TECHNOLOGY NEWS 기·술·뉴·스

원할 때 사라지는 새로운 플라스틱

플라스틱(plastic)은 전자제품에서 자동차와 포장 재료에 이르는 모든 제품에서 인기를 끌고 있다. 일단 폐기되면, 플라스틱은 영구적으로 매립지와 해양에 남게 된다. 미국 노스다코타 주립대학(North Dakota State University, NDSU) 소속의 연구진이 수행한 새로운 연구는 신규 유형의 플라스틱이 특정 유형의 빛에 노출될 때 분해될 수 있으며, 이후 새로운 플라스틱을 생성하는 데 이용될 수 있는 분자로 환원될 수 있다고 밝혔다.

NDSU 산하 지속 가능한 재료 과학 연구소 소속의 연구진이 수행한 개념 증명 실험의 개요가 *Angewandte Chemie* 저널에 발표됐다. 다학제간 연구팀은 화학 및 생화학부 연구진이 포함됐다. 저명한 교수인 Mukund Sibi, Sivaguru Jayaraman, James A. Meier, 박사 후 연구원인 Saravana Rajendran, 석사 과정 학생인 Ramya Raghunathan, 박사 후 연구원인 Retheesh Krishnan, 연구원인 Angel Ugrinov 및 코팅 및 고분자 재료학부 학장이며 교수인 Ivan Hevus 등이 연구팀으로 참여했다.

연구팀은 농작물, 셀룰로오스, 리그닌 및 플라스틱을 생성하기 위하여 고분자로 만들어진 분자의 빌딩 블록(building block)을 생성하는 수크로오스 등으로부터 오일 씨드(oilseed)를 이용한 바이오매스(biomass)에 초점을 맞추었다. 21세기 큰 도전 과제 중 하나는 화석 연료의 의존성을 줄이는 지속 가능성이다. ND EPSCoR(North Dakota Experimental Program to Stimulate Competitive Research)과 공동으로 NDSU는 재생 가능한 자원인 바이오매스를 이용하여 고분자와 복합재료를 준비하는 프로그램을 개발하는 지속 가능한 재료 과학 연구소(Center For Sustainable Materials Science)를 설립했다.

실제적인 지속 가능성은 플라스틱을 분해하여 빌딩 블록으로 되돌리는 것이 포함된다. 연구진은 플라스틱을 빌딩 블록으로 분해할 수 있으며, 다시 고분자로 만들 수 있다는 것을 보여주었다고 Sibi 박사는 밝혔다.

실험 증명 개념에서, 연구팀은 이후 플라스틱(고분자)으로 전환될 수 있는 분자 방안을 생성하기 위하여 과일에서 일반적으로 찾아볼 수 있는 과당(fructose)을 이용했다. 3시간 동안 350 nm의 자외선(ultraviolet light)에 플라스틱을 노출시킴으로써, 연구진은 플라스틱을 분해했으며, 플라스틱을 용해가 가능한 빌딩 블록 분자(building block molecules)로 다시 환원시킬 수 있었다.

플라스틱은 보통 수백 년 동안 분해되지 않으며, 고체 폐기물 문제를 발생시킨다. 플라스틱은 일반적으로 느리게 분해되고, 연소될 때 대기로 독소를 생성시키거나 환경으로 화학물질을 침출시킬 가능성이 있다. 쉽게 분해될 수 있는 플라스틱을 생성하기 위한 이러한 전 생애 접근(cradle-to-cradle approach)은 화석 연료에 대한 의존성을 감소시킬 수 있으며, 필요한 원재료의 양을 감소시키는 궁극적인 제품을 위한 과학적 가능성을 제공한다고 Webster 박사는 밝혔다.

연구진의 전략은 사용 후, 환경에서 원하지 않는 화학물질의 스트레스를 완화하기 위하여 빛을 이용하여 분해될 수 있는 바이오매스로부터 새로운 재료를 구축할 수 있는 가능성을 가진다. 이러한 관점을 해결하기 위한 연구가 현재 실험실에서 진행 중이라고 Sivaguru Jayaraman은 밝혔다.

Sibi 박사 실험실은 단량체와 바이오기반의 기폭제를 제작했다. Siva 박사 연구진은 광화학적 과학과 광분해(photo degradation)에 전문적인 특성을 보유하고 있다. Webster 박사 연구팀은 고분자 화학을 연구하고 있다. 이러한 팀워크가 플라스틱을 원하는 때 분해할 수 있는 연구를 가능하게 하고, 연구팀이 이러한 문제를 해결하는 데 모든 분야의 전문가를 필요로 한다고 Sibi 박사는 밝혔다.

연구진은 추가적인 연구가 가능한 제품 상용화가 발생하기 전 바이오매스로부터 유도된 가능한 플라스틱의 내구성과 강도를 평가할 필요가 있다고 밝혔다. 플라스틱을 분해하기 위하여 사용하는 가장 우수한 촉발제는 무엇인가? 연구팀이 제작할 수 있는 가장 우수한 고분자는 무엇인가에 대한 고심도 필요하다고 Sibi 박사는 밝혔다. 향후 2년 이내에, 연구팀은 이 공정이 다른 품목뿐 아니라 자동차와 전자기기 등에 사용됐던 플라스틱

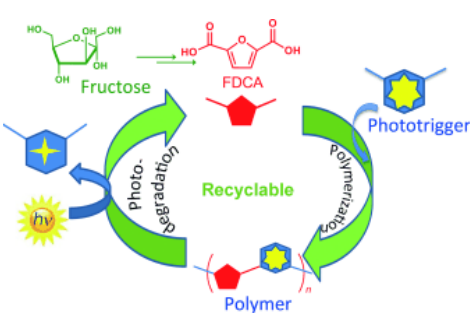

그림 1. 바이오매스 기반 올리고머에 유래한 고분자의 광분해 개념도.

에 어떻게 사용될 수 있는가를 조사할 계획이다.

<S. Rajendran *et al.*, *Angewandte Chemie International Edition*, DOI: 10.1002/anie.201408492 (2014)>

양성자를 통과시키는 그래핀

모든 기체 및 액체가 투과할 수 없는 그래핀(graphene)이지만 양성자(proton)는 쉽게 투과할 수 있다는 사실이 맨체스터대학(University of Manchester) 연구팀에 의해 발견되었다.

*Nature*지에 게재된 본 연구는 연료전지 및 다른 수소기반의 기술에 혁신을 가져올 것으로 기대되는데, 이런 기술에서는 수소 만이 통과할 수 있도록 하는 차단막이 필요하기 때문이다. 게다가, 그래핀 멤브레인은 대기에 미량으로 존재하는 수소를 추출해 내는데 사용할 수 있기 때문에 공기로 구동되는 전기 발전기의 가능성을 높여주고 있다.

원자 한 개 정도의 두께를 가진 그래핀은 2004년 맨체스터대학(University of Manchester)에서 처음 분리 및 연구되었으며, 독특한 차단 능력 때문에 유명해졌다. 이런 차단 능력은 부식방지 코팅이나 불침투성 포장과 같은 다양한 분야에 활용될 수가 있기 때문이다. 예를 들어, 가장 작은 원자인 수소는 그래핀 단일층을 평생토록 통과하지 못할 것이다.

Andre Geim이 이끄는 연구팀은 그래핀이 양성자도 차단할 수 있는지를 조사하였다. 연구팀은 양성자도 수소와 마찬가지로 그래핀을 통과할 수 없을 것이라는 기존의 이론예측을 바탕으로, 양성자의 투과가 차단될 것으로 예상했었다. 이런 예측에도 불구하고, 양성자는 매우 얇은 결정을 매우 쉽게 통과하였으며 특히 높은 온도 및 백금과 같은 촉매 나노입자로 그래핀 표면을 코팅했을 때 양성자의 통과가 더욱 용이한 것으로 나타났다.

본 연구를 통해, 그래핀 및 유사한 물질인 질화붕소(boron nitride)의 단일층은 양성자 전도성 멤브레인(proton-conducting membrane)으로서의 유망한 물질로 대두되게 되었다. 양성자 전도성 멤브레인은 현대 연료전지의 핵심이다. 연료전지는 연료로서 산소와 수소를 사용하며, 투입된 화학적 에너지를 전기로 변환시킨다. 다른 물질의 통과를 억제하면서 양성자의 흐름을 가능하게 하는 멤브레인이 없다면, 이런 기술은 존재하지 못할 것이다.

비록 잘 정립되었음에도 불구하고 연료전지 기술은 실용화를 위해 더 많은 개선을 필요로 하고 있다. 주요한 걸림돌 중 하나는 기존의 양성자 멤브레인을 통한 연료의 교차현상(fuel crossover)으로, 연료전지의 효율성 및 내구성을 저하시킨다.

맨체스터대학 연구팀은 그래핀 혹은 질화붕소 단일층의 사용으로 기존 멤브레인을 더욱 얇고 효율적으로 제조할 수 있어서, 연료의 교차 및 오염문제가 감소하게 될 것이라고 밝혔다. 이로써 연료전지의 경쟁력도 향상될 것이다.

또한 원자 한 개 두께 정도의 멤브레인은 습한 대기로부터 수소를 추출하는데 이용할 수도 있다고 연구팀은 밝혔다. 이런 방식의 수소 수확은 연료전지와 결합하여, 대기 중 수소를 연료로 사용하는 휴대용 발전기의 출현을 가능하게 할 것으로 기대된다.

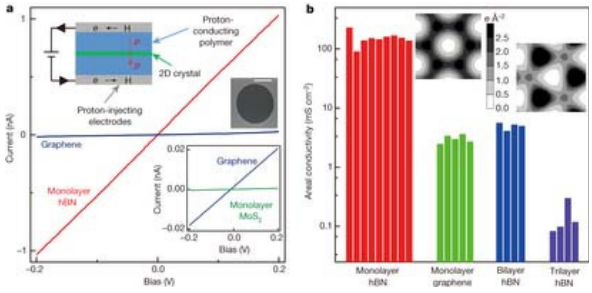

그림 2. 2차원 재료를 통과하는 양성자의 이동 (a) hBN, graphite, MoS_2에서 얻어진 I–V 곡선, (b) 다른 2차원 소재에서 관측된 양성자의 전도도.

연구팀은 작은 멤브레인을 대상으로 연구를 수행했으며, 지금까지 수소의 흐름량은 당연히 적었다. 그러나 본 발견의 초기 단계에 불과하기 때문에, 수소를 수확하는 능력은 향후 훨씬 개선될 것으로 기대된다. 본 연구의 제1저자이자 박사후 과정 연구원인 Sheng Hu 박사는, 본 연구가 매우 단순하면서도 동시에 전망이 밝다고 밝혔다. 오늘날 그래핀은 평방미터 단위의 시트 형태로 생산되기 때문에, 조만간 상업용 연료전지에도 적용될 수 있을 것이다.

<S. Hu *et al.*, *Nature*, **516**, 227, DOI:10.1038/nature14015 (2014)>

고분자에서 전자들의 이동 경로를 밝히는 기술: 속도 무제한의 시대

영국 캠브리지대(University of Cambridge)의 연구자들이 저비용으로 쉽게 프로세싱되는 반도체 고분자(semiconducting polymer)를 만드는데 성공했다. 이 고분자들은 보기에는 정렬되지 않은 내부 구조를 지녔지만 실제로는 비싼 결정형 무기 반도체(crystalline inorganic semiconductor)만큼 효과적으로 전자를 전달할 수 있다.

이 새로운 고분자에서 자유롭게 돌아다니는 전자의 비율이 약 70%가 되는 반면, 일반적인 고분자에서는 그 수치가 50%에 미치지 못한다. 내부의 무질서도 제한 수치에 접근하는 물질들은 보다 빠르고 효율적이며 유연한 전자기기나 디스플레이를 만드는데 있어서 중요한 역할을 한다. 이 결과들은 저명한 과학 저널인 *Nature*지에 게재되었다.

수년 동안, 연구자들은 용액 처리되거나 프린트될 수 있으며 (보다 저렴한 비용으로 전자기기를 만들 수 있다) 뛰어난 전기 기기의 속성을 지닌 반도체 고분자(semiconducting polymers)를 찾고 있었다. 이러한 물질들은 프린트된 전기 회로, 대면적 태양전지, 플렉서블 LED 디스플레이 등에 이용될 수 있다. 하지

만, 이러한 물질들이 지니고 있는 주요한 문제는-특히, 이들이 복잡한 습식 코팅, 빠른 드라이 프린팅 공정을 겪는 경우-이들이 대부분의 전자기기나 광전자 기기에서 보이는 정렬된 형태의 결정 격자를 지닌다기 보다는 스파게티가 담긴 사발같은 내부 구조를 지니고 있기 때문이다.

이러한 문제들이 기기의 성능을 저하시키기 때문에 연구자들은 전자들을 위한 가장 적합한 구조를 만들고자 하고 있다. 중합체 분자들은 적어도 하나의 긴 길이의 뼈대(backbone chain)와 옆 쪽의 곁사슬들로 구성된다. 이 옆사슬들이 공유결합된 고분자들의 프로세스가 쉽도록 해준다. 하지만 이러한 현상은 또한 사로잡혀 있는 전자들의 양을 증가시켜 기능을 저하시킨다.

캠브리지의 연구자들이 지금까지 옆 사슬에 의해 도입되는 무질서의 형태에 극도로 저항성을 지니는 일종의 공유결합 고분자를 발견했다. 이에 대해 동 대학의 카벤디쉬연구소(Cavendish Laboratory) 소속의 Mark Nikolka는 "이러한 물질들에 있어서 가장 놀라운 것은 이들이 미세구조의 수준에서 무질서하다는 것이다. 하지만 전자 수준에서, 이들은 결정형 무기 반도체에서처럼 자유롭게 전자가 이동할 수 있게 해 준다"고 말했다.

분자 시뮬레이션과 결합된 전기적, 광학적 측정을 이용해, Henning Sirringhaus가 이끄는 연구팀은 전자적으로 그 물질들이 무질서도의 한계에 근접하고 있으며 고분자 사슬에 따라 존재하는 모드 분자들이 전하의 이동에 참여할 수 있다는 것을 보여주었다. 연구자들은 이 결과를 이용해 다양한 종류의 무질서도 공유결합 고분자들을 만들 계획을 지니고 있다.

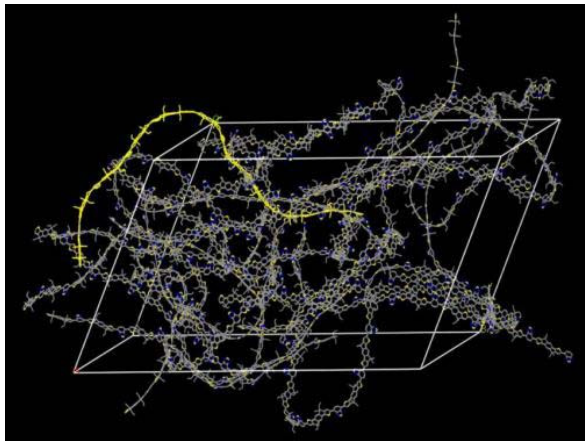

그림 3. 무정형 구조를 지닌 뛰어난 성능의 반도체 고분자의 모습.

<D. Venkateshvaran *et al*., *Nature*, **515**, 384
DOI: 10.1038/nature13854 (2014)>

본 기술뉴스는 KISTI 미리안의 글로벌동향브리핑
(http://mirian.kisti.re.kr)에서 발췌하여 정리하였습니다.

〈김병수, e-mail: bskim19@unist.ac.kr〉