

★ 배포 즉시 보도하여 주시기 바랍니다.

보도자료



한국연구재단
National Research Foundation of Korea

<홍보실> 실장 김한기, 담당 장효정 ☎ 042-869-6116

<자료문의> 광주과학기술원(GIST) 신소재공학부 윤명한 교수 (062-715-2320)

인체 이식형 전자소자 개발

- 신경보철 및 바이오센서 등 생체전자기기 응용 기대 -

□ 국내 연구진이 인체 이식용 전자의료기기의 성능과 안정성을 높이는 전자소자 개발에 성공했다. **GIST(지스트, 총장 문승현) 윤명한·이광희 교수 연구팀이 고온·고압의 멸균처리 후에도 체내에서 장시간 안정적으로 작동하는 고성능 플라스틱 전해질 전자소자를 개발했다고 한국연구재단(이사장 노정혜)은 밝혔다.**

※ 김성민 박사(광주과학기술원), 김창현 교수(가천대학교)가 제1저자로 연구를 수행함.

□ 유기생체전자소자*는 기존의 무기물 및 탄소 기반 소자보다 우수한 생체신호 감지능력, 기계적 유연성, 생체적합성과 낮은 공정비용 등의 특성에 따라 차세대 인체 이식용 전자의료기기의 핵심기술로 주목받고 있다. 하지만 인체 내 장시간 사용 시 필요한 체내 구동 안정성과 고온·고압 멸균처리 중 발생하는 변성이 약점으로 지적되어 왔다.

* 유기생체전자소자(Organic Bioelectronics) : 전도성 고분자물질 기반의 생체전자인터페이스 소자로 체내 생체신호 및 이온·단백질 농도 측정, 신경세포와 심근세포의 전기·이온성 자극 등에 응용되고 있음.

□ 이러한 한계를 극복하기 위해 연구팀은 계면활성제와 가교제 등 첨가제를 추가하는 기존의 개선방식 대신 근본적인 재료공학적 접근법을 통해 높은 성능과 안정성의 동시 확보를 시도했다.

- 연구팀은 유기생체전자소자 개발 분야에서 가장 대표적인 물질인 전도성 고분자(PEDOT:PSS)의 미세구조를 분석해 첨가제 없이 활성층 고분자 물질의 고결정성 분자 재배열 유도만으로도 전해질 트랜지스터의 소자 성능과 수용액상 안정성이 극대화한다는 사실을 규명했다.
- 또 연구팀은 이 같은 고결정성 고분자의 안정성에 따라 플라스틱 전자소재를 이용한 생체전자소자가 생체 이식형 의료기기의 미생물 멸균 과정에서 주로 쓰이는 고온·고압의 오토클레이브(Autoclave) 처리 이후에도 고성능·고안정성을 유지할 수 있다는 점을 확인했다.
- 윤명한 교수는 “생체전자소자 개발을 위해 필수적인 전도성 고분자 물질의 성능 향상과 용액 안정성을 비교적 간단한 용역매개 결정화법을 통해 확보한 것”이라며 “향후 생체전자소자 상용화와 사물인터넷(IoT) 기반의 유연 광센서나 수계 유기전극 기반 촉매 개발에도 기여할 수 있을 것”이라고 연구의 의의를 설명했다.
- 이 연구 성과는 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(중견연구), 미래소재디스커버리사업, 나노·소재원천기술개발사업 지원으로 수행되었으며, 국제학술지 네이처 커뮤니케이션즈(Nature Communications) 9월 21일 자 논문으로 게재되었다.

<참고자료> : 1. 주요내용 설명
3. 연구 이야기

2. 그림 설명

1 주요내용 설명

□ 논문명, 저자정보

논문명	Influence of PEDOT:PSS crystallinity and composition on electrochemical transistor performance and long-term stability
주저자	윤명한 교수(교신저자, GIST), 김성민 박사(제1저자, GIST), 김창현 교수(공동1저자, 前 GIST, 現 가천대학교)

□ 연구의 주요내용

1. 연구의 필요성

- 현재 생체전자인터페이스기술은 미래 전자기기 산업 발전의 유력한 분야로 인식되어 유수의 세계적 기업들이 Verily Life Sciences*와 같은 합작회사를 만들어 본 기술의 상용화에 착수할 정도로 유망한 기술이다.
* Verily Life Sciences : 세계적 IT회사인 Google과 제약회사인 GlaxoSmithKline(GSK)의 합작 회사
- 유기생체전자소자 (Organic Bioelectronics) 는 전기전도성 고분자물질을 소자의 활성물질 (Active Material)로 사용하는 생체전자인터페이스 소자이다. 기존 무기물 및 탄소기반 소자와 비교하여 월등한 생체신호 감지효율 및 공정의 유용성, 인체 내 삽입시 낮은 부작용으로 인해 체내 생체신호 및 이온농도, 단백질 농도 측정, 나아가 신경세포, 심근세포의 전기 및 이온성 자극에도 응용되고 있어 생체전자인터페이스기술 개발에서도 가장 유망한 분야 중 하나이다.
- 전도성 고분자의 유기생체전자소자로의 응용을 위해서는 수용액 구동시 이온의 재료 내부로의 이동이 유용하게끔 친수성 고분자 혼합물 혹은 겔가지가 필요한데, 이러한 친수성 물질은 장기간 용액구동시 재료의 팽윤현상을 유발해 소자 성능의 저하를 야기하며, 특히나 인체 삽입형 소자 제작을 위한 필수 요소인 고온-고압의 멸균처리를 견디기 힘들게 한다는 점이 한계로 지적되어 왔다.

2. 연구내용

○ 연구진은 용매매개결정화법*을 도입하여 고 결정성 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)* 필름을 도입하여, 물질의 구조적, 조성 특징에 따른 전기적/전기화학적 특성 및 전기화학트랜지스터*로써의 그 성능 및 구동안정성을 평가하였다.

* 용매매개결정화법(Solvent-assisted crystallization) : PEDOT:PSS를 자가결정화 시킬 수 있는 용매에 필름을 침수시켜 결정화를 유도하는 방법

* PEDOT:PSS : PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene):polystyrene sulfonate) 는 PEDOT(poly(3,4-ethylenedioxythiophene))과 PSS (polystyrene sulfonate) 사슬로 이뤄진 고분자혼합물이다. PSS의 술폰기(sulfonyl group) 가 탈양성자화 (deprotonation)되어 음전하를 띄게 되고, 이는 반도체성 공액고분자 (Conjugated polymer)인 PEDOT의 P-type 전하수송체(Charge carrier)인 홀을 유도하게 되어 전도성을 띤 고분자혼합물을 형성하게 된다.

* 전기화학 트랜지스터(electrochemical transistor) : 수용액 전해질구동의 트랜지스터로 게이트전압에 따른 수용액 전해질 속 이온의 유입에 의해 채널의 전기전도도를 제어하는 전자소자이며, 신호증폭율이 매우 높아 생체 조직의 전기신호 측정 플랫폼으로 많이 응용이 되고 있으며, 전도성고분자의 전자 및 이온 이동도를 측정할 수 있어 물질연구를 위한 목적으로도 많이 사용된다.

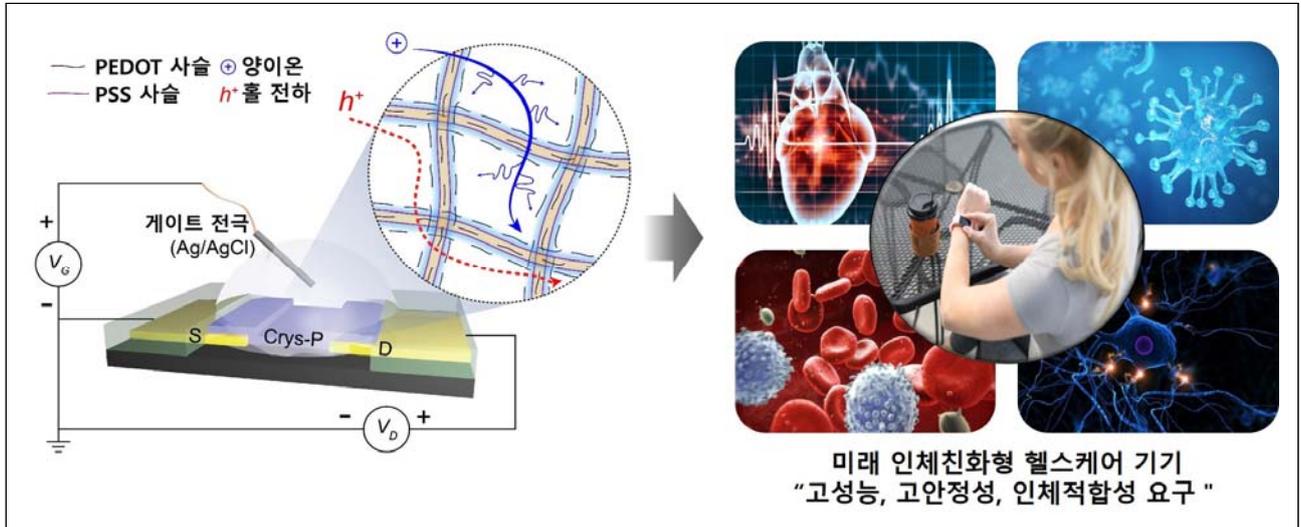
○ 기존 PEDOT:PSS의 경우, 높은 PEDOT 대비 PSS 비율($M_{SS}:M_{EDOT}=1.8$)과 낮은 등방성 구조를 지닌 것에 반해, 이 연구에서 제시된 결정성 고분자는 높은 이방성 결정구조와 함께 낮은 PSS 함량 ($M_{SS}:M_{EDOT}=0.6$)과 다공성 표면구조를 지님을 확인하였다. 또한, 결정성 구조의 변화에 따라 기존 PEDOT:PSS의 부피당 전기화학용량* (31 F/cm^3) 보다 약 3.5배 증가한 높은 값 (113 F/cm^3)을 보임을 확인하였다. 또한 전기화학트랜지스터 제작 시에도 기존의 소자 ($[\mu\text{C}^*]_{\text{OECT}} = 47 \text{ Fcm}^{-1}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)에 비해 약 10배 높은 성능지표 ($[\mu\text{C}^*]_{\text{OECT}} = 490 \text{ Fcm}^{-1}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)를 보임을 확인하였다. 또한 기존의 유기생체전자소자 개발의 한계점으로 제시되었던 구동 안정성측면에서도 체내와 유사한 환경인 37°C 수용액 침수 21일차까지 트랜지스터 성능의 변화가 없음을 확인하였으며, 나아가 고온 고압의 멸균법인 오토클레이브 처리이후에도 트랜지스터 출력곡선에서 눈에 띄는 변화가 없음을 확인하였다.

- 이 연구는 향후 생체전자소자의 개발에 있어서 가장 많은 연구가 필요한 부분인 전도성 고분자 물질의 성능향상 및 용액안정성확보를 비교적 간단한 용액매개 결정화법을 통해 해결하였다는 점에서 그 의의가 있다.

3. 연구성과/기대효과

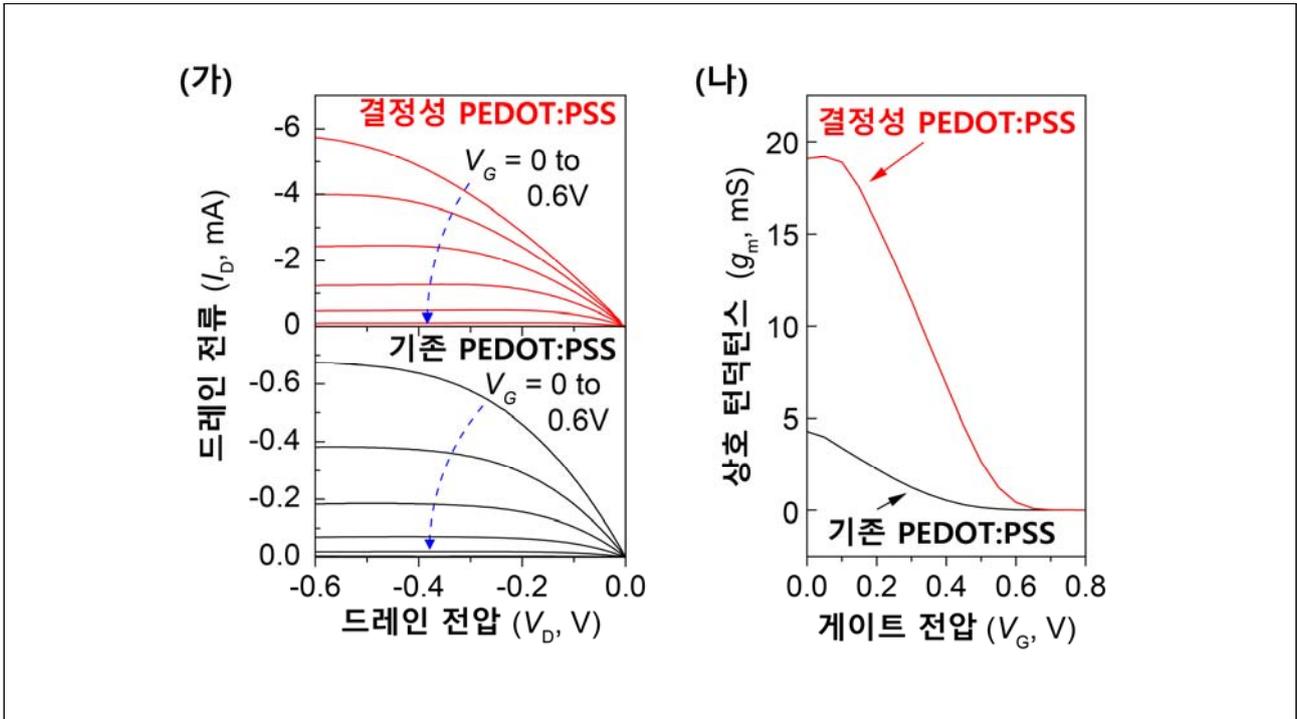
- 이 연구에서는 유기생체전자소자 개발에 있어서 가장 대표적인 물질인 PEDOT:PSS의 미세 구조에 따른 유기생체전자소자의 성능 및 구동안정성을 분석하여 이상적인 전도성 고분자 구조를 제시하고 미래형 생체전자소자 개발을 위한 고성능, 고안정성 소자를 확보하였다.
- 유기생체전자분야는 고분자화학, 반도체물리, 생물학 등의 여러 배경지식이 융합되어야 하는 다학제간 연구가 필요한 분야로 그 유망성에 비해 연구적 접근이 힘들어, 미국 및 유럽의 몇몇 연구그룹들이 대부분의 연구를 수행하는 실정이었다. 하지만 이번 연구를 통해 얻을 핵심기술을 통해 우리나라에서도 이 분야로의 연구가 활발히 이루어질 수 있을 것이라 예상된다.
- 생체전자기기는 실시간 생분자 탐지, 부정맥탐지 등의 의료용기기 등 여러 분야에 활용이 가능하여 그 유망성이 높으므로, 이 연구에서 제시한 접근법은 향후 고성능 고안정성 생체전자소자 상용화에 큰 진전을 가져올 것이라 기대한다.

2 그림 설명



(그림1) 고성능, 고안정성을 지닌 플라스틱 나노소자 및 결정화된 전도성고분자의 세부구조 및 미래 인체친화형 헬스케어 기기의 모식도.

결정화된 PEDOT:PSS 는 높은 결정성과 다공성 미세구조로 인해, 높은 소자성능 및 기기안정성을 띤다. 미래 인체 친화형 헬스케어 기기의 개발의 측면에서 볼 때 이 연구결과는 플라스틱 생체전자기기의 성능 및 안정성 향상 측면에서 근본적인 접근법을 제시한다는 점에서 주목할 만하다.

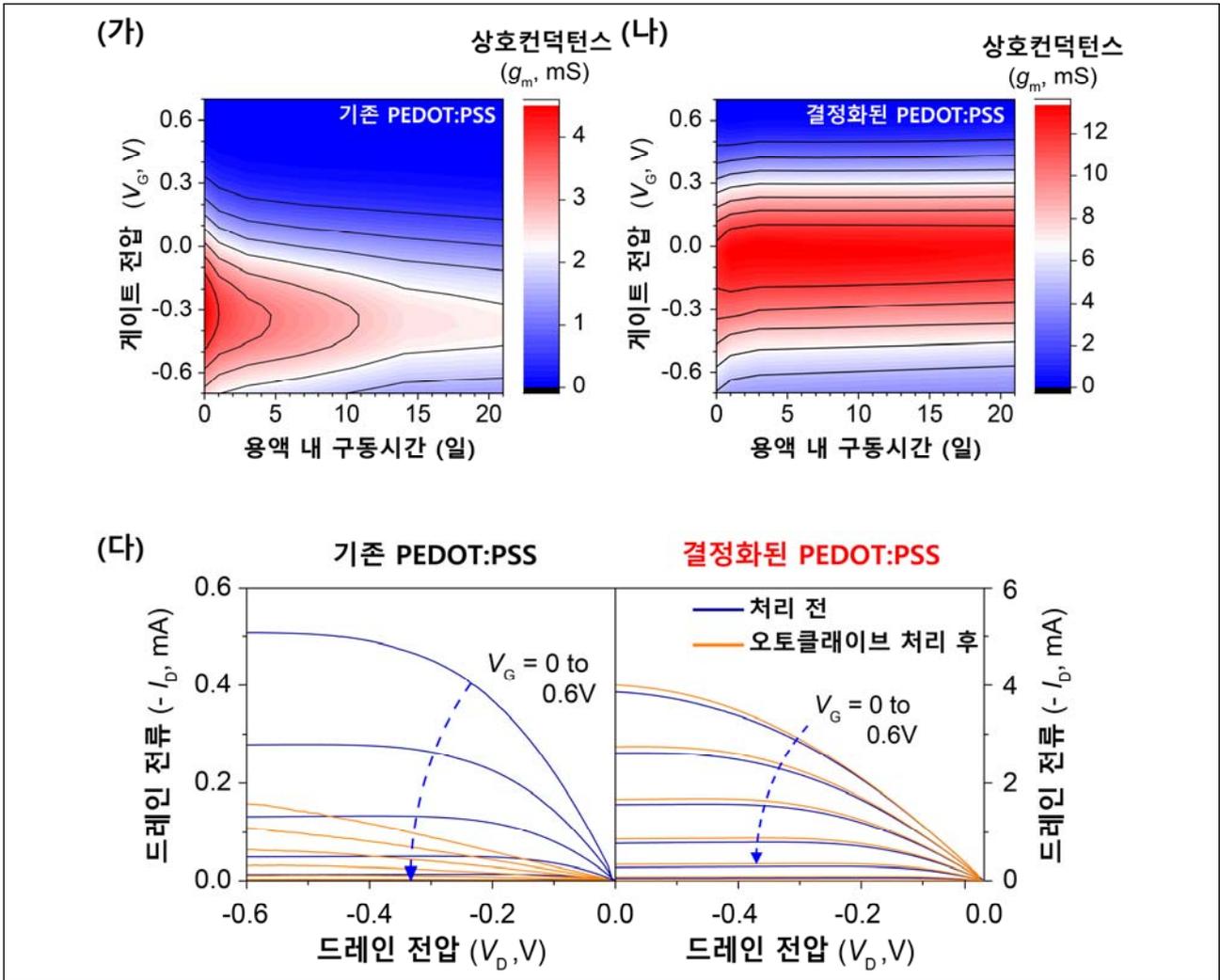


(그림2)

(가) 결정화된 PEDOT:PSS (Crys-P) 와 기존 연구에서의 PEDOT:PSS (EG-P, 비교군) 기반 논리소자의 수용액 구동 시 출력곡선 비교.

(나) 결정성 PEDOT:PSS (Crys-P) 와 기존 연구에서의 PEDOT:PSS (EG-P, 비교군) 기반 논리소자의 전압별 상호컨덕턴스값 비교.

결정화된 PEDOT:PSS의 높은 전기전도성과 수용액내 높은 전기화학 반응성으로 인해, 기존의 논리소자에 비해 약 7배 높은 성능을 보임을 확인 할 수 있다.



(그림3)

(가, 나) 기존 PEDOT:PSS (EG-P) 및 결정화된 PEDOT:PSS (Crys-P) 기반 논리소자의 장기간 물 속 구동 시 성능 저하 등고선 선도.

(다) 기존 PEDOT:PSS와 결정화된 PEDOT:PSS의 오토클레이브 멸균 처리 전후의 출력곡선 비교.

기존의 PEDOT:PSS기반 논리소자가 장기간 구동 시 성능이 급격하게 저하되는 것과 비교하여, 결정화된 PEDOT:PSS 논리소자는 최대 21일 이후까지 눈에 띄는 성능의 저하가 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. (등고선 선도에서 빨간색에서 파란색으로 색깔이 변화할수록 성능의 저하를 나타냄.) 기존의 PEDOT:PSS는 이전에 보고된 다른 플라스틱 논리소자와 마찬가지로 고온고압의 환경을 요구하는 오토클레이브 멸균 처리 이후 구동이 불가능해 지는 것에 반해, 결정화된 PEDOT:PSS 논리소자는 성능의 저하가 거의 없음을 출력곡선을 통해 확인할 수 있다.

3 연구 이야기

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

우리 연구실은 미래 IoT 기기 및 신경보철 개발을 목적으로 생체조직과 전자소자를 연결할 수 있는 차세대 유-무기 인터페이스 소자 개발을 위해, 현 기술의 문제점을 해결하고 높은 성능을 확보하는 연구를 진행하고 있다. 유기생체전자소자 분야는 그 유망성에 비해 몇몇 연구 그룹이 대부분의 연구를 선도하고 있는 실정으로, 학계 진입장벽이 높아 접근이 힘들었다. 그러던 중 2014년 이광희 교수님께서 2014년 발표했던 고전도도 결정성 PEDOT:PSS 논문의 미세구조-조성에 따른 전기전도도 결과에 영감을 받아, 전도성 고분자의 결정화에 따른 수계 구동 소자의 연구를 시작하게 되었다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

초기 연구진행과정에서는 주로 PEDOT:PSS의 미세구조-조성변화에 따른 전기화학적 정전용량 분석 및 전기전도도 분석, 전기화학소자의 성능적 측면을 중점적으로 연구를 진행하였다. 그러던 중 높은 결정성 및 낮은 PEDOT 대비 PSS비율에서 영감을 얻어, 소자 구동 안정성 평가를 진행하였다. 이 과정에서 기존의 연구들에서 수계 구동 안정성평가를 진행했던 사례가 매우 적은 점에 의문을 가진 우리 연구팀은 인체삽입형 소자의 실사용 및 구동 환경을 가정함으로써 수용액 침수 시간과 고온고압멸균 처리에 따른 구동평가를 실시하게 되었다. 이를 통해, 기존의 연구들에서 보여주지 않았던 기존 소자의 불완전한 구동 안정성을 확인할 수 있었으며, 이 연구에서 제시한 전도성 고분자 결정화법이 이 문제를 해결 할 수 있음을 증명하였다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

이 연구에서 수행했던 구동안정성 평가와 전도성 고분자의 팽윤현상 측정등은 기존의 연구에서는 보인 적이 거의 없는 결과이다. 따라서 실질적인 의미를 지닌 결과를 도출하기 위해 우리 연구진은 실험 조건의 설정에서부터 유사 사례 분석 및 논리적 검증을 통해 실험을 진행함으로써 해결하였다. 특히 전도성 고분자 필름의 팽윤현상의 측정은 필름의 무게 및 두께가 매우 작아 기존의 질량 및 부피측정법으로는 실험이 불가능하여, 물속 측정이 가능한 원자힘현미경 (AFM (Atomic force microscope))를 통해 정확한 물속 팽윤현상에 대해 확인할 수 있었다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

이 연구는 소재접근성 및 전기적 안정성이 뛰어나 기존의 유기생체전자소자연구에서 주로 사용하는 PEDOT:PSS 전도성 고분자를 간단한 용매개결정화법으로 결정화 시키고, 이를 통해 수용액 구동 전자소자의 성능 및 구동 안정성을 동시에 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 새로운 화학구조를 지닌 전도성고분자의 개발을 통해 소자의 성능 및 안정성을 향상시키는 연구가 주를 이루는 현재의 연구 동향을 볼 때, 기존의 전도성고분자의 구조 및 조성적 특성역시 성능 변화에 큰 역할을 할 수 있음을 시사하는 결과이다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

이 연구를 통해 개발한 고성능, 고안정성 생체전자소자는 높은 신호증폭률과 구동안정성, 생체적합성으로 인해 가깝게는 인체 내 생체 분자의 실시간 탐지에 사용할 수 있을 것으로 예상되며, 나아가서는 신경 및 심장의 전기신호의 측정을 위한 기기로 폭넓게 활용이 가능할 것으로 보인다. 또한 재료적 측면에서, PEDOT:PSS의 소재 접근성 및 이 연구를 통해 확인한 결정화된 PEDOT:PSS의 수용액 안정성을 고려하면 결정화된 PEDOT:PSS는 연료전지 등의 수계 구동 전기화학장비의 활성 전극으로도 활발히 사용할 수 있을 것이라고 기대한다.