

열을 잘 전도하는 플라스틱 개발

스파게티와 같은 내부 구조를 지닌 대부분의 플라스틱은 일반적으로 열을 잘 전도하지 않는다. 하지만 미시간대(University of Michigan)의 연구자들이 플라스틱 혼합(plastic blend)을 통해 일반적인 플라스틱에 비해 열을 10배 잘 전달할 수 있는 플라스틱을 개발하는데 성공했다.

플라스틱은 가볍고 저렴하며 플렉서블하다는 장점이 있지만 열의 흐름을 제한하는 성질이 있기 때문에 이들의 이용은 컴퓨터, 스마트폰, 자동차, 비행기 등과 같이 열의 분산이 중요한 영역에서 제한적으로 사용되고 있다. 이번에 이루어진 미시간대의 새로운 연구 결과는 가볍고 다양한 기능을 가지고 있으며 금속 대체 재료로 이용이 가능한 새로운 재료를 소개하는 것으로 보다 강력한 전자기기나 효과적인 운송수단 등 다양한 곳에 응용이 가능할 것으로 보인다.

이 새로운 물질은 무정형 고분자(amorphous polymer)에 열이 흐를 수 있도록 엔지니어링한 재료의 혼합으로 만들어졌다. 고분자는 작은 반복 분자들로 이루어진 거대분자이며 플라스틱은 일반적으로 합성 고분자를 의미한다.

고분자에서 열의 전달을 향상시키기 위한 이전의 노력들은 금속, 혹은 세라믹 충전 재료 등을 직선 형태의 라인 안에 채워 넣는 방법에 의존해왔다. 그러한 방법들은 스케일 업 하기가 힘들고 재료의 무게와 비용을 늘리며 재료를 불투명하게 만들어 전기를 전도하거나 빛을 반사하는 속성에 영향을 준다. 이번에 개발된 재료는 이러한 결점을 가지고 있지 않으며 일반적인 방법으로도 제조가 용이하다고 연구자들은 말했다.

이와 관련해 이번 연구를 주도한 미시간대 기계공학과 조교수인 Kevin Pipe는 “연구자들은 유기 LED나 태양 전지를 위해 전기를 잘 전도하는 고분자를 디자인하기 위해 많은 노력을 기울여왔지만 분자 디자인을 통해 열적 속성을 엔지니어링하는 기술은 소재의 열 전달의 중요성에도 불구하고 거의 무시되어 왔다”고 말했다. 연구진의 이번 연구 결과는 저명한 과학저널인 *Nature Materials* 지에 게재되었으며 Pipe는 Jinsang Kim 등과 함께 이번 연구를 수행했다.

열에너지는 분자진동(molecular vibration)과 같은 물질을 통해 이동한다. 열이 효과적으로 재료를 통과하기 위해서는 강력하게 결합된 원자나 분자들에 의해 연속적인 통로를 만들어 주는 것이 필수적이다. 그렇지 않으면 열은 소재 내에 갇히게 되고 물체는 뜨거워지게 된다. 이에 대해 Pipe는 “대부분의 플라스

틱에서 고분자 사슬은 스파게티와 같은 모양을 하고 있다. 그들은 길며 서로 잘 붙지 않는 성질을 지니고 있다. 열이 재료의 한 쪽 끝부분에 가해지면 진동이 발생하지만 이러한 진동들은 사슬 사이를 잘 움직일 수가 없는데 그 이유는 사슬들이 너무 느슨하게 결합되어 있기 때문이다. Pipe와 Kim이 이끄는 연구진은 폴리아크릴산(polyacrylic acid(PAA))이라고 불리는 고분자의 긴 사슬과 폴리아크릴로일 파페리딘(polyacryloyl piperidine (PAP))이라 불리는 고분자의 짧은 사슬을 강력하게 결합시킬 수 있는 방법을 개발했다.

이 새로운 결합은 대부분의 플라스틱에서 관찰되는 것들에 비해 10~100배 가량 강력한 결합을 가능하게 하는 수소결합에 의존한다. 이에 대해 Kim은 “우리는 이러한 연결고리를 만들었고 이를 통해 열에너지가 연속적으로 재료 사이를 통과한다는 것을 발견할 수 있었다. 여전히 가야 할 길이 멀지만 이러한 결과들은 이 방법을 통해 플라스틱을 엔지니어링하는 기작을 이해하는데 중요한 역할을 한다. 금속에 비해 10배 가량 낮은 열전도도를 지니고 있지만, 우리의 연구 결과는 지속적인 성능 향상을 위한 계기를 마련한데서 그 의미를 찾을 수 있다”고 말했다.

이러한 결론에 도달하기 위해 연구자들은 PAP 플라스틱 가닥을 개별적으로 3개의 서로 다른 고분자와 결합시켜 서로 다른 방법으로 수소결합이 형성되도록 했다. 그런 다음 연구자들은 각각의 열전도를 테스트해 보았다.

본 연구 결과는 “High thermal conductivity in amorphous polymer blends by engineered interchain interactions” 라는 제목으로 *Nature Materials* 지에 게재되었다.

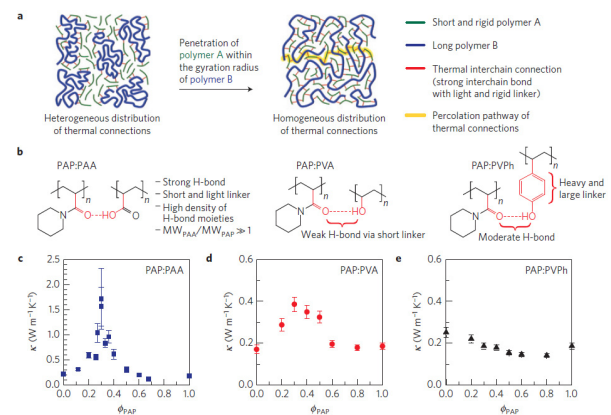


그림 1. 고분자사슬 간의 상호작용 조절을 통한 무정형 고분자 내에서의 뛰어난 열 전도특성.

<G.-H. Kim *et al.*, *Nat. Mater.*, DOI: 10.1038/nmat4141 (2014)>

인쇄로 제작하는 다층 유기 EL 소자 개발

일본에서 차세대 디스플레이나 조명용으로 기대되고 있는 유기 전계 발광 소자(유기 EL)로 새로운 성과를 달성하였다. 다층 구조를 가지고 있는 저분자 도포형 백색 유기 EL을 야마가타(Yamagata, 山形) 대학 대학원 이공 학연구과 연구 그룹이 개발하였다. 인쇄기술을 바탕으로 한 염가의 공정을 통하여 LED와 같은 수준의 고효율 백색 유기 EL 패널을 제조하는 연구로서 주목받고 있다.

인쇄 기술로 도포형 유기 EL을 제조할 수 있으면 비용을 저감할 수 있다. 발광 효율의 향상을 위하여 다른 유기 재료를 적층하고 전하 수송이나 발광이라는 기능을 각 층으로 분리하는 것이 필요하지만 이 경우 도포 용매에 의한 하층(下層)의 용해가 발생한다. 따라서 지금까지 하층에 사용할 수 있는 재료는 내용매성이 뛰어난 일부 고분자로 한정되어 있었고, 고순도화나 분자 구조의 제어가 용이한 저분자 재료에서도 적층 구조를 형성하는 기술이 요망되고 있었다.

연구 그룹은 17개 종류의 저분자 유기 EL 재료를 두께 30 nm(나노는 10억 분의 1)의 박막으로 도포했을 때 박막의 용해성을 자세하게 조사하였다. 분자량의 증가와 함께 알코올류로의 용해성이 감소하여 분자량 800 정도에서부터 불용성을 띄는 것을 발견하였다. 알코올(2-propanol)에 불용성을 나타낸 2종류의 저분자를 이용하여 발광층을 형성한 후 그 위에 저분자 전자 수송 재료를 2-propanol을 이용하여 도포 성막하여 전자수송층

을 형성하였다.

전자 수송층과 발광층의 적층 구조 박막 표면에 이온 빔을 조사하여 박막 깊이 방향의 조성을 측정하였다. 발광층 성분의 재용해가 억제된 적층 구조가 형성되고 있어 2개의 층이 서로 섞이지 않고 적층되고 있음을 확인하였다. 이 전자 수송층과 발광층의 적층 구조를 이용하여 도포형 백색 유기 EL소자를 제작했는데 휘도 100 cd m⁻² 시 세계 최고 수준의 전력 효율 34 lm W⁻¹를 나타내었다. 또한 반구 렌즈를 이용하여 유리 기판과 공기 계면에서 전반사하고 있던 빛을 추출하면 형광등이나 LED 조명에 필적하는 76 lm W⁻¹까지 효율이 올랐다고 한다.

연구 그룹은 “유기용매의 용해성을 제어하여 지금까지는 일부 고분자 유기 EL 재료에서만 가능했던 다층 구조를 저분자 유기 EL 재료에서도 실현하게 되었다. 이것으로 도포형 유기 EL 소자의 재료 선택폭이 크게 넓어져 인쇄 기술법으로 고효율 유기 EL 패널의 개발이 가속할 것이다. 향후 고휘도 발광 시 발생하는 효율의 저하 억제나 장기 수명화를 진행시켜 도포형 유기 EL을 조기에 실용화하고 싶다”고 언급하고 있다.

본 연구 결과는 “Solution-processed multilayer small-molecule light-emitting devices with high-efficiency white-light emission”라는 제목으로 *Nature Communications* 지에 게재되었다.

<N. Aizawa *et al.*, *Nat. Commun.*, DOI: 10.1038/ncomms6756 (2014)>

플러렌 정제를 위한 스펀지 같은 분자 케이지

스페인 연구진은 플러렌을 정제할 수 있는 스펀지 같이 생긴 새로운 분자 케이지를 개발하는데 성공했다.

플러렌은 구체 또는 튜브와 같은 다양한 형상을 가질 수 있는 탄소로 만들어진 분자이다. 그들은 태양전지 속의 전기활성 재료와 의학 분야에 폭넓게 적용될 수 있다. 그러나 이런 분야에 적용하기 위해서는 고체-액체 추출(주로 톨루엔 속에서)과 시간이 많이 드는 크로마토그래피 분리(chromatographic separation)

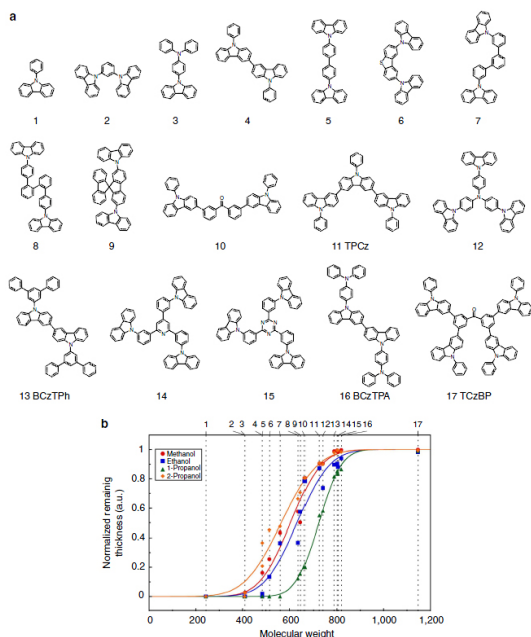


그림 2. (a) 17개의 저분자 유기 EL 재료의 구조, (b) 분자량에 따른 알코올류에서의 용해저항도.

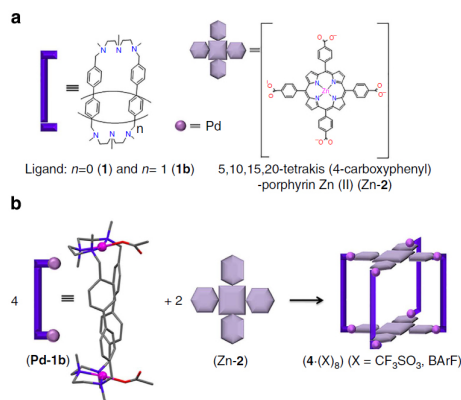


그림 3. 정방정계 프리즘 형상을 가진 나노케이지 4 · (X)₈을 만들 수 있게 하는 빌딩 블록.

가 필요하다. 예를 들어, 연구 목적으로 소량의 정제된 플러렌을 추출하는데도 복잡한 프로세스가 필요하다.

이 연구결과는 저널 *Nature Communications* 지에 게재되었고, 여기서 금속 지향된 자기 조립(metal-directed self-assembly)으로 합성된 초분자(supramolecular) 나노케이지(nanocage)를 제시했다. 나노케이지는 서로 다른 크기의 플러렌을 캡슐화하였다. 이 연구에는 앨라배마대학의 버밍햄캠퍼스(University of Alabama at Birmingham), ICN2 Supramolecular Nano Chemistry & Materials Group의 연구진이 참여했다.

이번 연구진은 각각 60, 70, 76, 78, 84 개의 탄소 원자로 구성된 C_{60} , C_{70} , C_{76} , C_{78} , C_{84} 의 1:1 캡슐화를 위한 직접적인 실험적 증거를 제시했다. C_{60} 과 C_{70} 을 가진 나노케이지된 플러렌의 고체 상태 구조들은 X-선 방사선 분광(X-ray synchrotron radiation)을 사용해서 달성되었다. 세척 기반의 공정을 이용해서, 플러렌 혼합물로 채워진 고체-상태 케이지 샘플로부터 순수한 C_{60} 만을 추출할 수 있었다.

이런 정방정계 프리즘(tetragonal prismatic) 기반의 초분자 케이지는 플러렌을 함유할 때 높은 친화력을 가지고 고체가 포함된 화합물의 용매 세척으로 그들을 손쉽게 배출할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이런 초분자 케이지는 플러렌 혼합물에서 C_{60} 과 낮은 효율을 가진 C_{70} 을 선택적으로 추출할 수 있는 매력적인 방법이다. 이 방법은 많은 양의 정제된 플러렌을 제조하는데 사용될 수 없지만, 이것은 플러렌에 대한 더 높은 선택성을 가진 추출용 케이지를 개발하기 위한 실험적 플랫폼으로서 매우 유용하게 적용될 수 있다. 고체-상태의 플러렌 캡슐화와 방출은 분자 나노케이지 구조의 호스트-게스트 화학(host-guest chemistry)을 통해서 설명될 수 있다.

플러렌이 그을음(soot)으로부터 대량으로 제조될 수 있기 때문에, 매우 순수한 플러렌을 생성할 수 있는 효과적인 방법을 찾는 것은 매우 중요하다. 이것은 다양한 연구 분야에 매우 유용하게 적용될 수 있다. 이번 연구진은 금속 지향된 자기 조립으로 나노케이지를 합성했고, C_{60} 과 C_{70} 을 선택적으로 제거할 수 있다는 것을 증명했다. 이것은 나노케이지가 더 높은 순도의 플러렌을 얻기 위해서 합성물 속의 일부 구성요소를 추출하는데 매우 중요하게 적용될 수 있다는 것을 보여준다.

본 연구 결과는 "Sponge-like molecular cage for purification of fullerenes" 라는 제목으로 *Nature Communications* 지에 게재되었다.

<X. Ribas et al., Nat. Commun.,
DOI: 10.1038/ncomms6557 (2014)>

환경친화적인 바이오플라스틱 개발 기술

폴리락틱산(polylactic acid)은 대부분 포장 재료로 이용되는 플라스틱이다. 증가하는 수요를 충족시키기 위해 스위스 취리히 연방공과대의 연구자들은 바이오디젤(biodiesel)을 생산하는데 부산물로 만들어지는 글리세롤로부터 대량으로 락틱산

(lactic acid)을 생산할 수 있는 환경친화적인 방법을 개발했다.

플라스틱 쓰레기는 오늘날 가장 큰 환경문제 중 하나이다. 플라스틱의 대부분은 생분해되지 않으며 작은 조각으로 부서질 수는 있지만 여전히 하나의 고분자로 존재한다. 또한, 이들 플라스틱의 대부분은 화석 연료로부터 만들어지기 때문에 자원 고갈 문제 역시 심각해지고 있다. 이에 대한 대안의 하나로 폴리락틱산(PLA)이 존재한다. 이들은 생분해성을 가지고 있으며 재사용이 가능한 자원으로부터 만들어질 수 있다. 제조자들은 PLA를 휴대용 컵, 가방 및 다른 종류의 포장 용지로 이용하고 있으며 이들에 대한 수요는 2020년까지 매년 1 메가톤(megaton)에 육박할 것으로 예상된다.

스위스 취리히 연방공과대학 화학공학과 K. Hungerbühler과 J. Pérez Ramírez는 락틱산을 만드는 새로운 방법을 연구 중이다. 이 방법은 현재 락틱산을 생산하는 방법에 비해 보다 비용효과적이며 친환경적이다. 이 새로운 방법의 가장 큰 장점은 이들이 쓰레기 원료인 글리세롤(glycerol)을 이용해 락틱산을 만든다는 점이다.

글리세롤은 1세대 바이오연료를 제조하는 과정에서 부산물로 생산되며 고품질은 아니지만 재(ash)와 메탄올을 포함하고 있다. 이에 대해 이번 연구를 수행한 Hungerbühler 교수 랩의 박사과정학생인 Merten Morales는 "어느 누구도 이 쓰레기 글리세롤을 이용해 무엇을 해야할 지를 알지 못하고 있다"고 말했다. 이 쓰레기 글리세롤은 점차 늘어나 2014년 3 메가톤을 지나 2020년에는 4 메가톤을 넘어설 것으로 예측되고 있다. 이들이 지닌 불순물 때문에 글리세롤은 화학이나 약학 산업에는 적합하지 못하다. 더구나 이들은 잘 타지도 않으며 좋은 에너지원이 될 수도 없다.

이에 대해 그는 "보통 이들은 오염수 처리 공정을 거치게 되지만 비용을 절감하는 차원과 또한 이들이 매우 유독한 것은 아니라는 점 때문에 몇몇 회사들에서는 이들을 강에 배출하거나 동물의 사료로 이용하기도 한다. 하지만 이것들이 동물에 어떤 영향을 미칠지는 아직 밝혀진 바 없다"고 말했다. 이 쓰레기 원료 물질을 락틱산으로 변환시키는 기술은 새로운 방법이며 환경 친화적이다. 이 과정에서 글리세롤은 효소에 의해 처리되어 디하이드록시아세톤(dihydroxyacetone)으로 변형되어 여러 종류로 이루어진 촉매를 통해 락틱산으로 전환되게 된다.

Pérez-Ramírez 교수가 이끄는 촉매 공학연구팀은 높은 반응성과 장시간 활성을 지닐 수 있는 촉매를 디자인했다. 이들은 미세기공성 미네랄, 지올라이트 등으로 구성되어 있다. 두 연구팀



그림 4. 생분해성 PLA를 이용해 만든 일회용 컵.

간의 긴밀한 협조를 통해 촉매는 단계적으로 계량되어 이전에 비해 나아진 모습을 보였다. 이와 관련해 Pérez-Ramírez 연구팀의 박사과정생인 Pierre Dapsens는 “일반적인 방법들과의 비교, 평가없이 우리는 발효에 비해 훨씬 덜 친환경적인 것으로 입증된 우리 연구의 초기 촉매 디자인에서 큰 행복을 느꼈다”고 말했다. 촉매 디자인에 있어서 몇몇 부분들을 개량함으로써, 연구자들은 마침내 환경 및 경제적인 관점에서 당 발효 결과를 앞지를 수 있었다.

쓰레기 글리세롤을 이용하고 이들의 생산성을 개량한 것 이외에도 이 새로운 공정은 발효에 비해 이산화탄소의 발생을 30%까지 줄일 수 있다. 이전의 방법을 이용하는 경우 7.5 kg의 이산화탄소가 발생하는 반면, 이 새로운 기술을 이용하는 경우 6 kg의 이산화탄소가 발생한다. 또한 전체적인 공정 비용을 낮춤으로써, 연구자들은 이 새로운 공정을 통해 17배나 수익을 증진시킬 수 있다는 예측을 할 수 있었다.

본 연구 결과는 “Environmental and economic assessment of lactic acid production from glycerol using cascade bio- and chemocatalysis” 라는 제목으로 *Energy & Environmental Science* 지에 게재되었다.

<M. Morales et al., *Energy Environ. Sci.*,
DOI: 10.1039/C4EE03352C (2014)>

그래핀을 이용한 반도체 고분자 필름

그래핀은 유연성, 투명성 및 높은 전하 이동도와 같은 놀라운 성질을 가지고 있는 물질이다. 스웨덴 Umea University의 조교수로 재직 중인 David Barbero 교수가 이끄는 국제 연구팀은, 그래핀(graphene) 상에 위치한 반도체 고분자(semiconducting polymer)가 실리콘을 기반으로 사용할 때보다 전하를 더 효율적으로 전송할 수 있음을 밝혔다.

반도체 고분자의 결정성(crystallinity)은 기존의 실리콘 기판을 사용할 때에 비해 그래핀을 사용할 때 변화된다. 이것은 고분자의 전자특성에 큰 영향을 미친다. 그래핀은 고분자 필름의 전하 수송능력을 향상시키며, 이로써 유기 태양전지 및 OLEDs (유기 발광 다이오드)와 같은 전자기기의 효율을 향상시킨다.

그래핀은 탄소 원자 단일층으로 이루어진 얇은 판상 형태이다. 그래핀은 강철보다 강하면서도 동시에 가볍고 유연하며 빛의 속도로 전자를 전송할 수 있다. 이 때문에 플렉서블 태양전지에서 차세대 전지에 이르기까지 그래핀을 활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서 과학자들은 그래핀 층 상부에 얇은 반도체 고분자 필름을 형성하는 결정에 대해 연구하기 위해 싱크로트론 엑스선 회절분석기(synchrotron X-ray diffraction)를 이용하였으며, 실리콘 기판 상에서 형성된 고분자 필름의 결정과 비교하였다. 엑스선 회절분석은 스탠포드대학(Stanford University)에 소재한 싱크로트론 국립연구소(National Synchrotron Laboratory)에서 진행하였다. 그래핀 층은 캐나다 맥길대학(McGill University)

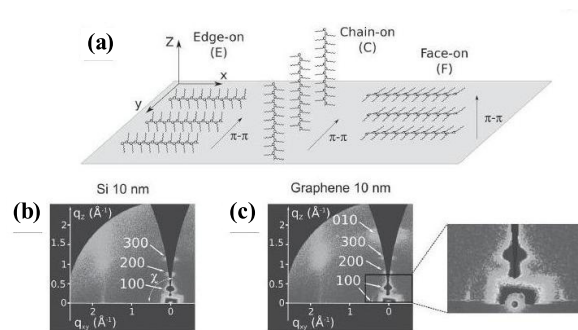


그림 5. 입사각이 $\alpha = 0.13^\circ$ 일 때 10 nm 두께의 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)의 결정성을 보여주는 그림. (a) P3HT 필름에서 가능한 라멜라의 배열(x-y 평면). 좌측은 $\pi-\pi$ stacking된 edge-on 라멜라로 필름의 평면 상에 존재한다. Chain-on 배향의 경우 z 축으로 탄소 주쇄가 수직으로 배열되어 있다. Face-on 라멜라의 경우 z 축에 수직으로 배열되어 있다. 실리콘(b) 및 그래핀(c) 상의 P3HT의 회절 패턴.

에서 제작하였으며, 재료의 전자특성 분석은 스웨덴 Umea University의 David Barbero 실험실에서 진행하였다.

본 연구결과는 *Advanced Functional Materials* 지에 게재되었으며, 그래핀 기질 상에 형성된 고분자 필름은 기존의 실리콘을 사용할 때 보다 훨씬 향상된 수직 전하 이동성을 보여주었다.

게다가, 본 연구의 놀라운 결과는 그래핀 상에 형성된 고분자 필름의 두께가 50 nm 정도로 두꺼울 때가 고분자 필름이 10 nm 정도로 얇을 때에 비해 전하의 이동성이 50배 빠르다는 점이다. 고분자 층의 결정성에 관한 철저한 연구를 통해, 초박형 필름은 잘 배향된 'face-on' 및 'edge-on' 형태의 라멜라(lamellae) 배열을 하는 반면, 두꺼운 필름은 그래핀 기반과 다양한 배향각을 이루는 모자이크 형태의 라멜라를 구성하고 있었다. 서로 다른 각도로 형성된 미세결정(crystallite)은 더 효과적인 수직 전하 이동 및 전하 운반자의 이동도에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

본 연구결과는 그래핀 상에 형성된 반도체 고분자의 결정에 대한 이해도를 높이고, 반도체 필름의 결정성을 조절함으로써 더 효율적인 그래핀 기반의 유기소자를 설계하는데 도움을 주게 될 것이다.

본 연구 결과는 “Enhanced Vertical Charge Transport in a Semiconducting P3HT Thin Film on Single Layer Graphene” 라는 제목으로 *Advanced Functional Materials* 지에 게재되었다.

<V. Skrypnichuk et al., *Adv. Funct. Mater.*,
DOI: 10.1002/adfm.201403418 (2014)>

본 기술뉴스는 KISTI 미리안의 과학기술모니터링(<http://mirian.kisti.re.kr>)의 기사를 참조하여 정리하였습니다.

<김봉수, e-mail: bongsoo@kisti.re.kr>