

곤충의 껍질과 같은 성질의 생분해성 고분자 제조

생물공학을 위한 Wyss연구소(Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering) 소속의 하버드대 연구자들이 곤충의 딱딱한 껍질에 영감을 받아 강하고 저렴하며 생분해가 가능한 물질을 만들어내는데 성공했다. 이 물질의 발견자들은 이것은 응용가능하며 언젠가는 플라스틱을 대체할 수 있을 것이라 말했다. 버려진 새우 껍질과 실크 유래의 단백질로 만들어진 이 물질은 이 둘의 합성어인 “shrilk”라 불린다. 바르셀로나대(University of Barcelona)의 박사후 과정생으로 이 물질에 대한 연구를 시작했던 Javier Fernandez에 따르면 그것은 얇고 깨끗하며 유연하면서도 전반의 무게로도 알루미늄만큼 단단하다고 한다. 이에 대해 하버드 의대 혈관 생물학과(Vascular Biology at Harvard Medical School)와 하버드 의대 아동병원의 교수이자 하버드 응용공학과 교수인 Ingber는 회사들, 특히 의학 응용과 관련된 회사들이 벌써 이 물질에 관심을 보이고 있다고 말했다. 이러한 관심은 이 물질의 구성 요소들이 모두 미국식품의약청(Food and Drug Administration)의 승인을 받았다는 사실에 더욱 고무되어 있다. 시간에 따라 붕합되는 붕합사, 화상 환자들을 위한 보호커버, 조직 재생을 위해 세포들을 배양하

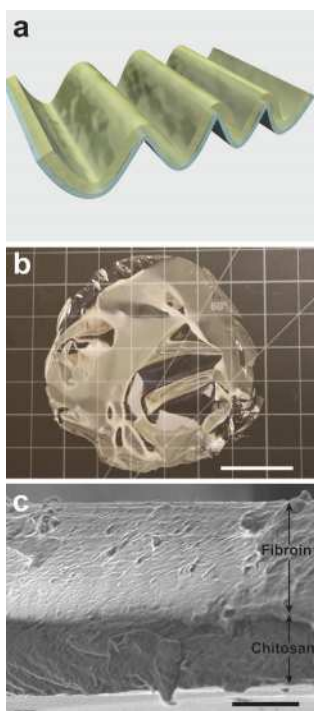


그림 1. Chitosan과 Fibroin로 만들어진 Shrink. (a) Shrink 구조의 다이어그램 (b) Shrink의 광학 사진. 투명함을 확인할 수 있음. (c) Shrink의 적층 구조

는 스캐폴드에 이르기까지 다양한 곳에 응용이 가능하다. 연구진이 개발한 물질은 두 개의 기본적인 구성 요소를 지니고 있는데 그것들은 실크로부터 유래된 단백질인 피브로인(fibroin)과 키토산이라고 불리는 곤충의 외부 껍질의 주요 구성성분인 키틴(chitin)의 변이에 관여한다. 그 물질들을 맹목적으로 결합시키기보다는 이들이 어떻게 이용되고 있는지에 초점을 맞추는 것이 중요하다고 Ingber와 Fernandez는 말했다. 곤충의 몸에서 피브로인 단백질과 키틴은 층을 이루어 딱딱한 껍질과 같은 구조를 만들고 이것이 그 판에 강도와 단단함을 부여한다. 자연적인 디자인을 모방하고 키토산과 피브로인 단백질을 결합시킴으로써 shrink는 만들어졌다. 이에 대해 Ingber는 “자연계에서 발견되는 많은 구조적인 속성들은 단순히 화학적인 것만이 아니라 건축학적이기도 하다.”고 말했다. Shrink는 커다란 잠재력이 있다고 그는 덧붙였는데 키틴은 새우의 껍질에서부터 곤충의 몸에 이르기까지 거의 모든 자연계의 물질에서 가장 풍부한 물질이다. 이러한 사실은 shrink가 낮은 가격으로 제작이 가능할 뿐만 아니라 많은 물질에서 이용되는 응용성이 매우 뛰어나다는 사실을 입증한다. 마지막으로 Ingber는 그 물질이 젖을 때 유연하기 때문에 습기가 존재하는 환경에서 이들을 연구 중에 있다고 말했다.

<J.G.Fernandez et al., Adv. Mater., 24, 48 (2012), DOI:10.1002/adma.201104051>

실험적으로 확인된 나노튜브 성장 이론

미 공군 연구소(Air Force Research Laboratory)의 연구진은 나노튜브 성장에 대한 흥미로운 특성을 예측했던 라이스 대학(Rice University)의 Boris Yakobson 교수의 이론을 실험적으로 확인시켜 주었다. 나노튜브 성장에 대한 흥미로운 특성은 다음과 같다. 나노튜브의 키랄성이 나노튜브의 성장 속도를 제어하고, 따라서 암체어(armchair) 나노튜브가 더 빠르게 성장된다. 이 연구는 2009년부터 Yakobson 교수와 그의

연구진에 의해서 수행된 연구를 종결시킬 수 있는 결과이다. 키랄성으로 제어되는 성장 이론을 이론적으로 제안했던 이전 논문은 일련의 단일 원자들이 육각형 구멍처럼 생긴 튜브를 짜는 것처럼 나노튜브를 생성한다고 설명했다. 이런 이론을 실험적으로 확인할 수 있었던 것은 나노튜브 속도와 이것의 키랄성 각도 간의 연관관계를 증명할 수 있는 장비를 이번 연구진이 가지고 있었기 때문이다. 단일벽 탄소나노튜브의 키랄성은 탄소 원자가 말려진 방향에 따라서 결정된다. 연구진은 이것을 신문을 마는 것과 유사하다고 설명했다. 이런 정렬은 나노튜브의 전기적 성질을 결정한다. 금속성 암체어(armchair) 나노튜브는 전자가 저항 없이 팁(tip)에서 팁으로 지나가기 때문에 특히 바람직한 성질을 가지고 있는데 반해서, 반도체성 나노튜브는 다른 분야의 전자장치에 유용하게 적용될 수 있다. 연구진은 각각의 나노튜브의 성장 속도를 측정할 수 있는 장치를 개발했다. 이것은 놀라운 장치라고 연구진은 말했다. 이 장치는 매우 낮은 밀도를 가진 각각의 튜브를 성장시킬 수 있고, 그들의 신호(키랄성)를 식별할 수 있으며, 동시에 나노튜브를 얼마나 빨리 성장하는지를 측정할 수 있다. 이 기술은 미세한 실리콘 기둥 위에 촉매 나노입자를 고정시킨 후에 그들을 레이저로 가열시키는 방법으로 이루어져 있다. 레이저를 이용한 가열은 화학 기상 증착이라고 불리는 표준 기술로 나노튜브의 성장을 촉진시켰고, 동시에 연구진은 라만 분광기로 나노튜브 성장을 분석했다. 스펙트럼을 통해서, 연구진은 나노튜브가 얼마나 빨리 성장할 지와 어떤 시점에서 성장이 멈출지를 알 수 있었다. 연구진은 스펙트럼으로 확인된 각각의 단일벽 탄소나노튜브들을 대상으로 전자 현미경 사진을 찍었다. 키랄성 각도는 성장 후의 라만 스펙트럼과 나노튜브 지름을 비교함으로써 평가되었는데, 이것은 밴드갭과 지름을 기반으로 한 키랄성을 알 수 있게 한다. 연구진은 이 연구가 특정 유형의 나노튜브를 성장시키는 향후 연구를 위한 기반을 제공할 것이라고 말했다.

<R. Rao et al., Nat. Mater., 11, 213 (2012), DOI:10.1038/nmat3231>

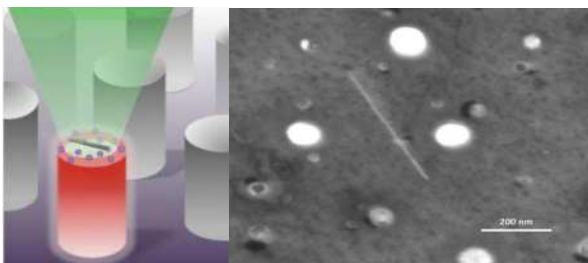


그림 2. 미세한 실리콘 기둥 위에 나노입자 촉매가 고정되어 있는 모식도 및 성장한 단일 나노튜브의 형상을 보여주는 사진.

폴리머 태양전지의 효율성을 높이는 나노결정

텍사스공과대학(Texas Tech University)의 연구진은 폴리머 태양전지의 효율을 높일 수 있는 새로운 방법을 개발했다. 이번 연구진은 나노결정을 폴리머와 결합시켜서 태양전지의 효율성을 높일 수 있었다. 나노결정과 폴리머를 결합시키는 방법은 저렴한 공정 과정과 유연한 형태 인자(form factor) 등과 같은 많은 장점을 가진 실리콘 광전지를 만들 수 있지만 기술적인 분야에서 문제가 있어서 아직까지 실용화되지 못하고 있다. 벌크 헤테로접합 폴리머 태양전지는 중합된 폴리머와 풀러렌 유도체(fullerene derivative)의 상호 침입형 네트워크로 구성되었는데, 이것은 낮은 캐리어 이동도와 개방 회로 전압(open circuit voltage)을 가졌다. 이번 연구진은 이런 문제들을 해결하기 위해서 반도체성 탄소나노튜브를 이용했다. 이 장치는 π - π 상호작용에 의해서 탄소나노튜브 위에 P3HT(poly (3-hexylthiophene))를 접합시켰고, 이로 인해서 화학적 변형을 피할 수 있었다. 광루미네선스 특성평가와 캐리어 이동도 측정을 통해서, 광전지 변환에서 반도체성 탄소 나노튜브의 역할이 밝혀졌다. 여과 프로세스는 반도체성 탄소 나노튜브의 순도를 높이고 복합물 속의 분산성을 조절하기 위해서 사용되었다. 이후의 열 어닐링은 나노튜브/P3HT 복합물의 구조를 향상시키고 유형-II 헤테로접합을 형성시키는데 도움을 주었다. 결과적으로, 단락 전류(short-circuit current)와 개방회로 전압이 상당히 향상되었고 전력 변환 효율(power conversion efficiency)은 80%까지 증가되었다. 이 연구는 단일벽 탄소나노튜브/P3HT 기반의 광전지 변환 시스템에서 반도체성 단일벽 탄소나노튜브와

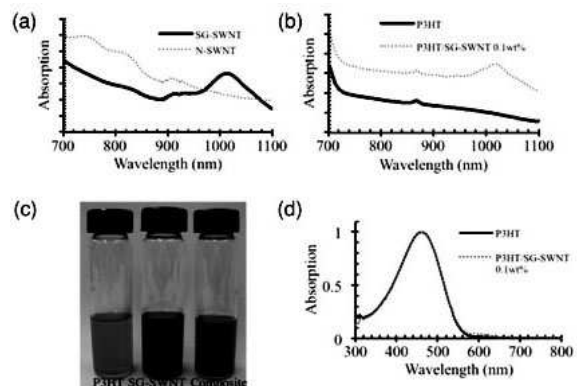


그림 3. (a) 반도체성 단일벽 탄소나노튜브와 일반적인 단일벽 탄소나노튜브의 광학적 흡수. (b) P3HT와 반도체성 단일벽 탄소나노튜브/P3HT 복합물의 흡수 스펙트럼. (c) P3HT, 반도체성 단일벽 탄소나노튜브, P3HT/반도체성 단일벽 탄소나노튜브 복합물의 용액 사진. (d) 0.1 wt%의 단일벽 탄소나노튜브를 가진 복합물과 P3HT의 광학적 흡수 데이터.

금속성 단일벽 탄소나노튜브의 역할을 조사했다. 서로 다른 양의 반도체성 나노튜브를 포함한 단일벽 탄소나노튜브들은 π - π 상호작용에 의해서 P3HT와 접합되었다. 광전지 복합물의 에너지 전달과 캐리어 이동 메커니즘은 광학 흡수 분광법(optical absorption spectroscopy), 광루미네선스 분광법(photo-luminescence spectroscopy), 캐리어 이동도 측정을 통해서 실험적으로 조사되었다. 낮은 하중을 가진 단일벽 탄소나노튜브에서, 높은 비율의 반도체성 나노튜브는 엑시톤(exciton)의 비방사성 감쇠와 낮은 캐리어 이동도를 초래하는데, 이것은 더 높은 개방 회로 전압과 낮은 광전류를 불러온다. 최적의 형상을 가진 단일벽 탄소나노튜브/P3HT/PCBM(phenyl-C61-butyric acid methyl ester) 기반의 하이브리드 태양전지는 향상된 캐리어 이동도 때문에 기준 태양전지(P3HT: PCBM)보다 훨씬 더 높은 광전류를 가졌다는 것이 증명되었다. 이 연구에 나열된 기술들은 유기 광전지 시스템으로 확대될 수 있고 효율적인 태양전지를 만들 수 있는 방법을 제공할 수 있을 것이다. 연구진은 나노물질로 인한 향상된 에너지 변환, 잘 정의된 나노구조의 합성과 특성평가에 초점을 맞추어서 연구를 진행하고 있다. 이 연구결과는 저널 *Nanotechnology*에 “The synergistic effect of nanocrystal integration and process optimization on solar cell efficiency”라는 제목으로 게재되었다.

<L. Ren et al., *Nanotechnology*, **23**, 075401 (2012),
DOI:10.1088/0957-4484/23/7/075401>

탄소 나노튜브를 이용하여 전기촉매의 양을 늘린 수소 연료전지

영국 과학자들이 전극들에 부착된 전기화학적 촉매의 양을 늘리기 위해서 탄소 나노튜브를 사용하는 수소 연료 전지를 고안했다. 그 배열은 기존의 디자인들보다 전력 밀도에서 10배 향상된 결과를 제공한다고 그들은 말했다. 효소 전기화학적 촉매를 기반으로 하는 막이 없는 수소 연료 전지들은 깨끗하고 지속가능한 에너지를 제공한다. 전통적인 수소 연료 전지들과는 반대로, 효소 활성 부위의 높은 특이성은 그것들이 수소와 산화제의 혼합된 원료를 가지고 작동할 수 있어서 양자들을 막을 통하여 이동시킬 필요가 없다는 것을 의미했다. 그러나 연료전지들은 전기화학적 촉매의 성능에 의존하고 효소들이 부피가 커서 전력 출력을 제한한다. 출력 밀도를 향상시키기 위한 노력으로 옥스

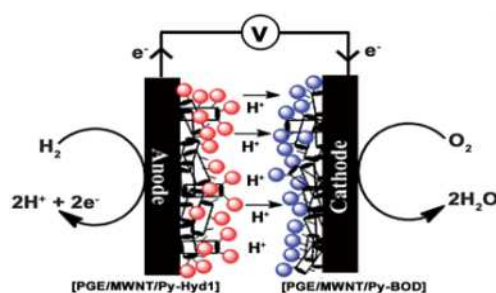


그림 4. 연료전지는 특이적으로 변형된 전극들에서 전기화학적 촉매로서 두 가지 효소-양극을 위한 산소에 잘 견디는 수소화효소와 음극을 위한 빌리루빈 산화효소-를 특징으로 한다.

포드대의 Sadagopan Krishnan와 Fraser Armstrong은 탄소 나노튜브를 흑연 전극에 부착시켰다. 그 다음에 그들은 1-피레네부티르산(1-pyrenebutyric acid)을 이용해서 두 가지 다른 효소들(양극에 수소화효소-1 (hydrogenase-1)과 음극에 빌리루빈 산화효소(bilirubin oxidase)를 가지고 그 탄소 나노튜브를 변형시켰다. 이 3D 배열은 그 전극에 부착된 효소의 양을 크게 증가시켰다. “효소의 양의 증가는 더 큰 출력으로 이끌어 준다.”고 Armstrong은 설명했다. 장기적인 안정성을 향상시키고 주어진 크기의 연료로부터 나오는 전력을 증가시키는 것과 같이, 이런 종류의 연료 전지를 실용적으로 사용하게 하기 전에 극복해야 할 문제들이 여전히 있지만, 그들은 궁극적으로 높은 전력 출력을 필요로 하지 않는 장치들에서 용도를 찾을 수 있을 것이라고 기대하고 있다. 미국 버지니아공대에 있는 생명공학 전문가인 Yi-Heng Percival Zhang은 동의했다. “이것은 효소를 이용한 연료 전지의 훌륭한 예이다. 상당히 높은 전력 출력을 가진 이 미세동력원은 틈새 전자 장치들에 동력을 제공하기 위해 사용될 수 있을 것이다.”라고 그는 평했다.

<S. Krisman et al., *Chem. Sci.*, **3**, 1015 (2012),
DOI:10.1039/c2sc01103d>

다중벽 탄소 나노튜브를 균일하게 분산하는 새로운 방법

조지아 대학교 및 사우스캐롤라이나 대학의 기술자들은 초음파와 수소 패시베이션(passivation) 방법들을 결합하여 탄소 나노튜브를 균일하게 분산하는 방법을 개발하였다. 이 개발은 탄소 나노튜브의 동력을 보다 쉽게 활용할 수 있게 해준다. 탄소 나노튜브를 재료에 첨가하면 탄소 나노튜브가 특별한 전기적인 거동 및 우수한 기계적인 강도와

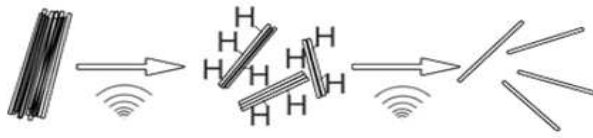


그림 5. 수소 과산화물 및 초음파 처리를 통해 다중벽 탄소나노튜브의 분산.

같은 많은 장점을 가지고 있기 때문에 재료의 활용도를 증가시킬 수 있다. 탄소 나노튜브는 에너지 수확, 에너지 저장 시스템, 에너지 전환, 전자 장치, 광전자 장비 및 에너지 효율과 경량 복합재료를 포함한 다양한 응용 분야에서 우수성을 증명하였다. 그러나 균일한 형태로 탄소 나노튜브를 분산하는 것은 이들 응용분야에 탄소 나노튜브를 적용하는데 있어 해결되어야 하는 가장 어려운 부분이다. 탄소 나노튜브는 소수성이며 많은 고분자 및 용매 내에서 함께 덩어리를 이루는 경향이 있다. 이러한 특성 때문에 탄소 나노튜브가 겔 및 고체 내에서 또한 표면 코팅에서 균일하게 분산되는 것이 어렵다. 초음파를 적용하여 용매 내에서 탄소 나노튜브를 균일하게 분산시키는 방법을 시도 중이지만 성공하지 못했다. 연구팀을 이끌고 있는 사우스 캐롤라이나 대학의 공대 및 컴퓨터 학과의 교수인 Xiaodong Li는 수소 과산화물을 초음파 기술과 결합하여 다중벽 탄소 나노튜브를 2시간 내에 에탄올에 완전히 분산시켰다. 주사전자 및 투과전자현미경으로 완전한 분산이 되었음이 확인되었다. 균일하게 분산된 것을 현미경이 아닌 일반적인 눈으로도 확인할 수 있었다. 연구팀은 방법을 활용하여 나노튜브-에폭시 나노복합재료를 만들었다. 순수한 에폭시와 비교하였을 때 수소 과산화물을 사용하여 제조한 나노복합재료의 탄성률은 거의 100% 향상되었다. 초음파 에너지는 탄소-탄소 결합을 끊고 탄소-수소 결합이 일어나도록 유도하였다. 가열하면 이들 결합에서 수소를 제거할 수 있고 이는 장점이 된다. 이 결과는 *Advanced Materials* 저널에 2월 14일에 게재되었다. <X.Li et al., *Adv. Mater.*, (2012), DOI:10.1002/adma.201104337>

그래핀을 산화시킬 수 있는 새로운 방법

노스웨스턴 대학(Northwestern University)의 연구진은 그래핀을 화학적으로 변화시킬 수 있는 새로운 방법을 개발했다. 이 연구결과로 더 빠르고 더 얇은 플렉서블한 전자장치를 개발하는데 한 걸음 더 나아갈 수 있게 되었다고 연구진은 말했다. 그래핀은 매우 뛰어난 강도와 전도성을 가지고 있고 원자 한 개 두께의 벌집 모양의 격자로 되어 있

다. 그래핀이 적용될 수 있는 가능성이 가장 높은 것은 전자 분야이다. 많은 전문가들은 그래핀이 초고속 컴퓨터, 휴대폰, 휴대용 전자장치에 실리콘을 대신하여 유용하게 적용될 수 있을 것이라고 믿고 있다. 그러나 이것을 실현하기 위해서는 그래핀의 전기적 성질을 변화시킬 수 있는 방법을 알아야 한다. 실리콘과 같은 반도체와는 달리, 순수한 그래핀은 제로 밴드갭(zero band gap)을 가지고 있는데, 이것은 전류 흐름을 전기적으로 끊기 어렵게 한다. 따라서 순수한 그래핀은 대다수 집적회로에 사용되는 디지털 회로에는 적합하지 않다. 이런 문제를 극복하고 그래핀에 더 많은 기능성을 부여하기 위해서, 전 세계의 연구진들은 이 재료를 화학적으로 변화시킬 수 있는 방법을 조사하고 있다. 가장 많이 거론된 방법은 “허머즈 방법(Hummers method)”인데, 이것은 그래핀을 산화시키기 위해서 1940년 대에 개발된 프로세스이다. 그러나 이 방법은 그래핀 격자에 손상을 입히는 가혹한 산성 분위기에서 수행된다. 이런 단점을 극복하기 위해서 이번 연구진은 허

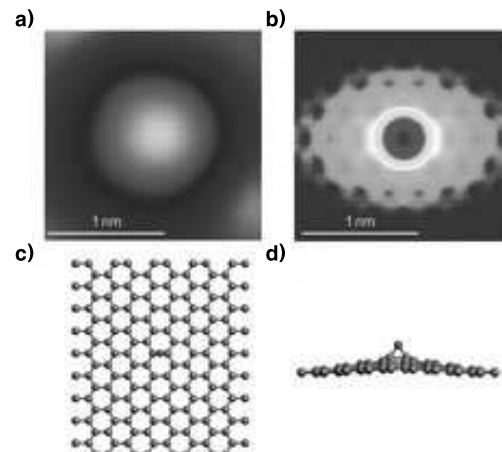


그림 6. 에피택셜 그래핀에 대한 산소 원자의 STM 사진과 밀도 함수 이론의 계산 결과와의 비교.

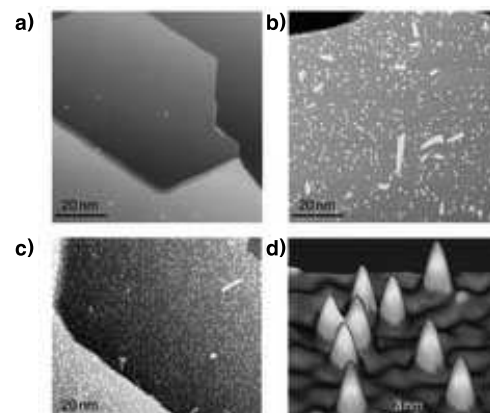


그림 7. 에피택셜 그래핀 위에 화학 흡착된 산소 원자의 이미지 관찰.

머즈 방법에서 발생하는 부수적인 손상을 가지지 않은 채 그래핀을 산화시킬 수 있는 새로운 방법을 개발했다. 이 산화 프로세스는 가역적인데, 이것은 화학적으로 변형된 그래핀의 성질을 조정할 수 있다는 것을 보여준다. 그래핀 산화물을 생성시키기 위해서, 이번 연구진은 초고진공 챔버 속에 산소 가스를 흘려 보냈다. 텅스텐 필라멘트는 1500℃까지 가열되었는데, 이것은 산소 분자들을 산소 원자로 해리시킨다. 그 후에 높은 반응성을 가진 산소 원자들은 그래핀 격자 속에 균일하게 삽입되었다. 생성된 재료는 높은 수준의 화학적 균질성을 가진다. 연구진은 플라스틱 등과 같은 다양한 재료를 개발하는데 화학적으로 변형된 그래핀을 적용하는 연구를 수행할 예정이다. 아마 산소만을 사용해서는 충분한 결과를 얻지 못할 것이라고 연구진은 말했다. 이제까지 과학적 커뮤니티는 화학적 변형을 통해서 하드 플라스틱에서부터 나일론까지 다양한 범위의 폴리머를 개발했다. 이번 연구진은 그래핀에서도 동일한 수준의 조정 가능성을 구현할 수 있기를 바라고 있다. 이 결과는 저널 *Nature Chemistry*에 “Chemically Homogeneous and Thermally Reversible Oxidation of Epitaxial Graphene”이라는 제목으로 게재되었다.

<Md. Z. Hossain et al., *Nat. Chem.*, **4**, 305 (2012), DOI:10.1038/nchem.1269>

| 올레핀 합성을 위한 철 나노입자의 이용

새로운 철 기반의 탄소-탄소 커플링 촉매가 바이오매스(biomass)를 에틸렌, 프로필렌과 같은 화합물의 친환경적인 원재료로 이용할 수 있게 만들어준다는 연구 결과가 네덜란드에서 수행된 한 연구에서 밝혀졌다. 이러한 기술적 진보는 전통적으로 석유를 기반으로 생산된 화합물들을 친환경적으로 생산하는 대안을 제시해 줄 수 있다. 4개의 탄소 원자를 가진 올레핀(olefin)은 화장품, 의약품 용매, 그리고 다른 상업용 제품들을 만들어내는 핵심 빌딩 블록이다. 이 가벼운 무게의 화합물

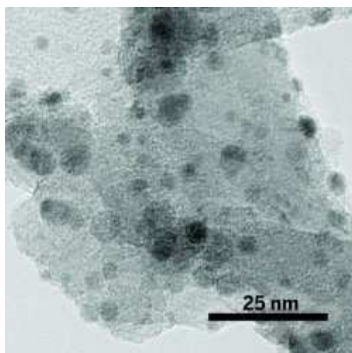


그림 8. 철 기반의 탄소-탄소 커플링 촉매(TEM)

들은 나프타를 분해하는 방식의 전통적인 석유 산업에서 만들어진다. 이때 이용하는 크래킹(cracking)은 긴 길이의 탄화수소를 짧은 길이의 탄화수소로 만들어준다. 그러한 과정이 수십 년 동안 전지구적으로 행해져 왔지만 관련된 환경오염 문제와 제한된 석유의 공급으로 인해 연구자들은 C2-C4 올레핀을 만드는 대안적인 방법을 연구하고 있다. 이를 위한 한 방법으로 바이오매스를 일산화탄소와 수소의 혼합물인 합성 가스로 바꾸는 연구가 수행되었다. 이미 이전에 연구자들은 합성 가스가 비고정 철 촉매를 이용해 C-C 커플링 기술인 피셔-트롭스 합성(Fischer-Tropsch synthesis)을 경유해 올레핀으로 바뀔 수 있다는 것을 보여주었다. 하지만 그러한 촉매들은 공정 중에 필요한 높은 온도에서는 불안정하며 이로 인해 낮은 활성을 보여준다. 일반적으로 합성 가스를 변환시키기 위한 다른 방법들은 비싼 재료들과 정제 과정을 필요로 하지만, 다양한 종류의 생산물을 만들어낼 수는 있다. 현재 위트레흐트대(Utrecht University)의 Hirma M. Torres Galvis와 Krijn P. de Jong 및 동료 연구자들은 그러한 한계를 뛰어넘는 철 촉매를 만들어내는데 성공했다. 연구팀은 안전하고 활성이 있으며 선택성을 지닌 촉매들과 약하게 반응하는 광표면을 지닌 물질에 철 산화물 나노입자를 첨가하는 기술을 개발했다. 특히, 그들은 반응 조건에 따라 나트륨, 황, 등이 도핑된 철 산화물 나노입자가 탄소 나노섬유 위에 고정될 수 있으며 다른 샘플들은 알파-알루미나(α -alumina)위에 고정되어 합성 가스를 거의 60%의 선택성(selectivity)으로 C2-C4 올레핀으로 바꾸어준다는 사실을 발견했다. 또한 반응 조건(60 시간)에서 모든 샘플들이 매우 안정적이었다고 연구진은 보고했다. 일반적으로 철 촉매가 지닌 큰 문제는 그들이 일련의 생산물을 만들어내는데 너무 많은 공정과 분리 과정을 필요로 하는 점이라고 뉴멕시코대(University of New Mexico)의 화학공학과 교수인 Abhaya K. Datye는 말했다. 그의 관점에서 이번 새로운 연구는 철 촉매의 선택성이 어느 정도 바뀔 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 그는 이에 대해 “이것은 꽤 흥미롭다. 하지만 아직 가야할 길이 멀다. 그러나 지지물질과 약한 상호 결합에 의존하는 이러한 방법은 철 촉매의 선택성을 높이기 위한 훌륭한 방법이 될 수 있을 것이다.”라고 말했다.

<H. M. T. Galvis et al., *Science*, **335**, 835 (2012), DOI:10.1126/Science.1215614>

본 기술 뉴스는 KISTI 미리안의 글로벌동향브리핑(GB)에서 발췌하였습니다.
<한양대학교 조용우, e-mail: ywcho7@hanyang.ac.kr>