치아구조 모사를 통해 높은 강성도와 감쇠계수 조합을 지닌 주상구조형 나노복합체 개발

염봉준 | 명지대학교 화학공학과 (E-mail: byeom@mju.ac.kr)

본 연구진(명지대학교 염봉준 교수)은 미국 미시간대학교 니콜라스 코토프(Nicholas Kotov) 교수 연구진과 경기대학교 차상호 교수와의 공동연구를 통하여 치아구조를 모사한 주상구조형 나노복합체를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 유무기혼성나노복합체는 기존의 복합체에서는 불가능하다고 여겨졌던 높은 강성도와 높은 감쇠계수를 동시에 지니는 것으로 밝혀져 주상형을 지니는 새로운 복합체 형태 패러다임을 제안하였다는 점에서 의의가 크다고 할 수 있다.

치아 표면을 이루고 있는 법랑질(에나멜)은 단단한 기둥 형태의 세라믹 물질들이 마이크로와 나노수준에서 수직으로 배향되어 있는 구조를 지니고 있다. 이와 같은 특이한 치아 법랑질의 구조는 단순히 사람뿐만 아니라, 쥬라기 시대의 공룡들로부터 바다 속의 성게에 이르기까지 다양한 종에서 시대를 거르지 않고 나타나고 있다. 최근 연구 결과에서는 치아의 강성도와 감쇠계수의 조합 특성이 일반적인 물질뿐만 아니라 엔지니어링 복합체보다 뛰어난 수치를 지닌다는 것이 밝혀졌다. 이와 같은 뛰어난 기계적 물성 덕분에 치아는 수십년 이상 전달되는 강한 압력과 진동에도 쉽게 파괴되지 않고 반영구적으로 사용이 가능하다.

본 연구에서는 치아에서 나타나는 수직배향된 나노구조를 모사하여 인공적으로 구현함으로써 강성도와 감쇠계수의 조합 특성이 기존의 물질을 뛰어넘는 주상구조형 나노복합체를 개발하는데 성공하였다. 수직배향된 구조를 모사하기 위하여 강성도가 높지만 감쇠계수가 낮은 산화아연 나노선을 무기물질로 사용하였으며, 열수화법을 이용하여 기판에 수직으로 배향되도록 성장시켰다. 이렇게 배향된 나노선 사이를 다층적층법(layer-by-layer assembly)을 이용하여 수소결합이 가능한 2가지 고분자전해질 물질(polyallylamine과 polyacrylic acid)로 채워 넣었다. 위의 과정을 반복함으로써 치아 법랑질의 구조와 유사한 형태를 지닌 인공 복합체를 제조할 수 있었다. 제조된 주상구조형 나노복합체는 기존 물질의 한계라고 여겨지던 강성도(storage modulus, E′)와 감쇠계수(tanδ)의 조합수치(E′·tanδ)가 0.6을 뛰어넘는 놀라운 동적 기계적 물성(dynamic mechanical property)을 나타내었다. 특히, 중량을 고려하여 보정된 강성도와 감쇠계수의 조합수치의 경우, 본 연구에서 제안한 한계수치인 $(E'/\rho) \times \tan\delta^{0.5} = 0.8$을 뛰어넘어 최대 2.0 이상의 수치를 나타내었다(ρ: 밀도). 이러한 실험 결과는 수직배향된 나노구조와 고분자 지지체 간의 높은 접착력에 의해 계면에서 강성도와 감쇠계수가 크게 변화함으로써 나타난다는 것을 분자동력학 및 유한요소 시뮬레이션을 통해 밝혀내었다. 이와 같은 인공 주상구조형 나노복합체는 강한 힘과 진동을 동시에 버티야 하는 구조 뿐만 아니라 장시간 진동에 따른 피로 누적이 수반되는 비행 및 주행용 지지체, 그리고 내진 설계가 필요한 전자장비 등 다양한 산업 분야에 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

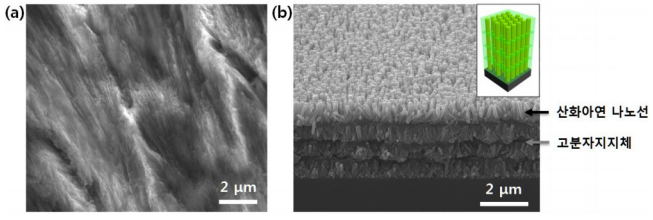

그림 1. (a) 치아 법랑질(에나멜) 단면의 주사전자현미경 이미지. (b) 인공 주상형 나노복합체인 $(ZnO/LBL)_4$ 시편의 기울인 주사전자현미경 이미지 및 도식도. 산화아연 나노선은 ZnO 나노입자를 seed로 사용하여 열수화법을 이용하여 성장하였으며, LBL 고분자 지지층은 polyallylamine과 polyacrylic acid를 40번 번갈아 적층하여 제조하였다.

본 연구결과는 저널 *Nature*지에 "Abiotic Tooth Enamel"이라는 제목으로 2017년 3월 게재되었다 (doi:10.1038/nature21410). 또한, 동일 호에 "Materials Science: Lessons from Tooth Enamel" 제목으로 리뷰가 작성되었다.