliet, Resources, *Conservation and Recycling*, **33**, 267 (2001).
5. *10th European Conference on Composite Materials*, Brugge, Belgium, June 3-7, 2002. *ECOFINA: Ecoefficient Technologies and Products Based on Natural Fibre Composites*, Debora Puglia, Jerico Biagiotti, and Jose M. Kenny, University of Perugia, Italy.
6. *Natural fibers Performance Forum, Copenhagen*, 21st-22nd May, 1999; G. S. Thomas (Daimler-Chrysler AG, Stuttgart), *Renewable Materials for Automotive Applications*.
7. U. Riedel and J. Nickel, *7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, May 7, 2003: *Biocomposites State-of-the-art and Further Perspectives*.
8. J. Nickel and U. Riedel, *Materialstoday*, April, **44** (2003).
9. *6th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, May 14, 2001: *Opportunities for natural fibers in plastic composites*, Kline & Company, Inc.
10. A. K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen, *Macromol. Mater. Eng.*, **276/277**, 1 (2000).
11. L. T. Drzal, A. K. Mohanty, R. Burgueno, and M. Misra, *Biobased Structural Composite Materials for Hosing and Infrastructure Applications*, Purdue University, NSF Workshop, pp.1-10.
12. W. Song, D. Weng, *7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites: Wood Fiber and Natural Fiber Plastic Composites in China*,

- May 7 (2003).
13. D. Cho, S. G. Lee, W. H. Park, and S. O. Han, *Polym. Sci. Tech.*, **13**, 460 (2002).
  14. R. M. Rowell, *Property enhanced natural fiber composite materials based on chemical modification*, in "Science & Technology of Polymers and Advanced Materials", P. N. Prasad *et al.*, Ed., Plenum Press, New York, p.717 (1998).
  15. A. R. Sanadi, D. F. Caulfield, R. E. Jacobson, and R. M. Rowell, *Ind. End. Chem. Res.*, **34**, 1889 (1995)
  16. R. L. Clough, *Nuclear Instruments and Methods in Physic Research B*, **185**, 8 (2001).
  17. K. van de Velde and P. Kiekens, *Polym. Testing*, **21**, 433 (2002).
  18. D. Marshall, *Eur. Plast. News (March)*, **23** (1998).
  19. P. Gatenholm, J. Kubat, and A. Mathiasson, *J. Appl. Polym. Sci.*, **45**, 1667 (1992).
  20. A. K. Bledzki and J. Gassan, *Prog. Polym. Sci.*, **24**, 221 (1999).
  21. A. Choudhury and B. Adhikari, *Polym. Compos.*, **28**, 78 (2000).
  22. S. J. Hwang and R. F. Gibson, *J. Comp. Mater.*, **26**, 2585 (1992).
  23. J. Ayutsede, F. K. Ko, and M. Gandhi, *228th ACS National Meeting, PMSE Division*, Philadelphia, Pennsylvania, Aug. 22–26, 2004.
  24. H. Miyagawa, A. K. Mohanty, M. Misra, and L.T. Drzal, *AIChE*, San Francisco, California, Nov. 16–21, 2003.
  25. A. Choudhury and B. Adhikari, *Polymer Composites*, **28**, 78 (2007)
  26. A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, Ed., *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005, Chapter 1.
  27. A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, *J. Polym. Environ.*, **10(1/2)**, 19 (2002).
  28. A. N. Netravali and S. Chabba, *Materialstoday*, **22** (2003).
  29. C. Baillie, *Comp. Sci Tech.*, **63**, 1223 (2003).
  30. M. Tolinski, *Plastics Engineering*, **18** (2005).
  31. R. Fisher, *Comp. Manufacturing*, **20** (2006).
  32. S. M. Lee, D. Cho, W. H. Park, S. G. Lee, S. O. Han, and L. T. Drzal, *Comp. Sci. Tech.*, **65**, 647 (2005)
  33. S. M. Lee, S. O. Han, D. Cho, W. H. Park, and S. G. Lee, *Polym. Polym. Comp.*, **13**, 479 (2005).
  34. S. O. Han, D. Cho, W. H. Park, and L. T. Drzal, *Comp. Interfaces*, **13**, 231 (2006).
  35. Y. Pang, D. Cho, S. O. Han, and W. H. Park, *Macromol. Res.*, **13**, 453 (2005).
  36. S. O. Han, S. M. Lee, W. H. Park, and D. Cho, *J. Appl. Polym. Sci.*, **100**, 4972 (2006).
  37. D. Cho, J. M. Seo, H. S. Lee, C. W. Cho, S. O. Han, and W. H. Park, *Adv. Comp. Mater.*, **16**, 299 (2007).
  38. D. Cho, H. S. Lee, S. O. Han, and L. T. Drzal, *Adv. Comp. Mater.*, **16**, 315 (2007).
  39. J. M. Seo, D. Cho, W. H. Park, S. O. Han, T. W. Hwang, C. H. Choi, S. J. Jung, and C. S. Lee, *J. Biobased Mater. Bioener.*, **1**, 331 (2007).
  40. Y. H. Han, S. O. Han, D. Cho, and H.-I. Kim, *Macromol. Res.*, **16**, 253 (2008).
  41. 한성옥, 미래선도기술이슈분석보고서, 한국과학기술정보연구원, 대전, 2007.