

나노구조를 이용해서 제어될 수 있는 열전도 특성

핀란드 연구진 (University of Jyväskylä, 주저자: Nobuyuki Zen, 교신저자: Ilari J. Maasilta)은 물질의 나노구조 제어를 통해서 재료의 열전도 특성을 변화시킬 수 있는 새로운 연구결과를 발표했다. 열전도는 일상에서 흔히 발생하는 현상이다. 일반적으로 열전도는 재료 고유의 매개변수라고 알려져 있다. 예를 들어, 금속과 같은 일부 재료들이 열을 잘 전도하는데 반해서 나무와 같은 몇몇 재료들은 그렇지 못하다. 그러나, 이위베스켈레 대학의 연구진은 나노구조를 조절하여 파동과 같은 열 유동 특성을 변화시킴으로써 재료의 열전도 특성을 변화시킬 수 있다는 것을 세계 최초로 증명했다.

이론적으로, 열은 서로 다른 종류의 파동 운동(원자 진동)의 집합이라고 오랫동안 알려져 왔다. 이런 파속(wave packet)은 양자역학 법칙을 따르는데, 온도에 따라서 단지 특정 영역의 파장이 여기될 수 있게 한다. 이것은 파속 또는 입자들이 포논(photon)으로 존재하는 열방사와 매우 유사한데, 특히 재료 진동의 경우에, 입자들은 포논이라고 불리고, 100년 전에 아인슈타인에 의해서 이론적으로 확립되었다.

열 전달을 제어하는데 있어, 기존의 경우에는 재료 속에 다양한 산란 센터(나노입자, 불순물 등)를 포함함으로써 포논의 산란을 변화시켜서 달성되었다. 그러나 이 연구진은 주기적인 나노 포토닉스 결정을 이용해서 포논의 파동특성

이 열 전도성을 제어할 수 있음을 발견하였다. 구체적으로, 연구진은 나노크기의 그물 모양 구조(포토닉스 결정)를 제조하였고, 이 그물 모양의 구조는 약 1 마이크로미터(unit cell size 970 nm)의 간격으로 균일하게 형성되었다. 포논 파동은 포토닉스 결정 구조와 큰 상호작용을 하고, 그 속도를 변화시킨다. 이 파동은 훨씬 더 느리게 움직이기 때문에, 열 전도성을 상당히 감소시킨다. 이 실험은 길이 방향의 열적 포논의 파장을 증가시키기 위해서 절대 영도 근처의 온도에서 수행되었고, 포토닉스 결정을 위해 일반적인 나노제조 방법이 되었다. 증명된 개념은 많은 분야에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것이다. 예를 들어, 이것은 저온 고감도 방사선 검출기의 개발에 직접적으로 적용될 수 있으며, 단열소재의 성능을 증진시키는데 나노구조체가 사용될 수 있으며, 증명된 개념이 상온 범위에서 작동될 수 있다면, 이것은 더 효과적인 열전 장치를 개발하는데 큰 영향을 줄 수 있을 것이다.

<N. Zen et al., *Nature Communications*,
DOI:10.1038/ncomms4435 (2014)>

플렉서블 탄소 나노튜브 회로

공학자들은 주머니 속으로 접어서 넣을 수 있는 플렉서블 전자 소자들을 만들기 위해 노력하고 있다. 대표적인 접근 방법은 견고한 실리콘 칩 대신 탄소 나노튜브(CNT)로 알려진 섬유를 기반으로 회로를 디자인하는 것이다.

대부분 실리콘 칩은 전력 요동시에도 완벽하게 기능을 수행할 수 있는 회로 디자인을 가지고 있다. 하지만, 탄소나노튜브 회로로 이러한 특성을 갖는 것이 매우 어렵다. 최근 스탠포드 대학 연구팀(주저자: Huiliang Wang, 교신저자: Zhenan Bao)은 실리콘 회로와 비슷하게 전력 요동에 견딜 수 있는 플렉서블 칩을 만들기 위한 공정을 개발했다. 이 연구는 전기 잡음에 대한 높은 제거율을 가진 저전력 플렉서블 탄소나노튜브 회로를 디자인한 첫 번째 결과라고 스탠포드 대학 화학공학과 교수 Zhenan Bao교수가 말했다.

탄소나노튜브는 플렉서블 전자 회로를 만드는데 이상적

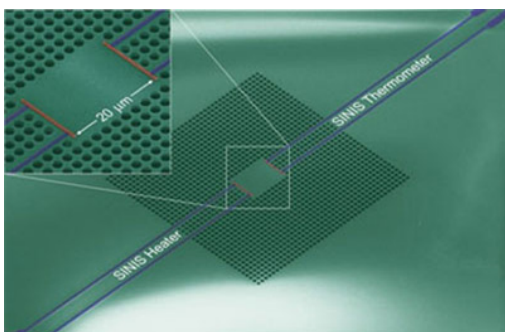


그림 1. 전자빔 리소그래피를 이용해서 실리콘 질화물(SiN)로부터 제조된 포토닉스 결정 장치. 녹색 = SiN, 청색 및 적색 선 = 알루미늄과 구리 히터 및 온도계, 흑색 영역 = 홀(hole).

이다. 탄소 필라멘트는 힘으로 인한 파손에 대항하는 물리적인 강도뿐 아니라 전기전도성이 우수한 특성을 가지고 있다. 그러나 현재까지, 플렉서블 회로는 견고한 실리콘 칩만큼의 신뢰성과 전력 효율을 가지지 못했다. 그 이유는 전기가 두 가지 경로로 반도체를 통해 이동할 수 있기 때문이다. 즉, 양의 홀은 양의 홀로 점프하거나 구슬 장식 목걸이처럼 음의 전자 묶음을 통해 움직일 수 있다. 첫 번째 반도체는 p-형이며 두 번째 반도체는 n-형이라 불린다. 공학자들은 p-형과 n-형 트랜지스터의 결합에 기반한 회로가 전력 요동이 발생했을 때 신뢰적으로 기능을 수행한다는 것과 이 회로가 훨씬 더 적은 전력을 소모한다는 것을 발견했다. 지난 50년 동안, 공학자들은 도핑이라 불리는 공정, 즉 적은 양의 가용 물질을 첨가하여 실리콘의 원자 구조를 변화시켜 전도성을 향상시키는데 초점을 맞추어왔다. 그러나 탄소나노튜브가 직면한 문제는 대개 p-형 반도체이며 n-형 특성을 만들기 위한 도핑방법이 거의 없다는 것이었다.

상기 논문은 어떻게 Zhenan Bao 그룹에서 이 문제를 해결했는지 잘 설명하고 있다. 연구원들은 그들이 개발한 화학 도펀트인 DMBI라는 물질을 탄소나노튜브에 처리했고 회로상 정확한 위치 내에 이 물질을 증착하기 위해 잉크젯 프린트를 이용했다. 그 결과 탄소나노튜브에 기반한 플렉서블 회로가 전력 요동에도 신뢰적이며 저전력으로 작동할 수 있는 p-n 혼합 플렉서블 시스템 구현이 가능하였다. 이러한 도핑은 매우 정밀하고 미세하게 조정되어 이전 결과들을 넘어서는 결과이다. 실용적인 측면에서, 탄소나노튜브의 상용화에 아직 많은 일들이 남아있지만, 연구원들은 상기술이 미래 플렉서블 전자소자의 기초가 될 것으로 믿고 있다.

<H. Wang et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, DOI: 10.1073/pnas.1320045111 (2014)>

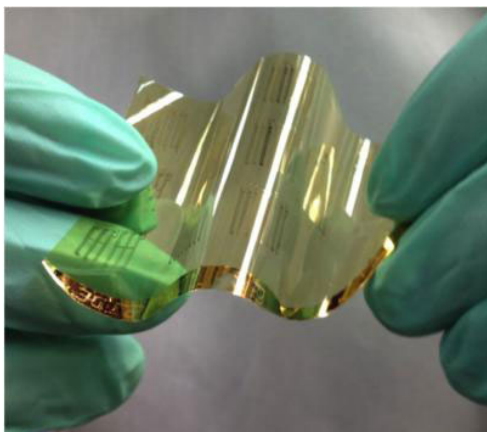


그림 2. 스탠포드 대학 공학자들은 새로운 차세대 가변형 전자소자 개발을 위한 새로운 방법인 탄소 나노튜브 트랜지스터를 이용하여 플렉서블 회로를 만드는 공정을 개발했다.

인공 광합성 반응 중간 단계 확인

태양으로부터 에너지를 채집하여 전기화학 에너지로 전환시키는 자연계에서 이용되는 공정을 모방하는 인공 광합성은 미래 지속 가능 에너지 중 중요한 자원이 될 것으로 기대되고 있다. 상용화 수준의 인공 광합성 기술을 실현하는데 중요한 것은 물 산화 반응을 효율적이고 경제적으로 수행할 수 있는 촉매를 개발하는 것이다. 버클리 연구소 물리바이오과학 분과의 화학자 Heinz Frei 박사가 이 분야의 최신 연구 성과를 네이처 케미스트리지의 논문에 게재하였다. 물의 산화로 인해 발생된 산소 분자는 다중 단계들을 포함하고 있는 네개의 전자 처리 과정의 결과로 생성된다. 연구원들은 지구상에 풍부한 고체 촉매인 코발트 산화물을 이용하여 물 산화과정 중 두 가지 중간 단계들을 최초로 직접 관찰했다. 이 결과들을 이용하여, 연구원들은 코발트 산화물 촉매를 설계, 개발하여 촉매성능을 개선할 수 있으며 물 산화과정의 한계를 부분적으로 혹은 완전히 제거하고 물 산화의 효율을 개선할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

인공 광합성 시스템에서, 물 분자의 산소, 전자와 양성자(수소 이온)로의 산화는 이산화 탄소와 물로부터 액체 연료들을 생산하기 위해 필요한 전자들을 제공한다. 5년 전, Frei 박사는 물의 산화를 위한 훌륭한 후보 물질로 단일 결정 나노입자들로 형성되는 코발트 산화물이라는 것을 밝혔다(*Angew. Chem. Int. Ed.*, **48**, 1841 (2009)). 그러나, 코발트 산화물 나노결정들의 촉매적 기능성을 실현하는 것은 물의 4 전자 주기 내 개별적인 반응들의 더 많은 이해를 필요로 했다. 이를 위해, Frei 박사팀은 급속 주기 푸리에 변형 적외선(FTIR) 분광기로 알려진 분광기술을 이용했다.

본 연구에서 물의 산화과정 중에 생성되는 하나의 intermediate는 superoxide이며, 두번째로 관찰된 intermediate는 oxo-cobalt(IV)에 의해 발생된다고 보고하였고, 두 가지의 중간 생성물들은 cobalt의 서로 다른 catalytic site에서 발생된다고 보고하였다. 이러한 결과는 향후 물의 산화과정에 관여하는 cobalt oxide를 설계하여 효율적인 시스템을 구축하는



그림 3. 지구상에 풍부한 촉매인 코발트 산화물 나노 결정들이 물 분자들을 분해하는 중요한 광합성 작용을 효율적으로 수행할 수 있다는 것을 보여주었다(http://www.youtube.com/watch?v=Ei4mwyjG3Vg&feature=player_embedded).

데 매우 도움이 될 것이라고 저자들은 기대하고 있다.

<M. Zhang, M. de Respinis, and H. Frei, *Nature Chemistry*,
DOI:10.1038/nchem.1874 (2014)>

고분자 섬유로 만들어진 새로운 인공 근육

미국 텍사스 대학의 델러스 캠퍼스(University of Texas, Dallas, 주저자: Carter S. Haines, 교신저자: Ray H. Baughman)의 연구자들은 고강도 고분자 섬유를 기반으로 해서 인공 근육을 만들 수 있는 새로운 방법을 개발했다. 자극에 반응하면서 팽창과 수축을 반복하는 재료들은 인공근육 및 섬유를 만드는데 필수적이다. 이러한 재료를 제조하기 위한 많은 연구들을 통해서 형상 기억 물질 또는 전기장에 반응하여 형상이 변하는 전기 감응성 고분자(electroactive polymer)가 개발되었다. 그러나 이들 모든 재료들은 제한을 가지고 있다. 형상 기억 금속들은 제한된 수의 사이클 후에 파괴될 수 있고, 다양한 양의 히스테리시스(상을 변화시키는 자기저항)를 가진다. 전기장으로 구동되는 고분자는 전기장 하에 비실용적으로 높은 변화들을 필요로 할 수 있고, 이런 모든 재료들(특히, 탄소 나노튜브 실)은 매우 특별하고 비용이 많이 들 수 있다.

인공섬유 및 근육을 제조하기 위해서, 고분자 섬유는 자극에 대해 수축과 팽창이 자유로워야 한다. 그러나 고분자 섬유는 가열될 때 짧아지는 경향을 가지고 있다. 이것은 시스템의 엔트로피가 증가할 때 고분자 사슬이 더 무질서해지기 때문이다. 이런 수축은 굉장히 적게 일어난다. 즉, 250 K의 온도변화에 대해서 약 4% 정도의 수축이 발생한다. 본 연구에서 연구진은 열적 수축을 강화하거나 반전시키기 위해서 방사형 팽창을 이용하는 간단한 방법을 개발했다. 즉, 연구진은 매우 정렬된 선형 고분자 사슬로 구성된 섬유를 이용했고, 이것을 반복적으로 비틀어서 사슬이 나선형으로 변하게 만들었다. 가열된 섬유가 방사형으로 팽창될 때, 이것은 각각의 사슬의 나선형 경로의 길이를 증가시켰고, 이로 인해서 꼬인 부분을 풀려는 고분자 사슬 속의 장력이 증가하기 때문에 섬유 위에 토크가 생성된다. 그 후에, 꼬인 섬유를 코일 형태로 감았다. 섬유가 꼬인 것과 동일한 방향으로 감는다면 가열로 인한 풀림 토크 때문에 코일이 조여져서 49%



그림 4. 코일 형태의 인공 섬유.

까지 수축하게 된다는 것을 증명했다. 아울러, 코일이 반대 방향으로 감겨 있다면, 열을 가하면 코일이 69%까지 늘어나게 한다.

더욱 흥미로운 사실은 기존의 인공근육 제조를 위한 연구들이 값비싼 재료들을 사용하여 구현하고자 하였다면, 본 연구에 사용된 재료는 폴리에틸렌 낚시줄과 나일론 재봉사와 같은 값싼 고분자를 사용하였다. 이것을 사용해서, 고분자 근육이 온도의 변화에 반응해서 열리고 닫히는 셔터 또는 온도가 증가할 때 기공이 열리는 직물과 같은 다양한 분야에 적용될 수 있다는 것을 증명했다. 향후에, 이것은 착용한 사람의 몸이 너무나 뜨거워지면 열을 제거할 수 있는 의복에 사용될 수 있을 것이다. “우리는 이것을 만드는데 많은 진보를 이루었기 때문에 이런 인공 근육들은 상업적으로 곧 적용될 수 있을 것입니다. 또한 저렴하게 만들 수 있고, 전구체를 만들지 않아도 매우 쉽게 많은 근육을 만들 수 있는 장점이 있습니다”라고 이번 연구진은 말했다.

본 연구진은 이 연구의 가장 가치 있는 부분이 기하학적 효과라고 믿고 있다. 꼬인 형태를 가진 코일은 200 K 이상의 온도 변화에 큰 변형률을 가지지만, 섬유를 강화시킨다. 이것은 매우 흥미로운 방법이고, 형상 기억을 가진 고분자 실이 출시되는데 많은 영향을 끼칠 것이다.

<C. S. Haines et al., *Science*, **343**, 868,
DOI: 10.1126/science.1246906 (2014)>

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

〈조은철, e-mail: enjoe@hanyang.ac.kr〉