

박테리아 셀룰로오스의 제조와 활용 분야

전 세 라 · 박 지 원 · 김 현 중[†]

서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 접착과학 및 바이오복합재료 연구실

Manufacturing and Applications of Bacterial Cellulose

Sera Jeon, Ji-Won Park, and Hyun-Joong Kim[†]

Lab. of Adhesion & Bio-Composites, Program in Environmental Materials Science,
Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract: 첨단 융합산업의 급성장으로 제품의 다양화가 이루어짐에 따라, 최근 고부가가치의 새로운 소재에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중에서 바이오매스 기반의 나노셀룰로오스는 물리적 · 화학적 · 생물학적 관점에서 다양하게 접근이 가능하며, 그 접근 방법에 따라 분류가 달라진다. 나노셀룰로오스의 최근 개발 동향과 나노셀룰로오스를 제조하는 방법, 그 중에서도 미생물의 합성에 의해 제조될 수 있는 박테리아 셀룰로오스의 특징을 달리할 수 있는 제조방법 및 특성 등을 살펴보고, 박테리아 셀룰로오스가 산업의 여러 분야에 적용되는 예시 등을 기술하였다.

Keywords: bacterial cellulose, static cultivation, agitated cultivation, applications

1. 나노셀룰로오스 개발 동향

나노(Nano)란 그리스어로 난장이를 뜻하는 ‘나노스(Nanos)’에서 유래된 말로서 ‘작다’라는 의미이다. 최근, 10^9m 의 크기인 ‘나노’ 재료를 활용한 나노기술(NT: Nanotechnology)의 다양한 산업 적용의 연구는 활발히 진행되고 있다. 이러한 나노분야의 연구들은 아직까지 나노클레이(Nanoclay) 또는 탄소 나노튜브(CNT: Carbon nanotube)와 같은 무기물을 이용하는 연구에 초점이 맞춰져 있었지만, 최근 들어 천연 고분자 중 하나인 나노셀룰로오스(Nanocellulose)를 이용한 다양한 산업적 측면의 연구개발 및 적용이 주목을 받고 있다. 셀룰로오스는 가장 풍부한 천연 고분자이고 재생 가능한 재료로부터 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 기존에 사용되던 무기물질과는 달리 폐기 시에도 토양 속에서 자연적으로 분해되는 생분해성 특성을 갖고 있기 때문에 기존의 첨단재료들에 비해 친환경적

인 특징이 있다. 또한 합성 섬유보다 가격이 저렴하다는 특징을 가진다[1,2].

일반적으로 사용되어온 고분자에 나노기술의 적용은 기존에 갖고 있던 물리적 · 열적 성질 및 높은 결정화도를 생성해주는 장점을 가진다. 셀룰로오스의 경우, 충전재로 사용되어오던 마이크로 크기의 섬유보다 200배 큰 표면적을 가진 나노셀룰로오스로 대체 시, 강화제로 소량 첨가 시에도 보강효과가 매우 뛰어난 특징 및 우수한 중형비를 가지는 장점을 가진다[3].

본 총설에서는 나노셀룰로오스의 원료의 종류와 제조방법에 따른 특성, 그 중에서 친환경 공정에 의해 미생물에 의해 제조될 수 있는 박테리아 셀룰로오스가 보강된 나노복합재료의 특성과 이를 기반으로 가능한 적용분야의 연구 방향에 대해 고찰하고자 한다.

[†]주저자 (E-mail: hjokim@snu.ac.kr)

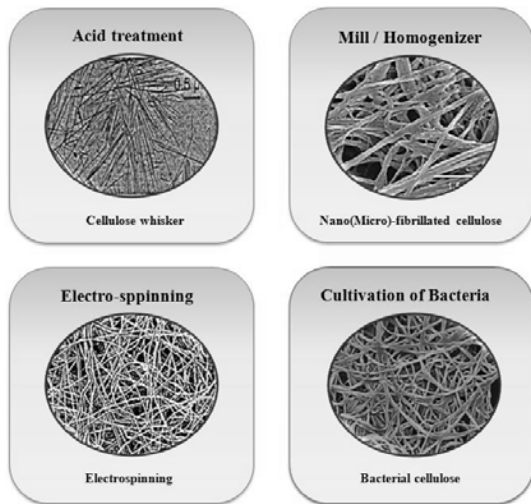


Figure 1. Kinds of nanocellulose[4].

2. 나노셀룰로오스의 제조방법에 따른 종류 및 특징

나노셀룰로오스는 그 제조방법에 따라 크게 4 가지로 분류할 수 있다(Figure 1). 산 가수분해방법을 활용한 나노휘스커(Nanowhisker), 기계적-물리적 처리 방법을 통한 나노(혹은 마이크로)피브릴 셀룰로오스(Nano-fibrillated cellulose, NFC, Micro-fibrillated cellulose, MFC), 전기방사를 통한 전기방사 나노셀룰로오스(Electrospinning nanocellulose), 마지막으로 박테리아 배양을 통해 생산된 박테리아 셀룰로오스(Bacterial cellulose)가 있다.

2.1. 화학적 처리에 의한 나노휘스커 제조

일반적으로 셀룰로오스는 다음과 같이 결정, 비결정영역으로 이루어져 있다. 이러한 결정영역의 차이로 화학적으로 분해해 제조되는 나노셀룰로오스가 나노휘스커이다. Figure 2는 산 처리 방법에 의해서 나노셀룰로오스를 제조하는 과정을 나타낸 것이다. 이때 산에 의해 비결정영역은 글루코오스로 가수분해되고 결정영역은 각기 분리되어 작은 크기의 나노셀룰로오스를 형성하게 된다.

앞선 방법을 통해 제조된 나노휘스커는 막대모

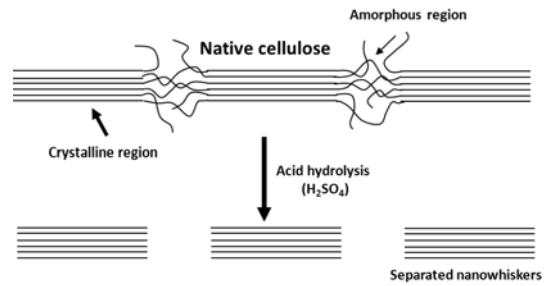


Figure 2. Scheme of acid treatment process of nanocellulose[5].

양의 결정성 셀룰로오스로 이루어지고, 일반적으로 너비는 5~70 nm, 길이는 100 nm~수 μm 크기를 가지게 된다. 나노휘스커는 마이크로피브릴 셀룰로오스와 유사한 크기를 보이지만 비결정 영역을 포함하지 않기 때문에 대부분 유연하지 않은 특징을 가진다. 이렇게 얻어진 나노셀룰로오스는 침상모양을 하고 있으므로 나노휘스커라고 불린다.

2.2. 물리적 처리에 의한 나노(혹은 마이크로)피브릴 셀룰로오스의 제조

나노휘스커 제조 기술을 접근하기 쉽다는 장점이 있으나, 수율이 낮고 셀룰로오스의 분해정도가 심하다는 단점이 있다. 뿐만 아니라, 황산 혹은 염산 등 강산을 주로 사용하므로 친환경적인 방법으로는 부적합하다는 평가를 받고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 사용되는 물리적 처리 방법은 다음과 같다.

마이크로 피브릴화 셀룰로오스(MFC)는 식물세포벽으로부터 분해된 피브릴화된 셀룰로오스를 말한다. 목재로부터 MFC의 제조는 Turbak 등에 의해 처음으로 연구되었으며, MFC의 제조는 Sandberg 등에 의해 처음으로 연구되고 알려졌다. MFC를 제조하기 위한 방법은 초음파, 고압, 동결파쇄법 등이 있는데, 그 중에서 주로 고압(High pressure) 처리 법인 호모게나이저(Homogenizer)와 같은 기계적 처리 방법을 통해 제조된다. 호모게나이저를 통해 섬유는 박리되고 마이크로 피브릴화되며(Figure 3), 이렇게 형성된 마이크로 피브릴은 높

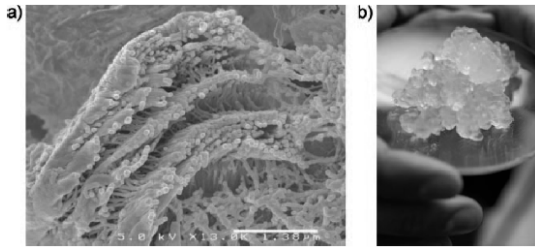


Figure 3. a) Electron microscopy (magnification: 13,000 ; scale bar: 1.38 μm) of the cross-section of a spruce-fiber cell wall, showing fibril aggregates 20 nm in width (courtesy: Geoffrey Daniels, SLU, Sweden). b) Photograph of an MFC hydrogel (courtesy: Innventia AB, Sweden)[6].

은 종횡비를 가지고 수분 상태에서는 겔과 같은 특성을 보인다[6].

2.3. 전기방사에 의한 셀룰로오스 제조

나노섬유를 제조하는 방법 중 하나인 전기방사법은 낮은 점도 상태의 폴리머 용액을 순간적으로 방사하는 것으로 간편하면서도 효율적인 방법으로 알려져 있다. 이렇게 형성된 나노섬유는 개개의 섬유들이 무질서하게 방사된 부직포 형태로 얻어지는데 유연성이 좋으며 표면적이 큰 다공성 구조체이다[8].

현재 전기방사 나노섬유는 센서, 촉매, 광전기 분야 및 의료장치 등에 활용되고 있으나 이러한 전기방사 나노섬유를 확대시키기 위해서는 기계적 강도를 보다 크게 향상시켜야 한다. 최근 이러한 단점을 해결하기 위한 대표적인 연구 방법으로 고분자 매트릭스에 나노셀룰로오스 입자를 보강시키는 연구가 계속적으로 수행되고 있다.

2.4. 박테리아의 생합성에 의한 박테리아 셀룰로오스의 제조

식물세포벽의 구성요소 이외에도 셀룰로오스는 박테리아 중에 의해서 생성될 수 있다. *Acetobacter*속, *Rhizibium*속, *Agrobacterium*속 등이 널리 알려져 있는데, 그 중에서 생산 수율이 가장 우수한 미생물은 호기성 *Acetobacter xylinum*이다. 박테리아 셀룰로오스는 탄소와 질소가 포함된 배지 안에

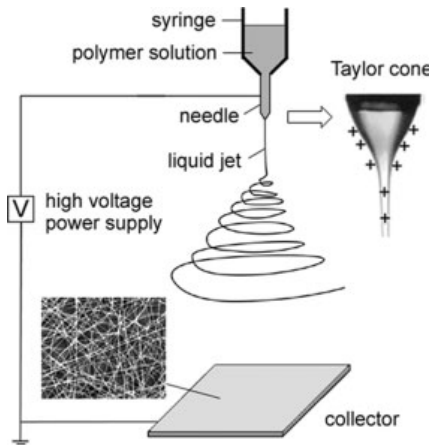


Figure 4. Schematic illustration of the basic setup for electrospinning[7].

서 배양하면 배양액의 계면에 흰색의 피막이 형성된다. 이렇게 형성된 박테리아 셀룰로오스는 높은 기계적 강도와 극도로 미세하고 순수 셀룰로오스로 구성된 3차원 망상구조를 가진다. 또한, 일반적인 식물섬유의 경우 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 등으로 이루어져 있지만, 박테리아 셀룰로오스는 순수 셀룰로오스로만으로 이루어져 따로 제거할 필요가 없는 특징을 가진다[9-12]. 이러한 망상구조의 피막은 랜덤으로 형성된 리본 모양의 피브릴화된 셀룰로오스이며, 그 너비는 100 nm보다 작고 반지름이 2~4 nm인 무수한 많은 미세한 마이크로 피브릴로 이루어져 있고, 이러한 박테리아 셀룰로오스 마이크로 피브릴은 1600 kg/m³의 밀도를 가진다[13,14]. 또한, 높은 결정화도(84~89%)와 78 MPa인 고유의 성질을 가지기 때문에 일반적으로 보고된 Macro-scale의 천연 섬유보다 높거나 유리섬유의 탄성률(70 GPa)과 비슷한 성질을 보일뿐 아니라, 충분한 공극을 가지며, 생체 적합성이 매우 우수한 특징을 보인다[15,16].

Brown (1976) 등은 최초로 *Acetobacter xylinum*를 배양하는 가운데 배지의 윗부분에서 자라나는 하얀색의 균막 층을 발견하였고, 이를 셀룰로오스라고 보고하였다.

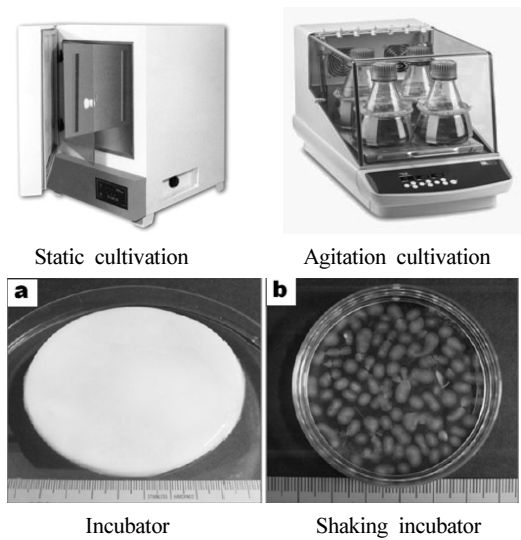


Figure 5. (a) BC pellicle formed through static cultivation and (b) BC pellet formed through agitated cultivation [17].

3. 박테리아 셀룰로오스 배양방법에 따른 특징

박테리아 균막은 아세트박테리아일리눔(*Acetobacter xylinum*)인 박테리아에 의해 순수 셀룰로오스로 배양되며, 배양 방법은 다음과 같이 정지배양법(Static cultivation)과 진탕배양법(Agitated cultivation)이 있다. 이러한 2가지 방법으로 형성된 박테리아 셀룰로오스는 셀룰로오스를 생산하는 질과 양에 큰 영향을 미친다.

우선 정지배양 방법은 먼저 박테리아를 배지에 이식한 후, 플라스크에서 대략 10일 동안 선반 등에 그대로 놓아두며 배양하는 방법이다. 아세트박테리아일리눔은 호기성 균으로 배지의 표면의 탄력이 있는 얇은 막이 생성된다. 형성된 셀룰로오스 균막은 0.25 M 수산화나트륨 수용액으로 여분의 박테리아를 제거함과 동시에 순수셀룰로오스를 얻게 된다. 이후 증류수를 이용하여 반복적으로 세척해준다. 위와 같은 방법으로 박테리아 셀룰로오스가 제조된다.

또 다른 방법인 진탕배양법은 액체 배지를 통해 셰이킹 인큐베이터에서 계속적으로 일정한 속도로 교반하면서 배양하는 방법이다. 이렇게 형성된

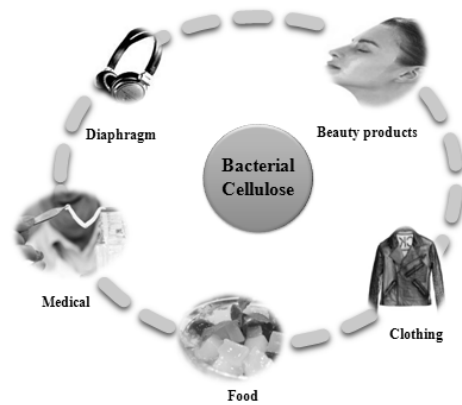


Figure 6. Applications of bacterial cellulose.

박테리아 셀룰로오스는 정치배양된 박테리아 셀룰로오스와 결정화도에 있어서 큰 차이를 보인다. 진탕배양을 통해 생성된 박테리아 셀룰로오스의 경우 결정화도의 사이즈가 작아지게 되는데, 교반하는 동안 셀들이 원심력에 의해 구형으로 모여들게 되기 때문이다(Figure 5)[17,18].

진탕배양법의 경우 교반배양을 하면 전단력에 의해 박테리아 셀룰로오스를 생산하지 못하고 Cellulose negative mutant (cel-)가 생성되는 단점이 있으므로 교반배양에서도 안정한 균주의 분리 및 특성에 대한 연구도 진행되고 있다[19].

4. 박테리아 셀룰로오스의 활용

4.1. 의료용 재료로서의 활용

박테리아 셀룰로오스는 생체적합성과 기계적 성질이 우수하며, 밀도가 낮아서 인공피부, 인공연골, 창상보호제, 인공혈관, 화상치료제 등에 응용할 수 있는 첨단 소재로서 Biofill®, Bioprocess®와 Gengifles® 등은 실제로 의료용 재료로서 활용하고 있다. 특히 2도, 3도 화상의 경우 손상된 피부점막은 순간적으로 덮는 인공 피부로서 끈적끈적한 박테리아 셀룰로오스로 사용하며 Biofill®이 널리 사용되고 있다. 300회 이상의 치료결과에 관한 연구 및 보고에 의하면, 진통완화 효과, 상처 부위에 높은 결합성, 수술 후 안정효과, 감염률의



Figure 7. Artificial blood vessel (Credit : Image courtesy of University of Gothenburg).

감소, 투명성에 의한 상처 부위의 감염여부 확인, 낮은 처리비용과 시간 등의 장점이 있다[20-22].

4.2. 미용 재료로서의 활용

부직포 시트에 화장수가 도포된 상태에서 마스크 자체에 화장수를 농축한 겔타입으로 발전한 하이드로겔마스크팩의 경우, 에센스가 피부에 흡착되어 흘러내리지 않고 얼굴에 균일하게 침투할 수 있다. 또한 수분농도가 높아 마스크가 피부 표면에 닿으면 처음에는 제품의 수분이 증발하면서 피부 표면의 열을 식혀 피부를 진정시킨 후, 이후 접촉한 피부표면 온도가 상승하면 겔 성분이 녹아 피부로 스며들게 된다. 하지만 하이드로겔의 경우 피부 밀착을 높이기 위해 화학접착제를 사용하여 피부 자극의 원인이 되기도 한다[24].

반면, 천연 식품 소재의 제 2의 피부라고 불리는 새로운 개념의 차세대 신소재인 박테리아 셀룰로오스는 화장품 업계에서는 바이오셀룰로오스로 일컫는다. 3차원 망상구조로 이루어진 바이오셀룰로오스는 종래의 부직포 마스크 팩보다 표면적이 넓고 치밀하여 찢어지지 않고, 제 2의 피부처럼 피부 밀착력이 뛰어나고 10배 이상의 습윤성을 보유하고 있어 고농축 에센스의 증발을 막아 피부 흡수율을 높여줄 수 있다. 또한 자연 친화적인 천연 소재로 피부안정성이 매우 우수하다[25]. 실제로 루벨리(RUBELLI), 크리스티뉴욕(Christy New York) 바이오셀룰로오스 팩이나 최은경의 바이오셀룰로



Figure 8. Beauty production of bacterial cellulose[23].



Figure 9. Nata De Coco.

오스 팩 등 실제 산업에서 바이오셀룰로오스를 기반으로 한 다양한 마스크팩이 출시되고 있다.

4.3. 식용 재료로서의 활용

식이섬유는 가용성과 불용성 두 종류가 있다. 펙틴(과일), 알긴산(해조류), 구아검(아이스크림) 등의 가용성 식이섬유와는 달리, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌(옥수수, 콩, 채소), 키틴(갑각류 껍질) 등은 불용성 식이섬유에 속한다. 불용성 식이섬유는 팽윤성으로 인하여 위장에서 포만감과 장관에서의 연동촉진, 그리고 흡착성으로 인하여 잉여 담즙산과 중금속, 이물 등을 흡착하여 그 유해작용을 감소한다[26].

나타드코코(Nata De Coco)는 원산지인 필리핀이 스페인의 식민지였을 때 처음 생겨났다. 스페인 사람들이 이 음식을 코코넛의 크림(Coconut's cream)이라는 뜻의 스페인어인 나타드코코라고 부르기 시작했다. 코코넛주스를 사용하여 *Acetobac-*



Figure 10. Photograph of optically transparent BC/GPTMS composite film fabricated according to GPTMS concentrations[28].

*ter xylinus*로 발효시키면 셀룰로오스 겔상태로 만들어지는데, 이때 배지를 파인애플즙을 사용하여 생산하면 나타드 파나(Nata de Pina)가 된다[27].

식품산업에서는 박테리아 셀룰로오스 섬유의 겔 형성능과 수분흡수성 등의 특성을 다양하게 사용할 수 있다. 박테리아 셀룰로오스는 기능성 식품 첨가소재로서 다이어트 식품으로서도 활용 가능성이 높다. 이를 첨가하여 식감이 뛰어나며, 보수성을 이용하여 특정한 맛, 성분 또는 향을 첨가하면 특유의 제품을 생산할 수 있다. 사과나 포도, 코코넛, 그리고 최근 우리나라의 감귤 등의 주스를 생산배지로 활용하여 대량생산 할 수 있다. 이는 잉여 농산물을 활용하여 고부가가치의 소재를 생산함으로써 국내산 과일의 새로운 제품을 창출하는 면에서도 큰 장점을 가진다[20].

4.4. 전기·전자 재료로서의 활용

셀룰로오스의 경우 기관재료로 쓰이며 가벼운 재료로서 전기·전자 재료로서 사용이 증가되고 있다.

박테리아 셀룰로오스에 실란 GPTMS(3-glycidoxypropyltrimethoxysilane)의 농도를 달리하여 복합재료를 제조한 결과, 농도가 증가할수록 박테리아 셀룰로오스의 섬유 간의 응집을 억제하여 투명도가 향상되는 것을 알 수 있었으며, 열안정성 또한 향상되어 플렉서블 기관으로의 적용가능성이 소개된 바 있다[28].

또한, 다공성 셀룰로오스 재료인 박테리아 셀룰로오스는 금속 또는 전도성 필름과 같은 고밀도 물질과는 다른 전기적 특성이 필요한 전자 기기의 사용을 확대할 수 있다[29]. 박테리아 셀룰로오

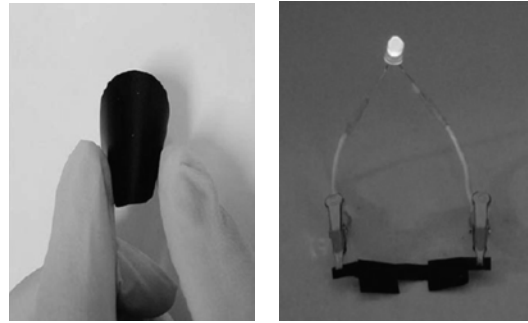


Figure 11. Electrode material of conductive bacterial cellulose (left), LED flexible super capacitor (right)[21].

스의 표면에 전도성 고분자를 중합하거나, 전처리로 실란처리를 통해서 전도성을 향상시키는 연구 등을 진행하였으며, 그 결과 실란 전처리 과정을 통하여 보다 박테리아 셀룰로오스 3차원 망상구조의 표면에 전도성 고분자인 폴리아닐린과 아미노 실란 처리로 개질된 셀룰로오스 표면의 아민기와 친화력을 보여 치밀하고 균일하게 고분자를 중합시킬 수 있었으며 그로 인해 전도성이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 제조된 전도성 고분자/박테리아 셀룰로오스 복합재료는 생체적합성과 전기 전도성이 동시에 요구되는 화학적·생물학적 센서, 저용량 에너지 장치 등에 적용될 수 있을 것으로 보인다[30-33].

박테리아 셀룰로오스를 이용하여 플렉서블슈퍼커패시터를 개발했다. 이 슈퍼커패시터는 기계적 강도, 화학적 안정성, 굽힘에 대한 저항성 및 내구성에서 매우 우수한 특성을 가진다. 이 연구 결과로부터 신소재 공학적 지식이 미래의 플렉서블슈퍼커패시터 개발에 근본적인 토대가 될 수 있음을 보여준다[21].

또한 의학, 미용, 식품 분야는 물론 전지·전자 소재로서 이온전지 분리막, 슈퍼커패시터, 디스플레이, 태양전지, 전자종이 및 센서 등에 이용될 가능성이 높다[21].

4.5. 그 밖의 활용

박테리아 셀룰로오스는 인장강도 및 기계적 성질이 높아 고강도 재료로서 사용이 가능하며, 실

제로 일본의 SONY사에서는 이를 사용하여 스피커의 음향진동판에 활용하여 고성능 헤드폰을 판매한다. 음향진동판은 음파속도(Sonic velocity)와 내부적으로 음파가 흡수되는 성질인 손실계수(Internal loss)가 높아야 한다. 일반적으로 음파속도는 인장탄성계수를 밀도로 나눈 값인 비인장탄성계수의 제곱근에 비례한다. 하지만 박테리아 셀룰로오스는 높은 음파속도(5000 m/s)에도 불구하고 손실계수가 높아 음향기구인 스피커와 헤드폰의 진동판에 이용되고 있다. 그 밖에도 고유의 특성을 이용한 다양한 제품 개발이 가능할 것으로 기대된다[20,21].

5. 결 론

나노셀룰로오스를 제조하는 과정에 있어서 화학적 처리시 강산인 황산 등을 사용하여 환경에 악영향을 끼치거나, 물리적 처리시 많은 에너지가 필요함에 따라 문제점이 제기되고 있다. 반면, 박테리아 셀룰로오스는 이러한 문제점을 극복하여 박테리아의 생합성으로 기타 화합물 없이 순수한 셀룰로오스를 얻을 수 있다. 친환경적인 방법으로 생산이 가능한 나노셀룰로오스인 박테리아 셀룰로오스 소재의 응용 분야는 새롭게 주목받는 연구 영역이다.

박테리아 셀룰로오스의 높은 기계적 물성, 결정화도, 3D 나노구조를 가지는 순수한 셀룰로오스로서 의료용, 미용, 식용, 전기전자 분야 등 다양하게 적용되고 있다. 뿐만 아니라, 최근 감귤부산물을 발효시켜 감귤 바이오겔을 개발하면서 농업부산물을 이용하여 고부가가치 상품 개발 및 산업화 성과가 주목받고 있다[34]. 앞으로 산업의 적용성을 극대화 하여 미래의 첨단 신소재로서의 이용이 기대된다.

감 사

본 연구는 교육부의 한국연구재단(NRF) 기초 과학 연구 프로그램에 의해 지원되었다(NRF-2011-

0009390).

참 고 문 헌

1. 이선영, 목재로부터 나노 복합소재를 만든다. *산림*, **25**, 98 (2007).
2. M. Jonoobi, K. O. Niska, J. Harun, and M. Misra, Chemical Composition, Crystallinity, and Thermal Degradation of Bleached and Unbleached Kenaf Bast (*Hibiscus cannabinus*) Pulp and Nanofibers. *BioResources*, **4**, 626 (2009).
3. K. Oksman, A. P. Mathew, D. Bondeson, and I. Kvien, Manufacturing Process of Cellulose Whiskers/Poly(lactic Acid) Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, **66**, 2776 (2006).
4. D. Klemm, F. Kramer, S. Moritz, T. Lindström, M. Ankerfors, D. Gray, and A. Dorris, Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, **50**, 5438 (2011).
5. S. Renneckar, A. Zink-Sharp, A. R. Esker, R. K. Johnson, and W. G. Glasser, Cellulose Nanocomposites: Processing, Characterization and Properties, Oskman K., Sain M. Ed., ACS Symposium Series 938, Washington, DC. 78 (2006).
6. D. Klemm, F. Kramer, S. Moritz, T. Lindstrom, M. Ankerfors, D. Gray, and A. Dorris, Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie-International Edition*, **50**, 5438 (2011).
7. D. Li and Y. Xia, Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel? *Advanced Materials*, **16**, 1151 (2004).
8. 서정만, 양철호, 전기방사법을 사용한 셀룰로오스 나노섬유 생성에 관한 연구. *대한기계학회 재료 및 파괴 부문 춘계학술대회 논문집*, 261 (2010).

9. K. Oksman and M. Sain, Cellulose nanocomposites: processing, characterization, and properties. *American Chemical Society* (2006).
10. H. S. Barud, C. Barrios, T. Regiani, R. F. C. Marques, M. Verelst, J. Dexpert-Ghys, Y. Messaddeq, and S. J. L. Ribeiro, Self-Supported Silver Nanoparticles Containing Bacterial Cellulose Membranes. *Materials Science and Engineering: C*, **28**, 515 (2008).
11. J. G. Douglas, S. O. Gloria, M. Ryan, and M. A. S. A. Samir, Adhesion and Surface Issues in Cellulose and Nanocellulose. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **22**, 545 (2008).
12. J. Shah and R. Malcolm Brown, Towards Electronic Paper Displays Made From Microbial Cellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **66**, 352 (2005).
13. J. Colvin and G. Leppard, The Biosynthesis of Cellulose by *Acetobacter xylinum* and *Acetobacter acetigenus*. *Canadian Journal of Microbiology*, **23**, 701 (1977).
14. W. Williams and R. Cannon, Alternative Environmental Roles for Cellulose Produced by *Acetobacter Xylinum*. *Applied and Environmental Microbiology*, **55**, 2448 (1989).
15. W. Czaja, D. Romanovicz, and R. M. Brown, Structural Investigations of Microbial Cellulose Produced in Stationary and Agitated Culture. *Cellulose*, **11**, 403 (2004).
16. G. Guhados, W. K. Wan, and J. L. Hutter, Measurement of The Elastic Modulus of Single Bacterial Cellulose Fibers Using Atomic Force Microscopy. *Langmuir*, **21**, 6642 (2005).
17. P. Chen, S. Y. Cho, and H. J. Jin, Modification and Applications of Bacterial Celluloses in Polymer Science. *Macromolecular Research*, **18**, 309 (2010).
18. W. Czaja, D. Romanovicz, and R. M. Brown, Structural Investigations of Microbial Cellulose Produced in Stationary and Agitated Culture. *Cellulose*, **11**, 403 (2004).
19. S. Valla and J. Kjosbakken, Cellulose-negative Mutants of *Acetobacter xylinum*. *Journal of General Microbiology*, **128**, 1401 (1987).
20. O.-S. Lee and Y.-J. Jeong, Industrial Application and Biosynthesis of Bacterial Cellulose. *The Korean Society of Food Industry and Nutrition*, **6**, 10 (2001).
21. 이선영, 미생물 셀룰로오스의 첨단 신소재 응용. *산림*, 67 (2012).
22. 이선영, 나노셀룰로오스 신소재 연구동향II. *한국목재신문* (2011).
23. 강태진, 이승재, 최다혜, 미생물 셀룰로오스의 의료 제품 이용. *BioWave*, **11**, 1 (2009).
24. 하이드로겔 시트 vs 바이오셀룰로오스 시트, <http://cjr.is.blog.me/120164435660>.
25. 루벨리 마스크팩 광고문구.
26. 식이섬유, http://www.memi.co.kr/board/index.php?boardid=board_data&mode=view&no=4&start=20&search_str=&val=&PHPSESSID=f6fd249485f2777a0d828ad38f8984e6.
27. 나타 드 코코(Nata de Coco), <http://blog.naver.com/ki910?Redirect=Log&logNo=20172956548>.
28. H.-J. Kwon, Improvement of Thermal Stability and Optical Transparency Properties of Bacterial Cellulose - Epoxysilane Composite. A Thesis for the Degree of Master of Science, Seoul National University (2013).
29. J.-G. Lee, J.-H. Ryu, and H.-J. Yoon, Conductive Paper through LbL Multilayering with Conductive Polymer: Dominant Factors to Increase Electrical Conductivity. *Cellulose*, **19**, 2153 (2012).
30. B.-H. Lee, H.-J. Kim, and H.-S. Yang, Polymerization of Aniline on Bacterial Cellulose and Characterization of Bacterial Cellulose/

- Polyaniline Nanocomposite Films. *Current Applied Physics*, **12**, 75 (2012).
31. H.-J. Lee, T.-J. Chung, H.-J. Kwon, H.-J. Kim, and W. Tze, Fabrication and Evaluation of Bacterial Cellulose-Polyaniline Composites By Interfacial Polymerization. *Cellulose*, **19**, 1251 (2012).
 32. H.-J. Lee, Aminosilane Treatment of Bacterial Cellulose and Its Application to Improve Electrical Conductivity. *A Thesis for the Degree of Master of Science, Seoul National University* (2012).
 33. B.-H. Lee, Preparation and Chracterization of Bacterial Cellulose Nanofiber-based Nanocomposite Films. *Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Seoul National Univerisity* (2011).
 34. 김성진, 제주의 바이오산업, *제주도민일보* (2012).

저자소개



전 세 라

2006 국민대학교 임산생명공학과 학사
 2012~현재 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 석사과정



박 지 원

2008 서울대학교 산림과학부 환경재료과학 전공 학사
 2008~현재 서울대학교 산림과학부 환경재료과학 전공 석박사 통합과정



김 현 중

1987 서울대학교 임산공학과 학사
 1989 서울대학교 임산공학과 석사
 1995 The University of Tokyo 생물재료과학과 박사(고분자재료-접착과학)
 1995~1996 Virginia Polytechnic Institute & State Univ., Center of Adhesive & Sealant Science, 화학과 박사 후 연구원
 1996~1999 State Univ. of New York at Stony Brook 재료공학과, NSF-Center for Polymer at Engineered Interface 책임연구원
 1996~1998 Brookheven National Lab. 물리학과 겸임연구원
 1999~현재 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 교수
 2008~2009 Dept. of Chemical and Biochemical Engineering, Colorado School of Mines, 방문교수
 2010~현재 Dept. of Materials Science & Engineering, State Univ. of New York at Stony Brook 겸임교수