

바이오 기반 재료

: 바이오에서 배운다. 바이오를 이용한다. 그리고 그 이상의 재료를 상상한다.

남기태

자연은 규칙적이고 정적으로 보이는 거대한 속에 변화무쌍한 아름다움을 감추고 있으면서 오랫동안 인류에게 관찰의 대상으로 예술적, 과학적 영감을 주고 있다. 무한해 보이는 자연을 우리는 경외롭게 바라보면서도 동시에 이용하고 정복할 수 있는 자산으로 여기기도 한다. 자연이 만들어낸 재료를 얼마나 효과적으로 이용하는 것이 문화의 수준을 결정짓는 척도였던 시절이 있었다면, 현재는 천연재료보다 훨씬 뛰어난 특성을 지니고 있는 인공적인 재료를 대량으로 합성하고 이를 용이하게 가공하는 것이 목표다. 그런데 최근 들어 과학의 발전과 함께, 생명체가 나노 물질을 생성/정렬하고 이용하는 원리들이 새롭게 밝혀짐에 따라 자연의 분자생물학적인 거동들이 주목 받기 시작했다. 인공합성물을 만들고자 하는 노력이 결과적으로 자연으로 눈을 돌리게 한 것이다. 자연에서 배우고 영감을 받아 바이오와 나노재료 기술을 결합하고자 하는 노력은 지금까지 인류가 상상하지 못했던 기능성 소자 및 재료 개발을 가능하게 할 것이라고 기대된다.

1. 바이오 재료

통상적으로 바이오 재료는 의료용 기구 및 소자에 사용되는 재료를 지칭했다. 하지만, 지금은 그 의미가 확장되어, 생명체에서 추출되고 생물학적 활성이 유지되고 있는 재료 또는 단백질과 같은 생체 분자를 구성요소로 사용하는 하이브리드 재료를 포함하기도 한다. 지금보다 훨씬 오래 전부터 바이오 재료를 개발하고자 하는 사람들의 열망이 있었던 것은 이집트 유물에서도 확인할 수 있다. 2000년에 이집트 고대 도시

인 테베(Thebes) 근처의 무덤에서, 절단된 엄지발가락을 대체한 것으로 여겨지는 목재 보철이 발견된 것이다(그림 1). 방사성 원소분석에 따르면 기원전 1069년에서 644년 사이에 만들어진 것으로 추정하고 있다. 지금으로부터 약 3000년 전에 생체의 한 부분을 재료로서 대체하려는 노력이 있었다는 것은 놀라운 일이 아닐 수 없다. 지금은 바이오 재료의 영역이 훨씬 다양해져서, 고분자, 세라믹과 금속 등 다양한 재료와 첨단 가공기술들이 이용되고 있다. 상용화된 제품의 숫자 및 종류만 해도 수없이 많을 뿐 아니라, 2000년도 이후 더 크게 증가하는 추세이다. 인공 관절, 인공 뼈, 심장용 스텐트(stent), 보철재료 등이 그 예이다. 더불어 1970년대 분자 생물학의 혁명과 1990년대 이후의 단백질 유전 정보학의 발전으로 인해, 바이오 재료를 디자인하고 이용하는 방법에 있어서 혁명적인 변화의 움직임이 나타나고 있다. 세포 및 조직과 직접적으로 연동하고, 생체 반응을 조절하는 활성 작용기 분자들이 복합적으로 함유된 재료들이 설계되고 만들어지기 시작한 것이다. 한가지 예로서, 초기의 인공 뼈는 생체 친화성이 우수한 세라믹이나 금속재료를 이용하여 뼈를 물리적으로 대체하는 것이 일차적인 용도였다면, 최근에는 뼈 형성 단백질(bone morphogenetic protein) 발현이나, 줄기세포분화를 촉진할 수 있는 것도 중요한 역할로 간주된다. 생화학 기작을 일으키는 합성분자나 바이오 분자들을 포함하고, 효과적인 뼈 세포 재생 및 증식을 가능하게 하는 3D 세포 배양 구조(3D cell culture scaffold)를 지닌 인공 뼈들이 활발하게 연구되고 있고 상용화를 앞두고 있다.

2. 바이오 재료의 새로운 도전: 의료용을 넘어서

지금까지 바이오 재료가 대부분 의료용으로 사용되는 재료를 지칭했다



그림 1. Cairo 박물관에 소장된 이집트 유물.¹



남기태

2000 서울대학교 재료공학부(학사)
2002 서울대학교 재료공학부(석사)
2007 MIT Department of Materials Science and Engineering(박사)
2007~2010 Lawrence Berkeley National Laboratory, Molecular Foundry(Post-Doc.)
2010~ 서울대학교 재료공학부 조교수
현재

Bio-based Nanomaterials Beyond Biological Application

서울대학교 재료공학부(Ki Tae Nam, Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, San 56-1, Kwan Ak Gu, Seoul 151-742, Korea) e-mail: nkitae@snu.ac.kr

면, 이제는 다른 영역에서 바이오의 응용 가치가 새롭게 부각되기 시작했다. 존재하지 않았던 신개념의 재료를 디자인하고 합성하는데 바이오가 이용되고 있는 것이다. 이렇게 새롭게 태동하고 있는 재료분야를 “바이오 기반 재료”라 칭하고자 한다. 바이오를 기반으로 한 재료의 범주는 다음과 같이 정리될 수 있다. 1) 바이오 물질(단백질, 세포)을 구성요소로 한 재료, 2) 바이오 물질의 자기 조립(self assembly) 현상을 이용하여 만들어진 재료, 3) 바이오 물질의 분자 단위 재료 합성 방법을 응용한 재료, 4) 바이오 물질과 합성물질(금속, 세라믹, 폴리머)로 이루어진 하이브리드 재료이다. 대표적인 예로서 기능성 단백질을 이용한 소자 및 센서, 생체환경에 따라 반응하는 능동 구동형 재료, 게코 도마뱀의 발바닥을 모사한 접착제, 생체막에 존재하는 이온 채널을 이용한 분리막 등이 있다.

바이오 기반 재료는 자연 생명체가 지닐 수 있는 다양한 기능 및 특성을 인공 재료에 부여할 수 있다는데 장점이 있다. 생체 호환성이 좋고, 미세한 생체신호를 감지하고 외부 환경에 반응하는 복합기능성 재료가 가능하다. 또한 환경 친화적인 방법으로 합성할 수 있고, 분자 단위의 선택적인 상호작용을 이용하기 때문에 미세한 나노 구조체를 만드는 것이 용이하다.

3. 바이오 기반 재료의 응용

바이러스를 이용하여 리튬 이온 배터리의 특성을 향상시킨 최근 연구 결과는(그림 2) 바이오가 실생활에 쓰이는 전자 소자에 어떻게 유용하게 적용될 수 있는지를 보여주는 좋은 예이다. 박테리아(*E. coli* Bacteria)만을 감염시키고, 이 과정을 통하여 증식하는 M13 바이러스는 만물 및 바다에서 흔히 발견된다. 원통형 구조를 지니고 있고 길이는 약 1 마이크로미터이고 지름은 약 8 나노미터이다. 유전자 조작을 통하여 M13 바이러스를 둘러싸고 있는 3600여 개의 단백질의 성질을 변화시키면 배터리에 이용될 수 있는 바이러스 기반 재료를 만들 수 있다. 자연계에 존재하는 M13 바이러스는 금속이온과의 상호작용이 없는데 반하여, 유전자 조작을 통하여 바이러스 표면의 특정 작용기를 부여하게 되면, 바이러스 표면에 금속이온들이 결합하고 환원되어 나노 와이어를 만들 수 있다. 특정 펩타이드 시퀀스를 바이러스 표면에 부여했을 때, 특정 금속이온과 선택적으로 반응하여 금속이나 금속 산화물을 표면에 기를 수 있다. M13 바이러스에 유전자 조작을 통하여 전기화학적 특성을 부여한 것이다. 단백질과 금속이온의 선택적인 상호작용을 이용하여 나노와이어의 구조체를 분자단위에서 정밀하게 조절함으로써 배터리의 성능을 향상시켰다. 나노 물질 및 원자들의 정렬을 펩타이드와 금속이온의 상호작용을 이용하여 제어한 것이다. 또한 생명체인 바이러스의 자기 정렬 현상을 이

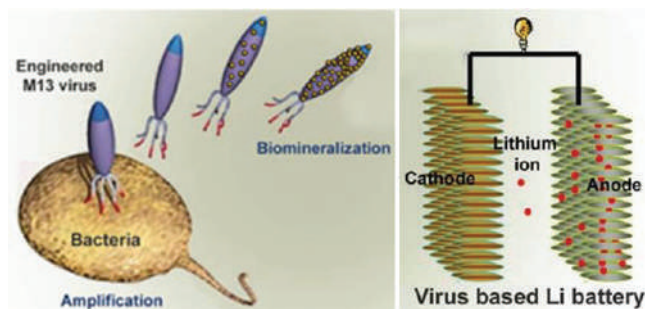


그림 2. 유전자 조작된 바이러스를 이용한 리튬이온배터리.²

용하여 스스로 조립되는 신개념의 나노 배터리를 만들 수 있다. 이와 같이 바이오를 구성물질로 이용하고 새로운 바이오 공정을 적용하여 소자의 특성을 개선하는 방법은 재료 디자인과 제조에서 새로운 패러다임을 제시한다.

또 다른 예는 단백질이 3차원 나노 구조체를 형성하는 원리를 이용하여 새로운 나노 재료를 만드는 것이다. 원자단위에서 정교하게 배열된 3차원 나노 구조체를 만들어 구조에서 기인하는 향상된 물성을 얻는 것은 재료공학의 새로운 도전중의 하나이다. 자연계의 20종류의 아미노산들의 결합 형태에 따라서 단백질의 다양한 구조가 결정되고 이로 인해 생명체에서의 역할도 달라진다. 이런 원리를 이용한 바이오 기반 재료가 최근에 새롭게 연구되었다.

대표적으로 자연계의 펩타이드를 모방한 합성 폴리머로 펩티드가 있다. 펩티드를 구성하는 모노머인 *N*-substituted glycine이 자연의 아미노산과 다른 점은 아미노산과 같이 곁가지(side chain)가 α -탄소에 붙어있지 않고 질소에 붙어있다(그림 3). 이들은 생물학적 활성을 가질 수 있고 특정 구조로 접힘(folding)이 되며 단백질 분해에 저항이 있다. 폴리펩타이드와는 달리 주사슬의 키랄성 및 수소 결합 주개가 존재하지 않아 설계가 용이하여 거대분자의 접힘(folding) 현상에 대한 연구에 적합하다. 또한, solid-phase submonomer 방법을 통한 효율적인 합성이 가능하고(그림 4), 1차 아민을 Synthon으로 이용함에 따라서 다양한 곁가지를 가진 펩티드 합성이 가능하다는 점에서 펩티드는 단백질을 모방한 물질의 자기 정렬에 대한 연구에 있어서 유용한 도구로 사용될 수 있다. Solid-phase submonomer 방법을 이용하여 다양한 작용기를 지닌 primary amine을 시퀀스로 이용할 수 있다.

실제로 최근 연구 결과에 따르면, 단백질을 모방한 인공 고분자(polymer)중의 하나인 펩티드(peptoid)가 자기 조립될 수 있도록 규칙적인 시퀀스(sequence)를 부여하였고 놀랍게도 이 펩티드들은 물 안에서 스스로 조립되면서 아주 얇고 넓은 종이 형태(beta sheet)의 이차원 나노 구조를 형성하였다(그림 5). 자연계에 존재하는 beta sheet의 시퀀스를 합성 폴리머인 펩티드에 적용하였는데, 그 부여된 시퀀스에 의해 스스로 자기 조립을 한 것 이다. 일반적으로 펩타이드의 경우, chiral center 때문에 대면적의 평판구조를 형성하지 못하고 비틀린 형태의 테이프 모양을 형성한다. 하지만, 펩티드의 경우에는 chiral center가 없기 때문에 대면적으로 평탄한 구조를 만든다. 두께 2.7 나노미터의 얇은 평판 물질이 빠르게 스스로 만들어졌고 길이와 너비는 맨눈으로도 관

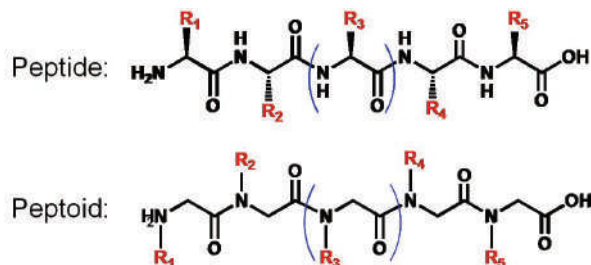


그림 3. 펩타이드(peptide)와 펩티드(peptoid)의 구조적 차이.

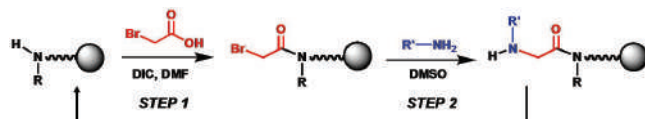


그림 4. Solid-phase submonomer 방법을 이용한 펩티드 합성.³

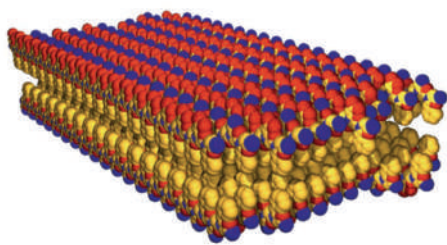


그림 5. 물 안에서 스스로 정렬된 인공 단백질(peptoid). 두께가 2.7 nm로 얇고 평판 종이형태를 지니고 있다.⁴

찰할 수 있을 정도의 수 백 마이크로미터까지 만들어 낼 수 있었다. 분자 두께의 얇은 종이가 형성된 셈이다. 수 나노 미터의 얇은 평판 물질이 자기 조립(self assembly)되어 만들어진다는 것은 기존의 재료공정에서는 찾아 볼 수 없는 현상이었다. 2차원 나노 구조는 생명체의 세포벽을 이루는 막(멤브레인)과 차세대 전자소자로 각광받고 있는 ‘그래핀’ 등이 지니고 있는 형태로 새로운 소재로의 응용가치가 높은 구조이다. 이 연구는 생명체를 이용한 소자나 생명체의 자기조립 현상을 이용한 고기능성 나노 재료, 인공 단백질 등을 개발하는 단서를 제공한 것이다.

4. 결론

바이오풀을 기반으로 한 재료는 의료용 소자 뿐 아니라 그 외의 영역에서도 다양한 응용 가치를 지닌다. 생명체의 다양한 기능을 재료에 부여할 수 있을 뿐 아니라 생체 신호 및 작용을 조절 하고 감지하는 것에 이용될 수 있다. 이를 위해, 바이오와 재료의 계면과 이들의 상호작용을 이해하는 것은 중요하며 자연계에 존재하는 원리를 배우고 모사하는 것이 그 해결책이 될 수 있다. 이를 통해서, 재료를 설계하고 만드는 방법에서 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것이라고 기대한다.

참고문헌

1. Image from Jon Bodsworth, <http://egyptarchive.co.uk> (copyright free).
2. K. T. Nam, *et al.*, *Science*, **312**, 885 (2006).
3. R. Zuckermann, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **114**, 10646 (1992).
4. K. T. Nam, *et al.*, *Nature Materials*, **9**, 454 (2010).