Elastomers and Composites Vol. 44, No. 1, pp. 13~21 (March 2009)

총 설

자연순환형 바이오복합재료

조 동 환†·김 현 중*
금오공과대학교 고분자공학과
*서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 환경재료과학전공
(2009년 2월 3일 접수, 2009년 2월 13일 수정 및 채택)

Naturally Cyclable Biocomposites

Donghwan Cho† and Hyun-Joong Kim*
Polymer/Bio-Composites Research Lab, Department of Polymer Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyungbuk 730-701 Korea
**Lab of Adhesion and Bio-Composites, Program in Environmental Materials Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea*
E-mail : *dcho@kumoh.ac.kr*
(Received February 3, 2009, Revised & Accepted February 13, 2009)

Ⅰ. 서 론

금세기에 들어 여러 선진국을 비롯한 많은 나라에서 지구촌 환경과 온난화에 대한 관심이 점점 커지면서, 지구환경을 살리고 보다 깨끗한 사회를 만들기 위해 정부차원에서 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 흐름에 맞추어 환경과 관련된 새로운 법규들이 만들어지고 강화되면서 친환경 물질 및 소재 개발에 대한 필요성이 강조되어 왔다. 현재 우리는 플라스틱이 없는 세상은 상상할 수 없는 환경에 살고 있으며, 플라스틱은 인류문명의 요소요소에서 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 혹자는 지금 우리는 석기시대, 청동기시대, 철기시대를 지나 고분자시대(Polymer Age)에 살고 있으며, 그 삶의 질은 고분자물질의 사용량과 비례한다고 주장하기도 한다.[1] 고분자 수지만으로 만들어진 플라스틱의 특성과 성능을 보다 향상시키기 위해 등장한 섬유강화 플라스틱 즉, FRP(Fiber-Reinforced Plastics) 또는 섬유강화 고분자복합재료는 지난 반세기이상 동안 선박, 자동차, 스포츠/레저, 건축, 토목, 생활용품 분야뿐만 아니라 항공우주 및 국방소재 등 첨단 분야에 이르기까지 널리 사용되어 왔다.[1-4]

섬유강화 고분자복합재료에 사용되는 강화섬유의 대부분은 유리섬유, 합성섬유 또는 탄소섬유로 이루어져 있다.[5] 그러나 이들 섬유는 자연친화적이 아니어서 폐기되었을 경우, 거의 영구적으로 분해되지 않기 때문에 그 폐기물은 여러 나라에서 환경오염을 초래하는 원인 중의 하나가 되고 있다. 그러므로 환경에 대한 시대적 요구와 함께 선진국의 많은 산업체들은 점점 고갈되어가고 있는 석유를 바탕으로 하는 소재를 자연계에서 값싸고 풍부하게 얻을 수 있는 천연자원을 바탕으로 하는 친환경 소재로 대체하려고 힘쓰고 있다.

현재 우리가 살고 있는 지구촌에서 환경은 기업의 사활이 걸릴 정도의 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 이슈는 지구온난화 방지를 위해 온갖 노력을 아끼지 않고 있는 선진국은 물론, '저탄소 녹색성장'을 슬로건으로 내놓은 우리나라에서도 더욱 강조된다. 석유자원에 산업의 근간을 두고 있는 주요 화학회사의 친환경소재 관련 연구개발팀에서는 새로운 개념의 친환경소재를 찾기 위한 많은 노력을 경주하고 있다. 특히 자동차부품소재 분야에서는 점차적으로 강화되는 환경규제에 부응하면서 부품경량화, 연료효율성 향상, 비용절감, 이산화탄소 감소, 구매력 증대 등 다목적 차원에서 내외·장 소재의 친환경화를 꾀하고 있다.[6]

이러한 목적에 가장 적절한 친환경소재의 하나는 바이오섬유(biofiber)라고도 부르고 있는 천연섬유(natural fiber)이다. 천연섬유는 기원전부터 인류문명에 도입되어 지금까지 사용되고 있으며, 오랫동안 세계 여러 나라에서 의복, 천, 장식품, 농업, 생활용품, 가옥구조물 등에 유용하게 쓰여 왔다. 이러한 사실은 우리의 초가집, 토담 등 옛 건축양식이나 전통문화에서도 쉽게 찾아볼 수 있다. 이제 천연섬유는 산업의 발전, 고도화된 기술 그리고 환경인식의 변화에 힘입어 현대 인류문명에 기여하면서 새롭게 적용되고 있다. 그 중 가장 대표적인 예가 바이오복합재료(biocomposite)라고 부르는 새로운 소재의 등장이다.[7-9]

본 논고에서는 지속가능한 천연자원인 천연섬유를 사용한 자연순환형 바이오복합재료의 필요성, 특성, 연구내용, 제조방법, 응용분야에 대하여 설명한다. 또한 바이오복합재료를 구성하고 있는 천연섬유에 대한 이해를 돕고자 천연섬유의 종류와 장단점에 대하여 간단히 기술한다.

Ⅱ. 왜 바이오복합재료인가?

자연순환적이며 지속가능성 천연소재를 사용하는 바이오복합재료는 선진국에서 이미 10여 년 전부터 환경오염의 방지와 지구온난화 대응을 위한 신소재 개발의 중요성을 인식하고 그 동안 많은 관심을 가지고 꾸준한 투자와 연구개발을 수행하여 온 분야이다. 특히, 점점 고갈되어 가고 있는 석유자원을 바탕으로 하는 유기소재를 자연에 매우 풍부한 천연소재 및 농작물 자원이 바탕이 되는 저렴하고 경량의 친환경 천연섬유를 사용하는 대체소재 개발에 초점을 맞추어 왔다. 이러한 자연순환형 바이오복합재의 개발은 우리나라 국가성장동력의 하나가 되는 21세기형 신소재 개발의 방향과도 부합된다. 또한 많은 양의 천연섬유의 활용과 바이오복합재료의 성능 향상에 따른 응용분야 확대는 천연섬유 재배와 이용가치를 높여주어 대기 중의 이산화탄소를 크게 저감시키는 시너지효과도 얻을 수 있다.[10]

고분자수지에 천연섬유의 첨가는 수지의 특성과 성능을 향상시킬 수 있으므로, 천연섬유는 기존의 유리섬유 및 합성섬유를 대신하여 FRP에 적용할 수 있는 적절한 대체섬유로 여겨진다. 이러한 목적에 쓰이는 천연섬유에는 여러 종류가 있으며, 그 특성 성능향상 정도는 고분자수지의 종류는 물론 천연섬유의 종류에 크게 의존한다.[11,12] 바이오복합재료의 매트릭스를 이루는 고분자수지는 크게 생분해성 수지, 열가소성 수지 및 열경화성 수지가 있다.[13] 다양한 종류의 고분자수지와 함께 친환경성 바이오복합재료 또는 그린복합재료(green composite)를 구성하는 주요 물질은 천연섬유이다. 바이오복합재료에 사용되고 있는 산업용 천연섬유의 대부분은 기후, 토양, 노동력 등의 이유 때문에 주로 인도, 방글라데시, 동남아시아, 남아메리카, 아프리카 등의 개발도상국이나 후진국에서 재배되고 생산된다. 천연섬유는 오랜 세월 동안 산업용소재와는 다소 거리가 있는 의류, 장식품 및 각종 생활용품에 주로 사용되어 왔으나, 20세기말부터 환경문제, 유가상승, 부품소재의 경량화, 원료비 절감 등이 세계적으로 중요한 산업 이슈로 등장하면서, 천연섬유를 활용한 바이오복합재료 분야에 여러 유럽 선진국을 비롯하여, 미국, 캐나다, 일본 등에서 큰 관심을 가지고 본격적인 연구단계를 거쳐 산업화에 이르기 시작하였다. 이러한 분위기는 금세기에 들어 자동차부품의 친환경화, 경량화, 연료효율성 향상 움직임과 함께 자동차를 생산하는 선진국 등을 중심으로 더욱 고조되었다.[13,14] Figure 1은 대표적인 천연섬유의 하나로 이산화탄소 감소효과가 뛰어난 케나

Figure 1. Life cycle of a natural fiber, a biodegradable polymer, and the biocomposite showing a naturally cycling route.

프(kenaf)와 옥수수로부터 얻어지는 대표적인 생분해성 고분자수지인 poly(lactic acid)(PLA)로 이루어진 바이오복합재료가 만들어지고 사용되고, 사용 후 폐기되어 자연으로 순환되는 사이클의 한 예를 보여준다.

우리나라도 이러한 친환경 바이오복합재료에 대한 필요성을 인식하고 지난 여러 해 동안 소수의 대학연구실과 산업체에서 연구개발 노력을 기울이고 있으나, 아직 그 산업기반은 다른 선진국에 비하여 매우 취약한 편이다. 그 이유는 선진국과 비교할 때, 우리나라가 천연자원의 재활용에 대한 사회적 인식, 청정환경에 대한 인식, 산업화에 대한 인식, 향후 석유고갈에 대한 위기의식의 부족, 미래 지향적 연구지원 부족 등에서 그 원인을 찾을 수 있다. 그러나 최근 지구온난화 방지와 '저탄소 녹색성장'에 초점을 둔 정부시책과 함께 친환경소재에 대한 중요성이 부각되고 있으므로 자연순환형 바이오복합재료에 대한 필요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다.

Ⅲ. 천연섬유 종류

천연섬유는 크게 식물성 섬유와 동물성 섬유로 분류된다. 식물성 섬유는 줄기(bast), 잎(leaf), 씨(seed) 등의 식물자원으로부터 일련의 섬유화 공정을 거쳐 얻어진 섬유를 가리킨다. 이들 섬유는 셀룰로스를 주성분으로 하고 있다. 식물의 줄기로부터 얻는 천연섬유에는 양마(kenaf), 황마(jute), 아마(flax), 대마(hemp), 저마(ramie) 등이 널리 알려져 있으며, 사막지역의 용설란과 같은 선인장의 잎으로부터 얻어지는 사이잘(sisal), 헤네켄(henequen), 우리에게 맛있는 과일은 제공해주는 파인애플잎과 바나나도 유용한 천연섬유 자원이기도 하다. 그리고 야자나무 씨/열매로부터 얻어지는 코이어(coir)섬유 그리고 케이폭(kapok) 섬유 등도 잘 알려져 있는 천연섬유이다. 또한 대나무섬유나 죽분(bamboo flour), 목재류나 목분(wood flour)도 널리 이용되고 있는 천연섬유에 포함된다. 동물성 섬유는 누에실크와 거미실크, 양모(wool)와 같이 동물이 그 생산주체가 되는 섬유를 일컬으며 이들은 단백질 성분으로 이루어져 있다. 동물성 천연섬유는 가격면에서 식물성 천연섬유보다 훨씬 비싸므로, 폐실크나 폐양모를 바이오복합재료에 적용한 결과도 보고되고 있다.[15,16] Figure 2는 산업용으로 사용되고 있는 식물성 천연섬유의 종류를 분류한 것이다.

자연순환형 바이오복합재료에 사용되는 산업용 천연섬유는 공급의 용이성, 재배/생산성, 가격, 공정성 그리고 사람들의 인식 등 여러 이유 때문에 동물성보다는 식물성 천연섬유가 보편적으로 널리 사용된다. 그 중에서도 산업용으로 양마, 황마, 아마, 대마와 같은 마종류의 천연섬유가 주종을 이루고 있으며,[17-21] 그 중에서도 최근에 대기 중 이산화탄소 저감효과가 가장 크다고 알려진 케나프라 부르는 양마에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 물론 제품의 응용분야와 목적에 따라 다른 천연섬유도 유용하게 사용되고 있다. 동물성 섬유의 경우 식물성 천연섬유에 비해 원료섬유의 공급에 어려움이 있고, 상대적으로 가격도 비싸므로, 적용에 제한을 받고 있으나, 우수한 기계적 특성 등 여러 장점을 지니고 있어 향후 응용 잠재성이 클 것으로 기대된다. Figure 3은 대표적인 식물성 천연섬유에 대한 명명, 특성, 응용분야 그리고 경작식물을 간략하게 소개한 것이다.

Ⅳ. 천연섬유 장단점

식물성 천연섬유는 셀룰로스(cellulose), 헤미셀룰로스(hemicellulose), 리그닌(lignin), 펙틴(pectin), 왁스(wax) 성분 등으로 이루어져있으며, 천연섬유 종류, 기후 그리고 재배지에 따라 각 성분의 조성비는 다를 수 있다. 또한 식물성 천연섬유는 물과 친화적인 성질을 띠고 있으므로, 본질적으로 화학구조 내에 약 7-13%의 물분자를 포함하고 있으며, 섬유 생산, 운송 및 보관 과정에서 도입된 분순물이 섬유표면에 존재할 수 있

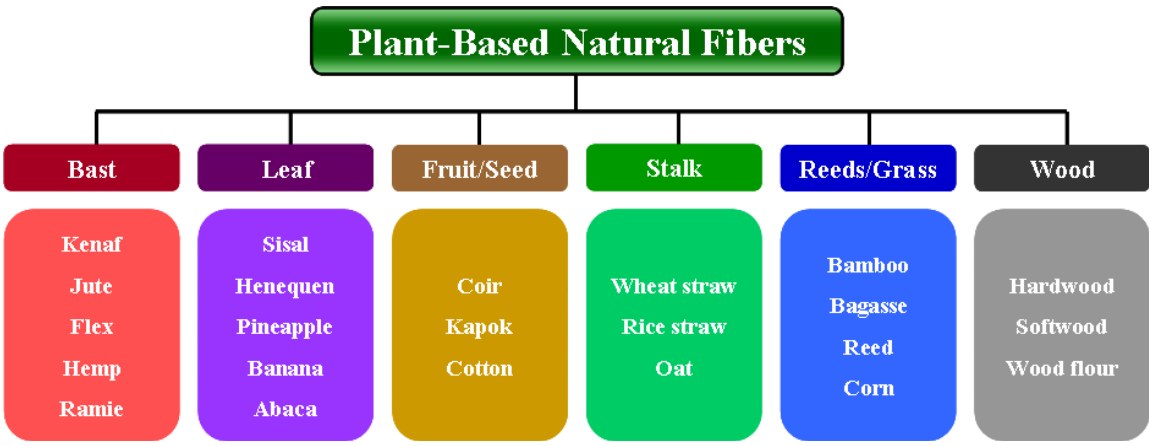

Figure 2. Classification of plant-based natural fibers.

천연섬유	명명	학명	특징	용도	식물경작
Kenaf	케나프 (양마)	*Hibiscus cannabinus L.*	줄기섬유, 비중 약 1.3, 성장속도 빠름, 이산화탄소 흡수 가장 높음, 표면 줄무늬, 강도가 낮음, 45-57% 셀룰로스, 21% 헤미셀룰로스, 8-13% 리그닌, 4%펙틴 함유	로프, 천, 종이, 건축재,축 사 바닥깔재, 흡수제, 바이오복합재료, 자동차부품소재	
Jute	쥬트 (황마)	*Corchorus capsularis*	줄기섬유, 비중 1.3-1.4, 강하고 잘 부러짐, 신률 낮음, 내미생물성, 내열성, 내구성, 61-71% 셀룰로스, 13-20% 헤미셀룰로스, 12%리그닌, 1%미만 펙틴 함유	건축내장재, 가구, 장식품, 카펫, 의류/직물, 바이오복합재료, 자동차부품소재	
Flax	플랙스 (아마)	*Linum usitatissimum L.*	줄기섬유, 비중 1.5, 강하고 유연함, 유럽 주산, 탄성이 좋고 신률이 낮음, 200℃이상에서 열분해, 75%셀룰로스, 15%헤미셀룰로스, 10-15%펙티, 3%리그닌 함유,	리넨섬유, 직물, 의복, 종이, 펄프, 자동차 내장재, 바이오복합재료	
Hemp	헴프 (대마)	*Cannabis sativa L.*	줄기섬유, 비중 1.47, 우수한 수분저항성, 높은 직물강도, 낮은 신률, 경작 용이, 70-74% 셀룰로스, 18-22% 헤미셀룰로스, 4-6% 리그닌, 1% 펙틴 함유	특수종이, 직물, 건축재,바이오복합재료, 포장재, 축사바닥깔재, 대마초,	
Sisal	사이잘 (용설란)	*Agave sisalana*	비중 1.45, 브라질 주산, 대표적인 잎 천연섬유, hard, smooth, straight,, yellow fiber, 66-78% 셀룰로스, 10-14% 헤미셀룰로스, 10-14% 리그닌, 10% 펙틴 함유	직물, 로프, 패널재, 트렁크 라이너, 자동차 내장재, 바이오복합재료	
Henequen	헤네켄 (에니깽)	*Agave fourcroydes*	사이잘과 매우 흡사한 성질, 멕시코 주산, 강도, 강인성, 탄력성 좋음, 낮은 탄성률과 신률, 약 60% 셀룰로스, 25% 헤미셀룰로스, 8% 리그닌, 2% 왁스 함유	String, hammocks, 의류직물, rugs, 바이오복합재료,	
Coir	코이어	*Cocos nucifera*	코코넛 열매에서 추출, 강도, 탄력성, 내구성 좋음, 질김, 흡음/방음 효과, 내미생물성, 약 32-43% 셀룰로스, 0.2% 헤미셀룰로스, 40-45% 리그닌, 4%펙틴 함유	직물, 첨구류, 로프, 브러쉬,지오텍스타일, 자동차 의자쿠션, 바이오복합재료,	

Figure 3. Features and applications of various cellulose-based natural fibers.

다. 셀룰로스는 섬유의 성질과 비어있는 내부 셀(cell) 구조의 유지에 크게 영향을 준다. 헤미셀룰로스는 약하게 가교된 상태로 존재하며 섬유의 성질에 크게 기여하지 않으나, 친수성을 띠고 있고, 알칼리에 용해된다. 리그닌은 페놀계 화합물로 셀벽 사이의 구조를 형성하며, 일반적으로 생분해성이 높지 않으나, 셀룰로스계 분해효소에 의해 분해가 가능하다.

천연섬유는 다음과 같은 여러 가지 장점 때문에 자연순환형 바이오복합재료 분야에 유용하게 쓰인다.[6,10] 식물성 천연섬유는 일 년에 여러 번 다모작이 가능하므로 생산성이 매우 높으며, 재배 국가의 풍부한 노동력과 함께 생산 단가도 매우 낮다. 천연섬유의 가격은 그 종류와 등급에 따라 다소 차이가 있지만, 유리섬유의 약 1/3-1/4 정도로 상당히 저렴하다. 천연섬유는 자연에서 완전히 생분해가 가능하며, 비중이 약 1.2~1.5 정도로 유리섬유의 약 50-60% 정도밖에 되지 않기 때문에 플라스틱에 적용하였을 때, 제품의 경량화와 함께 친환경화를 추구할 수 있다. 이는 동일 중량의 제품을 제조할 경우 저렴한 천연섬유를 더 많이 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 더욱이 천연섬유는 경작과 성장 과정에서 대기중에 존재하는 많은 양의 이산화탄소를 흡수하고 산소를 배출하기 때문에 지구온난화를 억제하고 지구청정화에 기여한다. 한 예로 케나프섬유 경작지 1 헥타르의 면적은 재배 한 주기 동안 약 30-40톤의 이산화탄소를 흡수할 수 있다고 알려져 있다. 또한 천연섬유는 유리섬유나 합성섬유와 달리 재활용이 가능하고, 사용 후 소각 시에도 대기 중의 이산화탄소 농도를 증가시키지 않는다. 따라서 대량의 천연섬유를 경작하는 과정에서 지구온난화의 주범이기도 한 이산화탄소의 감소에 크게 기여하므로 천연섬유를 '저탄소 녹색자원'이라 불러도 지나친 표현이 아니다. 아울러 천연섬유는 인체에 해가 없으며, 사용 중 피부에 접촉 시 가려움을 야기하지 않는다. 또한, 천연섬유가 포함된 플라스틱을 절단하거나 절삭할 때 기계의 마모를 줄여주기도 한다. 특히 식물성 천연섬유는 다공성 셀 구조를 지니고 있으므로 방음, 보온이 요구되는 건축 내장소재로 그 활용가치가 높다.

천연섬유는 장점이 많지만, 또한 단점도 가지고 있다.[6,10] 이러한 단점은 바이오복합재료의 생산과 응용 확대를 제한하는 요소이기도 하므로 취약점 해결을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 대표적인 취약점 중의 하나는 천연섬유는 물과 친한 친수성을 띠고 있기 때문에 수분에 민감하며, 물에 배타적인 소수성을 띠고 있는 대부분의 고분자수지와 천연섬유 사이의 계면에서 결합력 또는 접착력이 좋지 않다. 그러므로 천연섬유 표면을 개선하지 않고는 천연섬유와 고분자수지로 구성된

바이오복합재료의 특성 향상도 기대하기 어렵다. 산업제품의 목적상 천연섬유-고분자수지 사이의 계면접착력이 크게 요구되지 않고 우수한 성능을 필요로 하지 않는 부품을 대상으로 할 경우 천연섬유의 표면개선이 반드시 요구되지 않으나, 물성 향상과 우수한 성능이 요구되는 바이오복합재료 부품을 대상으로 할 경우에는 천연섬유의 표면개질은 필수적이다. 따라서 이러한 취약점을 해결하기 위해 천연섬유의 표면개질을 통한 바이오복합재료의 여러 가지 특성 향상에 대한 연구는 학계에서 꾸준히 보고되고 있다. Figure 4는 바이오복합재료의 장단점을 소개한 것으로, 이들 장단점의 많은 부분은 천연섬유에 의해 크게 좌우된다.

천연섬유는 식물이 경작되는 지역, 기후, 섬유위치 등에 따라 동종의 섬유에서도 섬유의 직경, 형상, 단면, 표면상태 및 특성에서 차이가 나타날 수 있다. 또한, 비교적 섬유직경과 표면이 균일한 유리섬유나 합성섬유와 달리, 천연섬유는 식물이 성장할 수 있는 크기의 한계 때문에 섬유길이에 제한이 있으며, 연속성 섬유를 얻기가 불가능하다. 아울러 천연섬유에 따라 다소 차이가 있지만, 천연섬유의 열안정성의 한계 때문에 약 220 ℃-250 ℃ 이내에서 성형/가공이 가능한 고분자수지를 사용하여야 하는 수지선택상의 제한을 받고 있다. 현재 우리나라에서 산업용으로 사용되고 있는 대부분의 천연섬유는 재배국으로부터 저렴한 가격에 수입하고 있다. 기후, 토양, 생산비용, 노동력 등의 이유 때문에 산업용 천연섬유를 우리나라에서 경작한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 우리와 유사한 여건에 있는 몇몇 나라의 업체에서는 지속적 원료확보 차원에서 독자적으로 외국의 천연섬유 경작지를 매입, 관리하면서 물량을 공급하고, 품질을 제어하는 경우도 알려지고 있다.

Ⅴ. 바이오복합재료 연구

바이오복합재료는 천연섬유와 함께 복합재료의 바탕이 되는 수지로 생분해성 고분자 또는 비생분해성 고분자를 사용한 소재를 총칭한다. 이 소재는 넓은 의미에서 바이오플라스틱에 포함되기도 한다. 천연섬유 자체의 기계적 강도나 탄성률은 유리섬유보다 상대적으로 낮은 값을 나타내나, 비중을 반영한 천연섬유의 비강도(specific strength) 및 비탄성률(specific modulus)은 유리섬유에 견줄만하다.[9] 이는 바이오복합재료가 가격, 경량성, 친환경성뿐만 아니라 특성 등을 종합적으로 고

Figure 4. Attractive and weak points of biocomposites made using natural fibers.

려할 때, 기존의 유리섬유복합재료를 위협할 수 있는 소재라는 것을 함축한다.

바이오복합재료에서 기계적 성질은 구성소재 및 공정조건과 같은 요소에 크게 의존한다. 고분자수지의 종류 및 특성, 천연섬유의 종류, 함량, 길이, 배향 그리고 제품 성형방법과 조건 등은 절대적으로 중요하다. 아울러 천연섬유와 고분자수지 사이의 강한 계면접착은 바이오복합재료의 우수한 특성과 성능에 기여하는 핵심요소이다. 이를 위하여 지난 수년 동안 천연섬유의 표면을 개선시켜 고분자수지와의 계면접착력을 증대시켜, 궁극적으로는 바이오복합재료의 기계적, 열적 특성 등을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 이들 연구의 상당 부분은 여러 가지 천연섬유의 표면을 화학적 또는 물리적 방법으로 처리하여 개질시킨 후, 고분자수지와 함께 성형/가공 공정을 거쳐 바이오복합재료를 제조하고, 그 특성을 탐구하는 내용을 포함하고 있다.

Figure 5는 최근 몇 년 동안 이슈가 되어온 천연섬유를 이용한 바이오복합재료에 대한 연구 및 특성분석 분야를 종합하여 요약한 것이다.[22-30] 첫째, 바이오복합재료를 구성하고 있는 천연섬유에 대한 기본특성 조사가 반드시 필요하다. 앞에서 언급한 바와 같이, 천연섬유와 고분자수지에 대한 계면결합력이 좋지 않기 때문에, 천연섬유의 표면개질 유·무에 따른 계면특성에 대한 연구가 선행될 수 있다. 둘째, 가장 널리 보고되고 있는 특성은 바이오복합재료의 기계적 특성에 대한 것이다. 이는 기계적 특성이 복합재료의 성능 및 응용과 밀접한 관계를 갖기 때문이다. 기계적 특성에는 굴곡과 인장특성, 동역학적 열특성, 충격저항성, 파단거동 등이 주로 연구된다. 셋째, 천연섬유의 열적 제한성 때문에 바이오복합재료의 열적 특성 변화에 대한 관심도 높다. 대부분의 천연섬유는 약 200 ℃ 이상의 성형온도에 민감하므로 사용되는 고분자수지 선택에 제한을 받을 수 있으나 천연섬유의 첨가는 바이오복합재료의 열적 특성을 향상시키는데 기여할 수 있다. 그러므로 열안정성, 열변형온도, 열팽창, 절연성 등은 연구하기에 좋은 이슈이다. 바이오복합재료를 적절하게 적용하기 위해 그들의 수명이나 long-term 특성에 대한 자료가 요구되기도 한다. 예를 들면, 내구성, 수분흡습성, 생분해성, 크리프 특성 및 피로도, 내환경성 등 장시간 동안의 측정이 동반되는 연구결과도 필요할 수 있다.

다음은 저자의 연구실에서 지난 수년간 진행되어 왔던 연구내용의 일부를 간단히 소개한다.[19,20,23,24,31-41] 연구에 사용된 식물성 천연섬유로는 케나프, 쥬트, 헤네켄, 코이어, 볏짚, 목분 등이 그리고 동물성 천연섬유는 실크, 폐실크, 폐양모 등이 있다. 연구목적에 따라 천연섬유의 선택은 매트릭스를 구성하는 열가소성 수지, 열경화성 수지 그리고 생분해성 수지에 맞춰 이루어졌으며, 이때 섬유의 형태, 길이, 가격, 공급성, 가공/성형성, 특성 등을 종합적으로 고려하였다. 바이오복합재료 제조에 사용된 열가소성 고분자수지로는 국내·외에서 유리섬유복합재료에 가장 널리 사용되고 있는 폴리프로필렌이 주요 대상이 되었으며, 리사이클링 차원에서 재활용플라스틱을

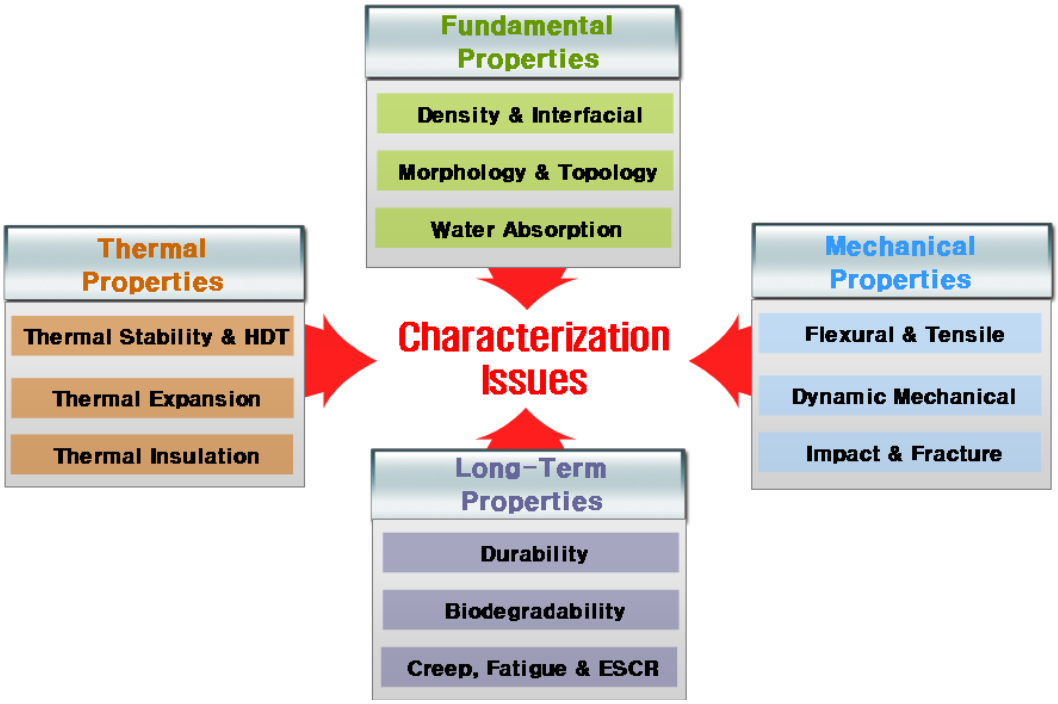

Figure 5. Characterization issues on fundamental, mechanical, thermal, and long-term properties of biocomposites.

사용하기도 하였다. 열경화성 고분자수지로는 가장 보편적인 불포화폴리에스터수지, 페놀수지, 그리고 휘발성 유기물질(VOC)을 포함하지 않는 새로운 개념의 친환경 폴리카다놀(polycardanol) 등이 사용되었다. 생분해성 고분자수지는 최근 관심이 높아지고 있는 poly(lactic acid)(PLA)와 poly(butylene succinate)(PBS)를 주로 사용하였으며, 현재 이와 관련된 연구를 확대하여 진행하고 있다. 최근에 천연고무와 천연섬유를 사용한 바이오복합재료도 연구대상이 되고 있다.

바이오복합재료의 성형/가공을 위한 기술로는 압축성형, 압축/사출성형 방법이 적용되었으며, 향후 바이오복합재료의 고성능화와 응용분야의 확산을 위해서 수지이송성형(RTM), 인발성형(pultrusion), 필라멘트 와인딩(filament winding) 성형과 같은 공정연구도 필요하다. 제조된 바이오복합재료를 구성하고 있는 물질에 대한 이해를 위해서는 천연섬유와 고분자소재에 대한 다각적인 기초조사가 동반되었다. 바이오복합재료의 굴곡, 인장, 충격 특성과 같은 기계적 특성, 열안정성, 열변형 온도, 내구성, 수분흡수성 그리고 이러한 성질과 천연섬유-수지의 계면접착 특성과의 연관성도 탐구되었다. 각종 천연섬유-고분자수지 계면접착 특성 개선을 위하여 바이오복합재료 성형 전에 천연섬유는 알칼리, 물, 실란화합물, 전자빔을 이용하여 다양한 조건에서 처리되었으며, 표면처리 또는 표면개질이 바이오복합재료의 여러 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

VI. 바이오복합재료 응용

바이오복합재료는 Figure 6에 보여주는 바와 같이, 현재 자동차부품용, 전자부품용, 건축내장용, 포장용, 스포츠/레저, 생활용품 소재 등으로 매우 다양하다. 자동차부품의 대표적인 예로는 내장재인 헤드라이너, 도어트림, 콘솔박스, 바닥재, 의자 등이 있다. 전자부품으로는 휴대전화기 케이스, 전자제품 하우징 등이 있으며, 건축용으로는 각종 내장용 패널, 옥외 데크 및 펜스, 바닥재 등에 사용된다. 각종 식품용기 및 포장재에도 천연섬유가 사용된 예는 미국, 유럽 등에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 또한 콘테이너 박스용 소재, 윈드터빈 블레이드 등에

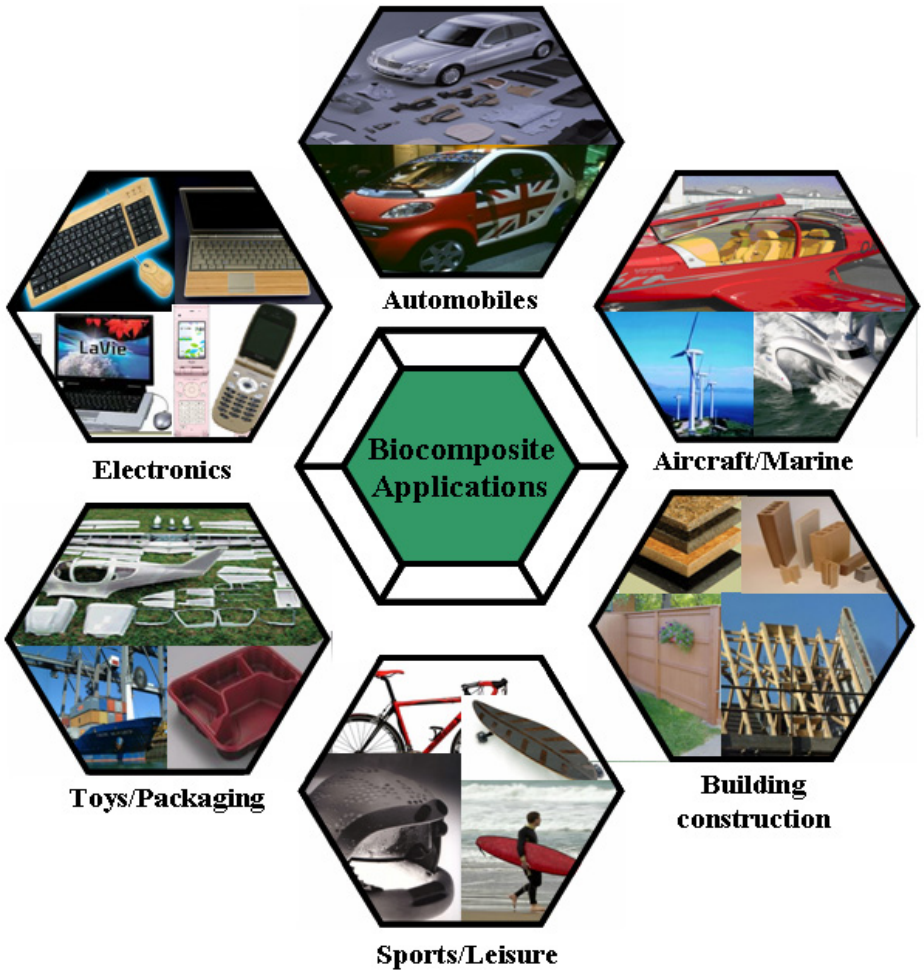

Figure 6. Current and potential applications of biocomposites with natural fibers.

사용된 예도 있으며, 탄소섬유와 함께 천연섬유를 사용하여 경량 스포츠용품을 제조하는 것도 소개되고 있다.

이러한 자연순환형 바이오복합소재 및 그 응용분야가 우리에게는 다소 생소하게 느껴질 수는 있으나, 일찍이 지구온난화에 관심을 가지고 환경규제에 대한 법규를 마련하고 강화시키고 있는 유럽, 미국, 일본 등 여러 선진국에서는 이와 같은 저탄소 녹색자원에 바탕을 둔 소재에 대한 연구·개발을 수행하여 왔으며, 현재 산업화와 함께 응용분야를 넓혀가고 있다.

최근 들어 PLA와 PBS 같이 완전히 생분해가 가능한 고분자수지에 대한 관심이 빠르게 증가하고 있다. 옥수수 전분으로부터 많은 연구개발 과정을 거쳐 상업화된 PLA는 현재 사용량의 증가와 함께 그 가격이 점차적으로 낮아지고 있다. PLA에 천연섬유를 도입하여 제조된 친환경 바이오복합재료는 현재 전자제품, 자동차부품 분야 등으로 응용이 확대되고 있다. 특히 케나프/PLA 바이오복합재료는 앞서 Figure 1에서 소개한 바와 같이, 케나프섬유와 PLA수지의 합성에 이용되는 옥수수 재배과정에서 대기 중의 이산화탄소를 흡수하고, 부품의 경량화와 친환경화가 동시에 가능한 대표적인 자연순환형 플라스틱이기 때문에 더욱 매력이 있는 소재로 떠오르고 있다.

Ⅶ. 맺 음 말

현재 사회적 이슈가 되고 있는 지구온난화와 석유자원의 점차적인 고갈, 천연자원의 공급과 지속가능성, 그리고 환경에 대한 사회적 인식의 변화는 환경친화적인 새로운 플라스틱 소재의 등장을 요구하고 있다. 전세계적으로 FRP 시장은 수십억에서 수백 억 달러에 이르며, FRP 제조에 사용되고 있는 섬유로는 유리섬유가 약 90% 이상을 차지하고 있다. 그 중 자동차부품소재 및 건축용 소재에 약 60% 정도가 사용되고 있으며, 선박부품, 전자부품, 생활용품 그리고 항공부품 소재 분야까지 광범위하게 응용되고 있다. 따라서 유리섬유를 본고에서 소개하고 있는 천연섬유로 어느 정도 대체할 수 있다면, 이는 천연자원의 재활용, 석유자원 의존성 감소, 지구온난화 대응과 지구촌 청정화, 부품소재의 경량화를 통한 에너지효율성 향상 등에 직접 또는 간접적으로 기여할 것으로 기대된다.

최근 생분해 고분자수지의 활용에 대한 산업체의 관심은 매우 빠른 속도로 높아지고 있다. 현재 기존의 열가소성수지를 등가의 생분해성 고분자수지로 대체하는데 걸림돌이 되는 주요 원인 중의 하나는 상대적으로 높은 원료비이다. 바이오복합재료 제조 시 상대적으로 저렴한 천연섬유의 사용은 생분해성 수지의 적용으로 증가된 원료비용을 완충시키는데 기여할 수 있다. 특성과 성능 보완 및 가격 절충을 고려하여, 혼합형 고분자수지를 사용하거나 혼합형 섬유를 적용한 하이브리드 바이오복합재료도 좋은 대안이기도 하다. 또한 천연섬유와 열가소성 수지의 경우 압출/사출공정 개선을 통한 성능향상을 꾀하고 있으며, 액체 상태의 열경화성 수지의 장점을 살려 보다 다양한 성형공정 기술을 적용하여 고성능 바이오복합재료를 개발하기 위한 노력을 기울이고 있다.

바이오복합재료에 대한 연구개발 더욱 확대되고 그 기술수준이 더욱 높아진다면, 현재 우리나라에서 일부 자동차 내장부품 및 건축 내장재에 국한되어 있는 천연섬유 응용분야를 향후 자동차 외장부품 및 건축 외장재 그리고 Figure 6에서 보여주는 전자부품, 포장재, 스포츠/레저, 선박/항공 분야까지도 그 영역을 넓힐 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 지금까지 천연섬유의 활용이 자동차 부품소재에 가장 두드러진 진전이 있어왔음을 비추어볼 때, 요즘 각광을 받고 있는 친환경 하이브리드 자동차의 부품소재로서 바이오복합재료의 적용이 가시화된다면 친환경에너지뿐만 아니라 친환경소재까지 겸비한 자동차 개발에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

"본 논문은 청정생산기술개발사업 지원에 의한 것이므로 이에 감사드립니다."

참 고 문 헌

1. A. B. Strong, "Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications", SME, Dearborn, 2008.
2. M. M. Schwartz (Ed.), "Composite Materials Handbook", McGraw-Hill, Inc., New York, 1992.
3. B. Z. Jang, "Advanced Polymer Composites: Principles and Applications", ASM International, Materials Park, 1994.
4. P. Morgan, "Carbon Fibers and Their Composites", Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
5. D. Hull, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
6. D. Cho, S. G. Lee, W. H. Park, and S. O. Han, "Eco-friendly biocomposite materials using biofibers", *Polym. Sci. Tech.*, **13**(4), 460 (2002).
7. D. Cho, "바이오복합재료", *Polym. Sci. Tech.*, **13**(1), 81 (2002).
8. A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, "Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world", *J. Polym. Environ.*, **10**(1/2), 19 (2002).
9. A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, (Eds) "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites", Taylor & Francis, Boca Raton (2005) Chapter 1.
10. D. Cho, "친환경 천연섬유를 활용하는 그린복합재료", Plastic Magazine, **22**, 44-51 (2006).
11. A. Rouilly and L. Rigal, "Agro-materials: a bibliographic review", *J. Macromol. Sci.*, **C42**(4), 441 (2002).
12. R. Fisher, "Natural fibers and green composites", *Composites Manufacturing*, **March**, 20 (2006).
13. S. G. Lee, D. Cho, W. H. Park, and S. O. Han, "Environmentally friendly composites using natural fibers", *Fiber Tech. Ind.*, **8**(4),

378 (2004).
14. B. Madsen and H. Lilholt, "Guideline for mechanical design with biocomposites: properties, weight and cost", *JEC Composites Magazine*, **37**, 37 (2007).
15. S. O. Han, S. M. Lee, W. H. Park, and D. Cho, "Mechanical and thermal properties of waste silk fiber-reinforced poly(butylene succinate) biocomposites", *J. Appl. Polym. Sci*., **100**, 4972 (2006).
16. K. H. Kim, D. Cho, and J. H. Kim, "Fabrication and properties of natural fiber-reinforced waste wool/polypropylene composites (NFRP)", *J. Adhes. Interf*., **9**(2), 16 (2008).
17. A. Arbelaiz, G. Cantero, B. Fernandez, I. Mondragon, P. Gañán, and J. M. Kenny, "Flax fiber surface modifications: effects on fiber physico mechanical and flax/polypropylene interface properties", *Polym. Compo*., **26**, 324 (2005).
18. G. Mehta, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and M. Misra, "Effect of fiber surface treatment on the properties of biocomposites from nonwoven industrial hemp fiber mats and unsaturated polyester resin", *J. Appl. Polym. Sci*., **99**, 1055 (2006).
19. J. M. Seo, D. Cho, W. H. Park, S. O. Han, T. W. Hwang, C. H. Choi, and S. J. Jung, "Fiber surface treatments for improvement of the interfacial adhesion and flexural and thermal properties of jute/poly(lactic acid) biocomposites", *J. Biobased Mater. Bioener*., **1**, 331 (2007).
20. Y. H. Han, S. O. Han, D. Cho, and H.-I. Kim, "Kenaf/polypropylene biocomposites: effects of electron beam irradiation and alkali treatment on kenaf natural fibers", *Compo. Interfaces*, **14**(5/6), 559 (2007).
21. Y. Li and K. L. Pickering, "Hemp fibre reinforced composites using chelator and enzyme treatments", *Compo. Sci. Tech*., **68**, 3293 (2008).
22. A. K. Mohanty, L. T. Drzal, D. Hokens, and M. Misra, "Eco-friendly composite materials from biodegradable polymers: biocomposites to nanocomposites," *Polym. Mater. Sci. Eng*., **85**, 594 (2001).
23. S. M. Lee, D. Cho, W. H. Park, S. G. Lee, S. O. Han, and L. T. Drzal, "Novel silk/poly(butylene succinate) biocomposites: the effect of short fiber content on their mechanical and thermal properties", *Compo. Sci. Tech*., **65**, 647 (2005).
24. L. A. Pothan, S. Thomas, and G. Groeninckx, "The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banan fibre/polyester composites", *Composites: Part A*, **37**, 1260 (2006)..
25. S. S. Tripathy, G. Levita, and D. Landro, "Interfacial adhesion in jute-polyolefin composites", *Polym. Compo*., **22**, 815 (2001).
26. A. K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen, "Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview", *Macromol. Mater. Eng*., **276/277**, 1 (2000).
27. S. Shibata, Y. Cao, and I. Fukumoto, "Lightweight laminate composites made from kenaf and polypropylene fibres", *Polym. Test.*, **25**(2), 142 (2006).
28. P. J. Franco and A. Valadez-Gonzalez, "A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites", *Composites: Part B*, **36**, 597 (2005).
29. S. H. Aziz and M. P. Ansell, "The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composits: Part 1-polyester resin matrix", *Compo. Sci. Tech*., **64**, 1219 (2004).
30. M. Abdelmouleh, S. Boufi, M. N. Belgacem and A. Dufresne, "Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading", *Compo. Sci. Tech*., **67**, 1627-1639 (2007).
31. B. Y. Chu, M. Y. Kwon, S. G. Lee, D. Cho, W. H. Park, and S. O. Han, "Interfacial adhesion of silk/PLA biocomposites by plasma surface treatment", *Adhes. Interf*., **5**(4), 9 (2004).
32. Y. Pang, D. Cho, S. Ok Han, and W. H. Park, "Interfacial shear strength and thermal properties of electron beam-treated henequen fiber reinforced unsaturated polyester composites", *Macromol. Res*., **13**(5), 453 (2005).
33. S. O. Han, D. Cho, W. H. Park, and L. T. Drzal, "Henequen/poly(butylene succinate) biocomposites: electron beam irradiation effects on henequen fiber and the interfacial properties of biocomposites", *Compo. Interf.*, **13**(2/3), 231 (2006).
34. D. Cho, S. M. Lee, S. G. Lee, and W. H. Park, "Effect of acetylation and plasma treatment on the interfacial and thermal properties of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/woven flax fabric biocomposites", *Am. J. Appl. Sci*., **Special Issue** (Bio-compatible and Bio-composite Materials), 17 (2006).
35. D. Cho, J. M. Seo, H. S. Lee, C. W. Cho, S. O. Han, and W. H. Park, "Property improvement of natural fiber-reinforced green composites by water treatment", *Adv. Compo. Mater*., **16**(4), 299 (2007).
36. D. Cho, H. S. Lee, S. O. Han, and L. T. Drzal, "Effects of E-beam treatment on the interfacial and mechanical properties of henequen/polypropylene biocomposites", *Adv. Compo. Mater*., **16**(4), 315 (2007).
37. H. S. Lee, D. Cho, and S. O. Han, "Effect of natural fiber surface treatments on the interfacial and mechanical properties of henequen/polypropylene biocomposites", *Macromol. Res*., **16**(5), 411 (2008).
38. J. M. Seo, D. Cho, and W. H, Park, "Alkali treatment effect of kenaf fibers on the characteristics of kenaf/PLA biocomposites", *J. Adhes. Interf*., **9**(4), 1 (2008)
39. D. Cho, H. S. Lee, and S. O. Han, "Effect of fiber surface modification on the interfacial and mechanical properties of kenaf fiber-reinforced thermoplastic and thermosetting polymer composites", *Compo. Interf.*, Accepted for publication.
40. D. Cho and S. B. Yoon, "Cellulose-based natural fiber topography and the interfacial shear strength of henequen/unsaturated polyester composites: influence of water and alkali treatments", *Compo. Interf.*, Accepted for publication.
41. Q. Zhou, D. Cho, B. K. Song, and H.-J. Kim, "Novel jute/polycardanol biocomposites: effect of fiber surface treatment on their properties", *Compo. Interf.*, Accepted for publication.