

전기전도도 향상시킨 인쇄형 플라스틱 투명전극 개발



클_이광희

광주과학기술원 신소재공학부 교수
klee@gist.ac.kr

글쓴이는 서울대 원자핵공학과 졸업 후 카이스트에서 석사학위를, 캘리포니아대학교 샌타 바버라 캠퍼스에서 박사학위를 받았다. 한국원자력연구소 선임연구원, 부산대학교 교수 등을 지냈으며 현재 광주과학기술원 차세대 에너지연구소 소장 등을 겸임하고 있다.

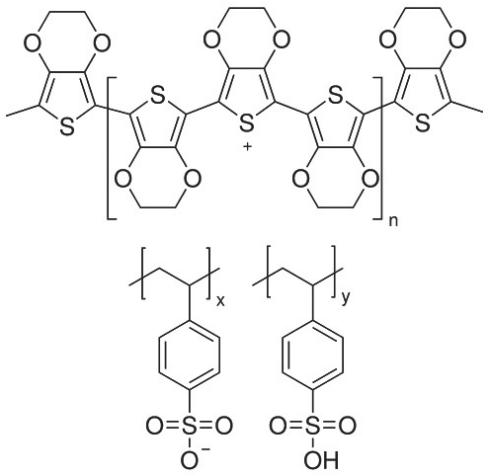
휘어지는 플라스틱 전자소자는 가볍고 유연하여 미래의 유비쿼터스 시대에 유용하게 이용될 수 있는 과학기술의 집합체이다. 이러한 전자 소자 개발에 있어 가장 중요한 요소 중 하나는 플라스틱 투명전극의 개발이다. 그러나 지금까지 개발된 플라스틱 투명전극은 현저하게 전도도가 낮기 때문에 이에 대한 극복이 시급한 실정이다.

플라스틱 투명전극 개발 필요성

투명전극은 LCD, PDP, OLED 등의 평판 디스플레이, 터치스크린, 박막 태양전지에 다양하게 활용되고 있다. 현재 사용되고 있는 가장 대표적인 투명전극은 우

수한 광학적, 전기적 성능을 나타내는 인듐 주석 산화물(ITO)이다.

하지만 ITO는 깨지기 쉬운 특성 때문에 차세대 휘어지는 소자 분야에서 사용되기 어려울 뿐만 아니라 고온의 증착 공정을 사용하기 때문에 인쇄 공정을 활용하여 고성능의 투명전극을 제작하는데 한계가 있어왔다. 또한 ITO의 주원료인 인듐의 매장량 한계와 이에 따른 가격 상승으로 새로운 투명전극의 개발이 절실한 상황이다. ITO를 대체하기 위한 투명전극으로 카본나노튜브, 그래핀, 은나노, 와이어(wire), 금속산화물 등에 대한 많은 연구가 진행되었지만 뚜렷하게 두각을 나타내는 소재는 없는 상황이다.



▶▶ 1. PEDOT:PSS의 화학구조

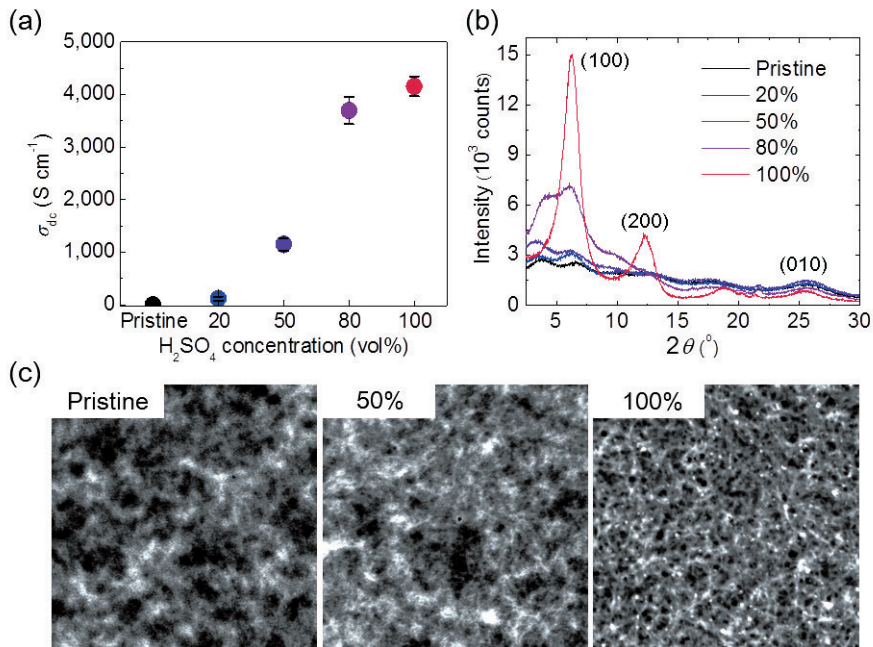
피닷:피에스에스(PEDOT:PSS) 플라스틱 투명전극

전도성 고분자는 유기물로 이루어져 일반적인 플라스틱의 장점인 가공성, 경량성, 유연성, 낮은 생산가 등을 갖는 동시에 금속처럼 전기가 통하는 물질이며 가시광 영역에서 투과도가 높기 때문에 ITO 대체 물질로 각광을 받고 있다. 또한, 유기물로 구성된 기존의 대체

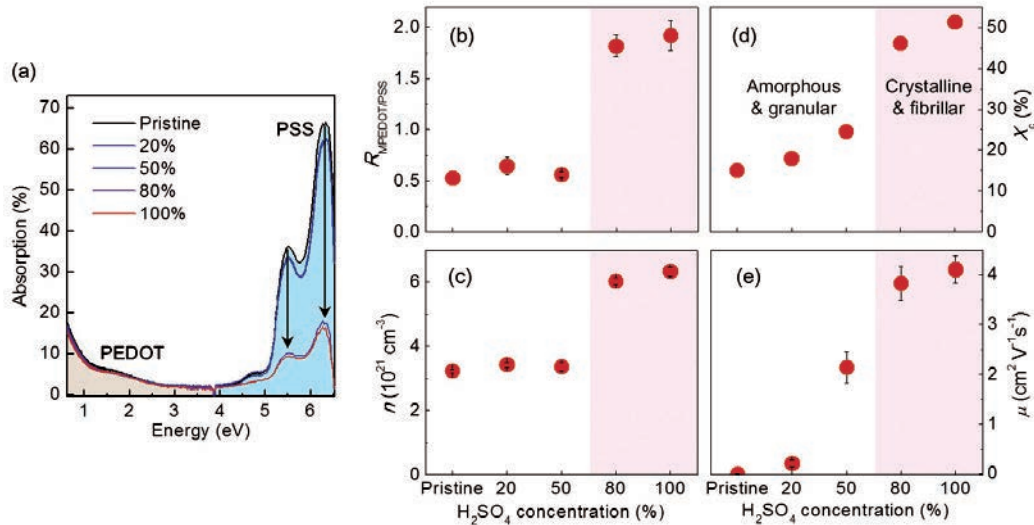
물질 역시 ITO에 버금가는 전기 전도도를 얻기 위해서는 반드시 고가(高價)의 복잡한 증착공정이 필요하지만, 전도성 고분자는 저온 용액 공정이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

대표적인 전도성 고분자인 피닷:피에스에스(PEDOT:PSS: poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate))는 전도성 플라스틱 물질 중에서 전도도가 높고, 가시광 영역에서 투과도가 좋으며, 물에 녹아 있어 친환경적으로 용액 공정이 가능하다. 또한 안정성이 우수하여 가장 널리 사용되고 있는 전도성 플라스틱 물질 중의 하나이다(그림 1). 그러나 투명전극으로 사용하기에는 전도도가 1 S/cm 으로 매우 낮으며, ITO (>5,000 S/cm)와 비교하여 터무니 없는 수치이다.

지난 이십여 년 간 PEDOT:PSS의 광학적, 전기적 특성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔고, 여러 유기용매나 계면활성제, 산 처리를 통해 전도도를 개선하려는 시도가 있었다. 하지만 전도도 향상에 대한 구체적인 메커니즘을 제시하지 못하고 있을 뿐만 아니라 ITO를 대체할 만한 전기적 특성을 나타내지 못하여 실질적인



▶▶ 2. 다양한 농도의 황산 처리에 따른 PEDOT:PSS의 a) 전기 전도도, b) X-선 구조 분석, c) 주사투과전자현미경 이미지. 황산의 농도가 증가함에 따라 전도도가 증가하여 최고 4,380 S/cm의 값을 나타내고, 이는 결정화된 나노섬유가 형성되었기 때문임을 확인함.



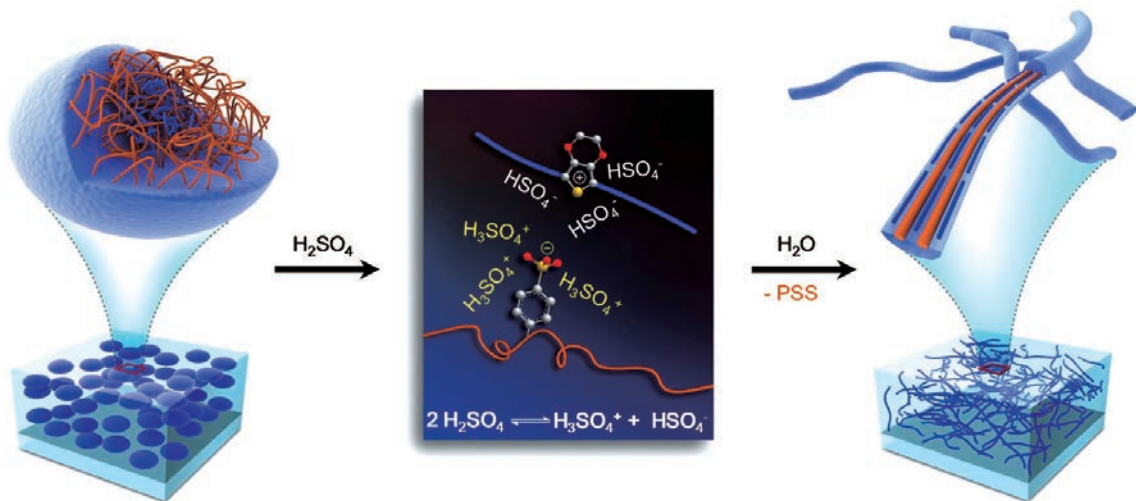
▶▶ 3. 다양한 농도의 황산 처리에 따른 PEDOT:PSS의 a) 흡수 스펙트럼, b) 몰비 (molar ratio), c) 전하밀도, d) 결정도, e) 전하이동도의 변화. 황산의 농도가 증가함에 따라 변화하는 PSS의 함량이 결정도 형성과 전하밀도 및 전하 이동도의 변화와 관계가 있음을 입증함.

상용화에 어려움을 겪고 있다.

황산 처리를 이용한 전도도 향상 및 메커니즘 규명

우리 연구팀은 기존의 PEDOT:PSS를 다양한 농도의 황산으로 처리하여 나타나는 전기적 성질의 변화와 구

조적 변화를 관찰하였다. 전도도는 황산의 농도에 비례하여 증가하였고, 황산 100%일 때 최고 전도도 (4,380 S/cm)를 나타냈다. 이러한 전도도의 증가현상은 황산의 농도가 증가함에 따라 PEDOT:PSS의 나노구조가 알갱이 형태에서 나노섬유 형태로 변화하면서



▶▶ 4. 고농도의 황산 처리를 통한 PEDOT:PSS 구조의 재정렬과 전도도 향상 메커니즘 모식도. PEDOT:PSS의 나노구조는 황산처리에 의해 알갱이(grains) 형태(왼쪽)에서 나노섬유(nanofibrils) 형태(오른쪽)로 변화하면서 결정도가 증가한다. 이러한 변화는 황산 처리에 의한 '전하가 분리된 전이상태(charge separated transition state)'(가운데)를 통하여 이루어짐을 입증하였다.

결정도가 증가함을 확인하였고, 이러한 구조적인 변화가 전도도의 증가에 크게 기인함을 규명하였다(그림 2).

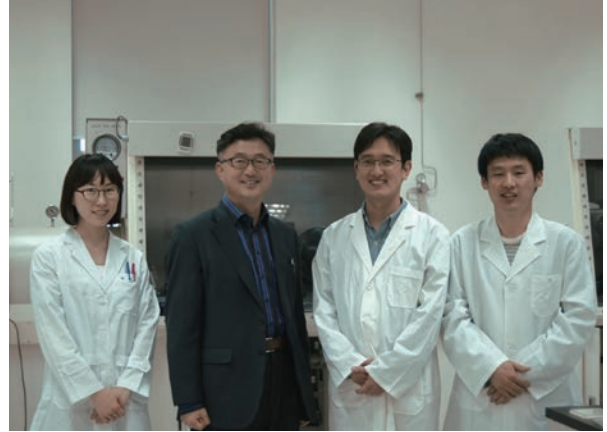
이번 연구 결과에서 연구팀은, 황산 농도에 따른 PEDOT:PSS의 분광학적 변화를 관찰한 결과, PSS의 함량이 전도도와 관계가 있음을 입증하였다(그림 3). 고농도의 황산 처리는 '전하가 분리된 전이상태'를 유도하여 PEDOT:PSS 복합체로부터 PSS를 제거하게 되고, 그 결과로 고결정성 나노섬유가 형성된다는 메커니즘을 제시하였다(그림 4).

ITO를 대체할 수 있는 플라스틱 투명전극

본 연구에서 개발된 높은 전도도를 가지는 전도성 고분자는 면저항 $46.1 \Omega \text{ sq}^{-1}$ 그리고 90% (550nm 흡수 영역) 이상의 투과도를 나타냄으로써 투명전극으로의 높은 가능성을 나타냈다. 이러한 플라스틱 투명전극을 이용하여 유기태양전지를 제작한 결과 ITO를 사용하였을 때와 거의 유사한 (>95%) 에너지변환 효율을 나타냄을 확인할 수 있었다(그림 5).

플라스틱 투명전극 상용화 가능성 앞 당겨

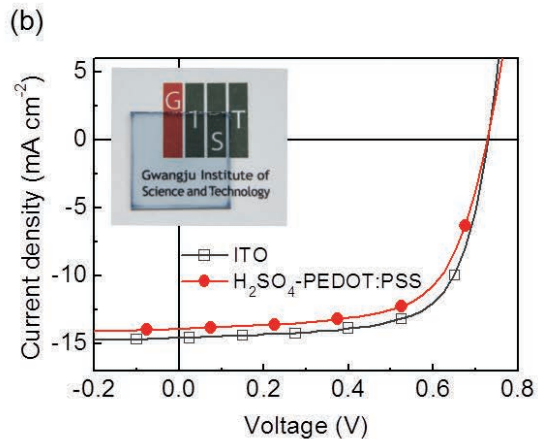
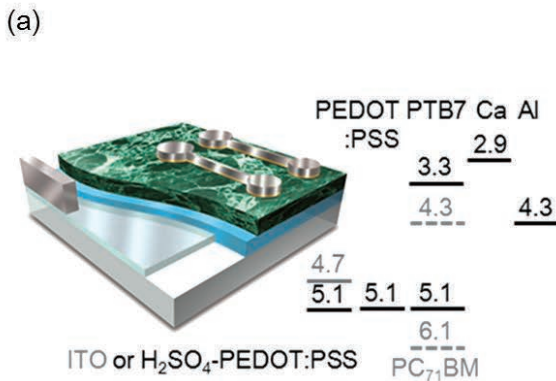
이번 연구 성과는 전도성 플라스틱의 전도도를 높여 기존의 값비싼 ITO 전극을 대체할 수 있는 근거를 마



▶▶ (좌로부터) 김나라 광주과학기술원 신소재공학부 석·박사통합과정(제1저자), 이광희 교수, 이성호 광주과학기술원 차세대에너지연구소 선임연구원(교신저자), 기세영 광주과학기술원 신소재공학부 박사과정(제1저자)

련했다는 데 큰 의의가 있다. 특히, 고전도도의 플라스틱에서 새로운 물리적 현상을 관찰할 수 있었기 때문에 학문적으로도 중요한 의미를 지닌다.

본 연구에서 개발한 전극의 실질적인 상용화를 위해서는 보다 높은 전도도와 안정성을 확보해야 하지만, 이 결과는 ITO를 대체할 수 있는 투명전극으로서의 가능성을 제시하며 향후 휘어지는 디스플레이와 태양전지의 상용화 가능성을 앞당길 수 있을 것으로 기대된다. (ST)



▶▶ 5. 황산 처리한 PEDOT:PSS와 ITO를 각각 유기 박막 태양전지의 투명전극으로 사용했을 때의 성능 비교. ITO 대비 95%의 광전변환효율을 보인다.