

분산 모니터링 응용을 위한 고신뢰성 유기 수소 센서

호동일 | 국립공주대학교 화학공학부 (E-mail: dongilho@kongju.ac.kr)

본 연구에서는 수소에 의해 유도되는 가역적 탈도핑 메커니즘을 활용한 고분자 반도체 기반 수소 센서를 개발하였다. 해당 센서는 1.19×10^4 의 높은 감도, 1초 미만의 응답 속도, 약 192 ppb의 낮은 검출 한계, $2 \mu\text{W}$ 이하의 저전력 구동을 보이며 분산형 센서 네트워크를 통한 수소 누출 조기 경보 및 안전 확보 가능성을 뒷받침한다. 이러한 성과는 유기 반도체의 공정 친화성과 비용 효율성을 고려할 때 차세대 수소 안전 모니터링 및 수소 경제 확산을 위한 핵심 기술 플랫폼으로 발전할 수 있음을 시사한다.

수소는 빠른 확산 속도와 높은 에너지 밀도와 같은 독특한 물성을 지니고 있어 에너지, 운송, 석유 정제, 국방, 우주, 식품, 제약 등 다양한 산업 분야에서 활용 가능성이 크다. 그러나 폭발성이 크고 낮은 인화점을 가지며 사람의 감각으로는 감지할 수 없다는 점에서 생산·저장·활용 과정 전반에서 심각한 안전 문제가 발생한다. 이에 따라 잠재적인 누출을 조기에 감지할 수 있는 고감도·고선택성 수소 센서에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 수소 경제가 본격적으로 확대되는 상황에서는 이러한 센서가 저비용 대량 생산이 가능하고 저전력으로 구동되며 상온에서 안정적으로 작동하고 환경적 영향이 최소화된 형태여야 한다.

영국 University of Manchester의 Thomas D. Anthopoulos 교수 연구팀은 고분자 반도체인 poly[3,6-bis(5-thiophen-2-yl)-2,5-bis(2-octyldodecyl)pyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4(2H,5H)-dione-2,2'-diyl-alt-thieno[3,2-b]thiophen-2,5-diyl] (DPP-DTT)를 활성층으로 사용하는 수소 센서를 개발하였다. 연구팀은 유기 반도체의 산소 종에 의해 p-도핑되는 현상에 기반하여 수소가 물리적으로

흡착된 산소 종과 상호작용하면서 발생하는 전류 변화를 감지하는 원리를 활용하였다. 이 센서는 1.19×10^4 의 높은 감도, 1초 미만의 응답 속도, 약 192 ppb의 낮은 검출 한계, $2 \mu\text{W}$ 이하의 저전력 구동, 그리고 상온 공기 중 646일 이상 동작 가능한 장기 안정성을 입증하였다. 또한 복잡한 가스 환경에서도 안정적인 성능을 유지하며 수소에 대한 뛰어난 선택성을 나타냈다.

아울러 해당 수소 센서는 다양한 실제 센싱 시연에서 상용 센서보다 우수한 성능을 발휘함이 확인되었다. 이는 유기 기반 센서가 무선 센서 네트워크에 활용될 수 있는 잠재력을 보여주는 결과다. 더 나아가, 본 센서는 동적 조건에서 수소 농도를 정량적으로 분석하는 데에도 사용되었으며 높은 신뢰도의 동적 감지 능력을 입증하였다. 또한, 유기 반도체의 특성 덕분에 대량 생산과 비용 효율적 제조가 가능하며, 실제로 스크린 프린팅 공정으로 제작된 소자가 스펀코팅 소자와 유사한 성능을 보였다. 이러한 특성으로 인해, 본 고분자 수소 센서는 앞으로 다가올 수소 경제 시대에 폭넓게 활용될 수 있는 핵심 기술이 될 것으로 기대된다.

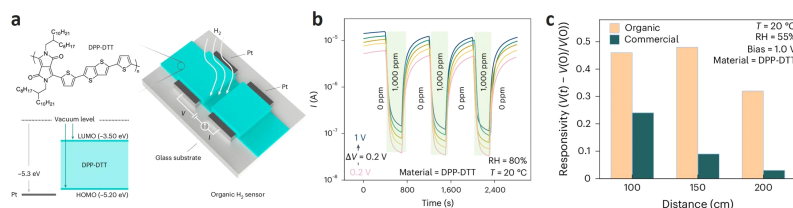


그림 1. (a) DPP-DTT 기반 수소 센서 소자의 개략도. (b) 수소 농도 전환에 따른 다양한 인가 바이어스 조건에서 측정된 DPP-DTT 소자의 실시간 전류 응답. (c) 상용 센서와 유기 센서의 감응도 비교.

본 연구결과는 *Nature Electronics*에 "A robust organic hydrogen sensor for distributed monitoring applications"의 제목으로 2025년 3월에 게재되었다 (DOI: 10.1038/s41928-025-01352-y).