

땀을 연료로 하는 웨어러블 바이오 연료전지

이상적인 웨어러블 전자소자는 얇고 콤팩트하며 신축성이 있어야 하고 인간의 피부와 접촉을 가능하게 하기 위하여 피부와의 반발이 없어야 한다. 새로운 제조 기술의 발전, 물질 개발, 나노기술 등으로 인하여 다양한 웨어러블 기기가 성공적으로 구현되었으나, 에너지원으로서 기존 벌크한 배터리를 사용함으로써 착용감 등의 문제는 아직 해결되지 않고 있으며 얇고 신축성 있는 배터리 또는 슈퍼커패시터의 개발, 무선 통신을 통한 에너지 공급 방식 등으로 해결하려는 노력이 이루어지고 있다. 그러나 신축성 있는 배터리 개발의 어려움과 무선 충전의 경우 사용자를 고정된 위치에 제한해야 하는 문제 등으로 인하여 몸의 움직임, 태양, 체온 및 생체 유체 등에서 에너지를 얻고자 하는 시도가 대두되고 있으며, 특히 인간의 땀을 이용하여 전기를 생성하는 것은 무해한 생체 분자에 의존하기 때문에 매우 매력적인 방법이라 할 수 있다.

UC 샌디에고의 한 연구팀은 효소를 이용하여 흘린 땀을 연료로 전환하는 웨어러블 바이오 연료전지를 개발하였다. 구체적으로 lactate oxidase(LOx)을 이용하여 인간의 땀에 존재하는 젖산을 포함함으로써 1 mW/cm² 이상의 고출력 밀도를 생성할 수 있는 부드럽고 웨어러블한 전자 피부형 바이오 연료 시스템(electronic skin-type biofuel system, E-BFC)을 제작하였으며, 이것은 이전에 보고된 웨어러블 바이오 연료 전지보다 거의 10배 더 높은 전력 밀도를 나타낸다고 할 수 있다. 또한 E-BFC의 양극 및 음극을 island-bridge 구조를 갖도록 설계함으로써 island들의 중앙 영역은 아래에 있는 신축성 기판에 단단히 결합되는 반면, 구불구불한 다리는 응력에 의해 변형될 수 있어 웨어러블한 E-BFC의 활성 전극을 형성하였다.

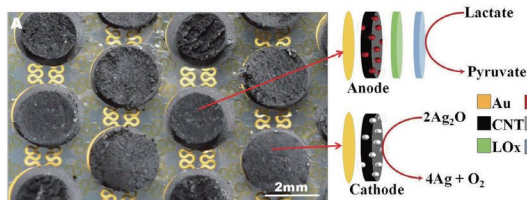


그림 1. E-BFC의 양극 및 음극의 확대도를 보여주는 광학 이미지와 각각의 전극의 성분 및 발생하는 전기 화학 반응을 나타내는 개략도.

Joseph Wang 교수 등에 의해 수행된 본 연구결과는 "Soft, stretchable, high power density electronic skin-based biofuel cells for scavenging energy from human sweat"이라는 제목으로 *Energy & Environmental Science*에 게재되었다.

<A. J. Bandodkar et. al., *Energy Environ. Sci.*, **10**, 1581

DOI:10.1039/C7EE00865A (2017)>

은 나노조각으로부터 은 나노입자의 in-situ 합성을 통한 유연전극 제작

의료산업의 웨어러블화 및 로봇산업의 발전 등으로 인하여 100% 이상까지 변형하여도 그 성능을 유지할 수 있는 유연전극 및 이를 기반으로 하는 유연전자소자에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 유연전극은 액체 금속, 전도성 고분자, 이온 전도체 등 다양한 물질을 이용하여 제작되거나 마이크로 구조를 물체 내부에 포함되도록 설계함으로써 구현되고 있다.

유연전극용 마이크로 구조는 인공적으로 구조를 만들거나 자가조립(self-assembly)을 통해 제작가능하다. 그 중 자가조립을 통해 제작된 마이크로 구조는 대면적 적용성과 낮은 가격, 높은 수율 측면에서 장점을 가지며, 탄소 나노튜브, 금속 나노와이어, 금속 조각, 금속 입자를 이용하여 구현될 수 있다. 특히, 탄성을 갖고 있는 고무에 이러한 물질을 충전제(filler)로 이용하게 되면 인쇄공정이 가능하고 낮은 면저항을 갖게 제작할 수 있으며, 불소화된 탄성체에 대한 우수한 분산성을 갖는 은 조각을 이용하여 제작된 유연 전극은 많이 늘려도 높은 전도도를 유지할

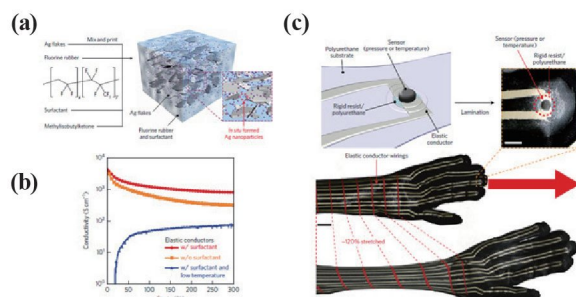


그림 2. (a) 인쇄 가능한 유연 전극의 제조 공정 및 은 나노입자 합성 모식도, (b) 계면활성제 유/무와 고온 공정의 유/무에 따른 탄성 전도체의 변형과 전도도, (c) 압력 및 온도 센서의 구조 및 옷에 삽입되어 있는 센서의 모식도.

수 있다는 장점을 갖는다. 이러한 원리를 기반으로 일본 동경대의 Takao Someya 교수 연구진은 은 조각과 불소화 고무, 계면활성제를 혼합하여 *in-situ*로 은 나노입자를 합성하고 이를 통해 400% 변형에서도 935 Scm^{-1} 의 높은 전도도를 나타내며 인쇄공정이 가능한 유연 전극을 개발하였다. 이러한 유연 전극을 이용하여 250% 높은 변형에서도 동작이 가능한 압력 센서와 온도 센서를 제작하였으며, 이 기술은 로봇분야용 스트레처를 전자소자에 큰 영향을 줄 것이라 예상된다.

Takao Someya 교수 연구진에서 수행한 본 연구는 "Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes"라는 제목으로 *Nature Materials*에 게재되었다.

<N. Matsuhsa et. al., *Nat. mater.*, **16**, 834

DOI:10.1038/NMAT4904 (2017)>

고분자를 이용하여 포토리소그래피 공정에 대하여 우수한 화학 안정성을 갖는 bottom-gate bottom-contact ambipolar 트랜지스터를 개발하였으며, graphene 층 위에 PTDPSe-Si 고분자를 solution-shearing 코팅법으로 증착하여 π - π 상호작용이 잘 이루어지도록 유도하였다. 또한, 포토리소그래피 시 사용되는 유기용매에 우수한 안정성을 갖는 PTDPSe-Si 고분자가 아세톤 증기에 노출 시 mobility가 소폭감소하는 점을 이용하여 아세톤 검출 센서를 제작할 수 있음을 제시하였다.

본 연구 결과는 "Chemically Robust Ambipolar Organic Transistor Array Directly Patterned by Photolithography"라는 제목으로 *Advanced Materials*에 게재되었다.

<E. K. Lee et. al., *Adv. Mater.*, **29**, 1605282

DOI:10.1002/adma.201605282 (2017)>

포토리소그래피 방식으로 패턴된 고안정성 Ambipolar 유기 트랜지스터 어레이

유기 반도체물질은 용액공정이 가능하고 구부림에 대한 내구성이 우수하여 유기 전계효과 트랜지스터(OFET), 유기 발광형 트랜지스터(OLET) 등 다양한 유연전자소자에 사용되고 있다. 이러한 유기 반도체물질을 유연 전자소자에 적용하기 위해서는 패턴링 공정이 필수적이며 포토리소그래피(photolithography) 방식이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 포토리소그래피 방식은 현상 및 노광, 감광제의 박리시 다양한 유기용매가 사용되며, 이러한 유기용매는 유기 반도체 특성에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있으므로 대체 패턴링 방식에 대해 연구가 활발히 이루어지고 있다.

POSTECH의 오준학 교수 연구진과 UNIST 양창덕 교수 연구진은 siloxane-terminated side chain을 갖는 PTDPSe-Si

첨가제를 이용한 나노공공 내의 수분 제거 및 이를 통한 트랜지스터의 안정성 향상

유기 트랜지스터는 유기반도체 물질, 전극, 그리고 물질 사이의 계면 등에 대한 지속적 연구를 바탕으로 그 성능이 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 mobility는 무기 트랜지스터와 경쟁할 수 있을 만큼 많은 향상을 이루었다. 그러나 유기 트랜지스터는 안정성에 있어서 많은 문제점을 가지고 있으며 이러한 불안정성은 주로 산소와 수분에 의하여 야기된다고 알려져 있다.

Henning Sirringhaus 교수 연구진은 유기트랜지스터의 성능 저하 및 불안정성이 나노단위의 공공에 위치한 수분에 기인함을 밝혀냈으며, 나노 공공 내의 수분을 제거하여 유기트랜지스터의 안정성을 향상시킬 수 있는 첨가제를 개발하였다. 이러한 첨가제는 첨가제-고분자 상호작용이 수분-고분자 상호작용보다 선호됨으로써 나노공공 내의 수분을 제거하거나 첨가제가

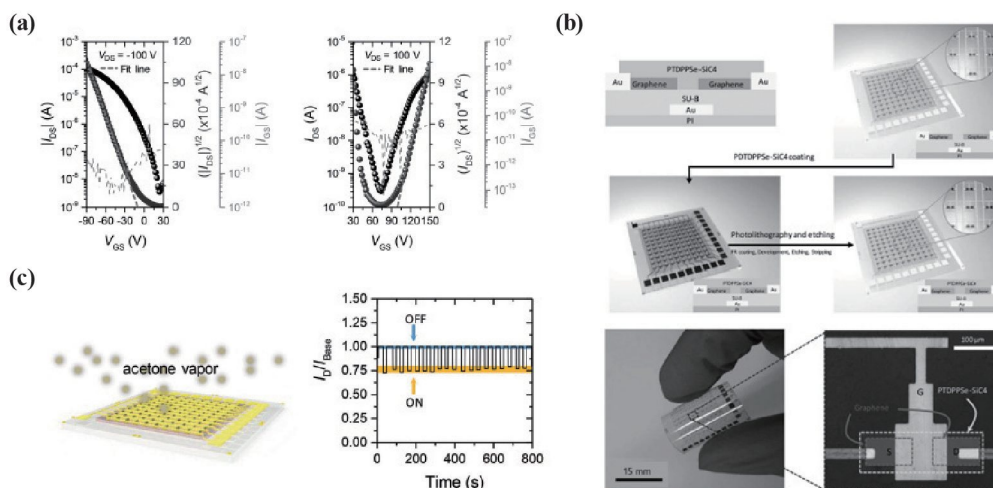


그림 3. (a) graphene 전극을 갖는 PTDPSe-SiC4 전계효과 트랜지스터의 p-채널(좌)과 n-채널(우)의 transfer 곡선 특성, (b) bottom-gate-bottom-contact 트랜지스터 구조 및 제작 방법, 트랜지스터 어레이의 모식도, (c) 아세톤 증기에 따른 이동도의 변화.

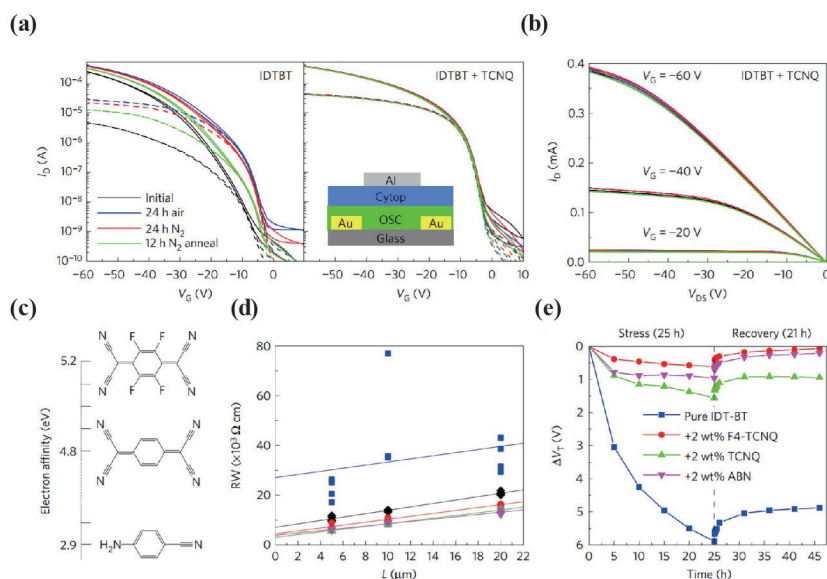


그림 4. 첨가제 도입에 따른 고분자 트랜지스터의 환경 및 구동 안정성 향상. (a) 2 wt% 첨가제를 갖는 트랜지스터의 transfer 곡선과 (b) output 특성 및 (c) 첨가제별 전자친화도, (d) 트랜지스터 채널 길이에 따른 채널 저항과 (e) 일정한 전류에 의한 stress 시 시간에 따른 문턱전압 변화.

수분과 강하게 상호작용하여 고분자에 영향을 미치지 않도록 함으로써 안정성을 향상시키는 것으로 생각되었다.

본 연구는 Cambridge cavendish 연구소 optoelectronics 그룹의 Henning Sirringhaus 교수 연구진의 연구로 진행되었으며, "High operational and environmental stability of high-mobility conjugated polymer field-effect transistors through the use of molecular additives"라는 제목으로 *Nature Materials*에 게재되었다.

<M. Nikolka et al., *Nat. Mater.*, **16**, 356

DOI:10.1038/nmat4785 (2017)>

자가전력 무선 Body Sensor Network 기술

Body sensor network(BSN)을 기반으로 하는 기술은 질병 진단 뿐만 아니라 개인의 건강 모니터링 및 평가를 하기 위해서 주로 사용되고 있다. 특히, 심박수에 대한 모니터링은 심박수가 심장 혈관의 건강 상태를 직접 나타내는 척도이기 때문에 건강 관리와 진단을 위해 가장 많이 행해지고 있는 기술로, 심박수 모니터링을 위한 기존의 BSN은 배터리를 통한 전력을 공급받았지만 이는 수명에 한계가 있고 배터리의 환경 오염 잠재력 때문에 자가 전력 BSN에 대한 수요가 늘어나고 있다.

Georgia Institute of Technology의 Zhong Lin Wang 교수 연구진은 스스로 전력을 생산하고 심박수 모니터링 결과를 무선으로 전달할 수 있는 자가 전력 무선 BSN을 통해서 무선으로 데이터를 전달할 수 있는 downy-structure-based triboelectric nanogenerator(D-TENG)를 완성하였다. 이 D-TENG은 심박

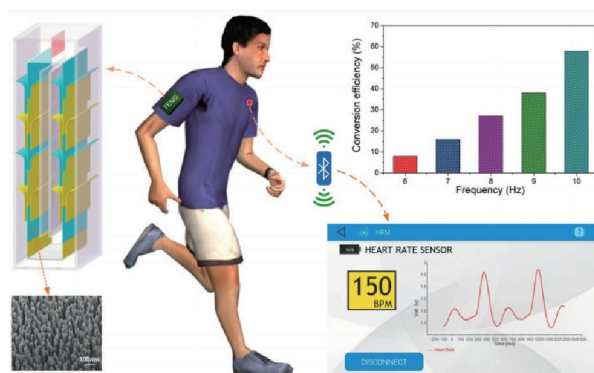


그림 5. 심박수 측정 센서와 신호처리 장치, 전원 관리 회로, 블루투스 모듈로 구성되어 있는 자가 전력 무선 심박수 모니터링 장치의 개념도.

수 측정 센서와 신호 처리 장치, 전원 관리 회로, 블루투스 모듈로 구성되어 있어 무선으로 작동될 수 있으며 걸으면서 생성되는 에너지를 전력으로 변경함으로써, 낮은 동작 주파수에서 총 변환 효율이 57.9%인 2.28 mW를 생산해 BSN 시스템을 즉각적이고 지속적으로 구동할 수 있게 되었다.

본 연구 결과는 "Triboelectric Nanogenerator Enabled Body Sensor Network for Self-Powered Human Heart-Rate Monitoring"라는 제목으로 *ACS Nano*에 게재되었다.

<Zhiming Lin et al., *ACS Nano*,

DOI:10.1021/acsnano.7b02975 (2017)>

<김종복, e-mail: jbkim@kumoh.ac.kr>