

보도일시	즉시 보도
	2024. 7. 16.(화)
문의	연구책임자 고승환 교수(02-880-7114) / 교신저자
	서울대학교 기계공학부, 원대연 박사(02-880-1681) / 제1저자

■ 제목/부제

제목	국문	‘뉴럴링크’를 뛰어넘을 차세대 인체삽입형 뇌-컴퓨터 인터페이스 생체 전극 개발
부제	국문	일론 머스크의 ‘뉴럴링크’의 문제점을 해결할 수 있는 차세대 인체삽입형 전도성 하이드로젤 초미세 패터닝 기술 개발

■ 요약

연구 필요성	<p>일론머스크의 뉴럴링크가 올해 사람을 대상으로 한 임상실험에 돌입했으며, 환자의 생각만으로 컴퓨터의 마우스를 움직이는데 성공했다. 하지만 이를 위해 삽입되는 뇌-컴퓨터 연결소자는 생체조직과 달리 단단하고 건조해 장기간 삽입 시 면역반응에 의한 부작용이 우려된다. 이에 따라 전세계에서 생체조직과 같이 부드러운 하이드로젤을 이용한 생체삽입소자를 활발히 개발하고 있다. 하지만 작은 뇌세포에서 나오는 신호를 정밀하게 읽어낼 수 있도록 이를 미세 패터닝하는 기술은 개발이 까다로운 실정이다.</p>
연구성과/ 기대효과	<p>서울대 기계공학부 고승환 교수와 카이스트 김택수 교수 공동연구팀은 젤리처럼 부드러운 전도성 하이드로젤을 머리카락보다 20배 얇은 두께로 패터닝 할 수 있는 기술을 개발하였다. 전도성 고분자와 투명한 기관 사이에 레이저를 조사하면 계면에 집중된 광열 에너지를 통해 기관과 전도성 고분자 사이에 강한 결합이 만들어지게 되며 원하는 부분만 패턴으로 만들 수 있게 된다.</p> <p>본 연구를 통해 개발된 부드러운 생체삽입 소자는 기관과의 강한 결합력을 지니고 있어, 오랜시간동안 생체내에서 안정적으로 구동될 수 있어 뉴럴링크가 갖고 있는 안정성에 대한 문제점을 해결할 새로운 방안으로 기대된다.</p>
Abstract (영문)	<p><i>Prof. Ko from SNU and Prof Kim from KAIST has succeeded in developing soft hydrogel microelectrodes with greatly enhanced wet stability and adhesion. It allows extremely stable communication of neural interfaces and soft tissues in long term periods for various human-machine interface applications.</i></p>

Conductive hydrogels can be used to make electrodes that interface with biological tissues due to their similar mechanical properties and high electrical conductivity in physiological environments. The electrical and mechanical properties of conductive hydrogels have improved in recent years, but they still suffer from poor durability and reliability, particularly in wet environments. Here we show that high-stability conductive hydrogels can be fabricated and adhered to various substrates using laser-induced phase separation and interface structures. With this approach, conducting polymers can be selectively transformed into conductive hydrogels with wet conductivities of 101.4 S cm^{-1} and patterned with a spatial resolution down to $5\text{ }\mu\text{m}$. The conductive hydrogels exhibit high robustness, maintaining their electrochemical properties after 1 h of ultrasonication and 8 months of storage in water. They also exhibit peel and lap-shear strength in wet conditions of 64.4 N m^{-1} and 62.1 kPa , respectively. We used the conductive hydrogels to make microelectrode arrays that can stably record electrophysiological signals over 3 weeks in rat brains and hearts. The hydrogel electrodes can also be reused through intensive ultrasonication cleaning due to their durability.

Journal Link

<https://www.nature.com/articles/s41928-024-01161-9>

■ 본문

□ 문단 1

- 젤리처럼 부드러운 전도성 하이드로젤*로 만든 미래형 인체삽입형 뇌-컴퓨터 인터페이스 생체 전극이 개발됐다.
- 서울대학교 고승환 교수 카이스트 김택수 교수 공동연구팀 (공동 제1저자 원대연 박사, 공동 제1저자 김형준 박사)은 머리카락두께의 20배 수준의 **얇고 부드러운 하이드로젤**을 전기가 잘 통하게 패터닝 할 수 있는 기술을 개발했다.

□ 문단 2

- 올해 일론 머스크의 뉴럴링크가 **사람을 대상으로** 임상실험에 돌입했으며, **환자의 생각만으로 컴퓨터의 마우스를 움직이는데** 성공했다.
- 하지만 이를 위해 뇌에 삽입되는 뇌-컴퓨터 연결소자는 생체조직과 **달리 단단하고, 건조해 장기간 체내 삽입 시 부작용이** 우려되며, 최근 첫 사람대상 임상 시험 중 면역 방어 때문에 문제가 생겼었고, 뉴럴링크의 실험에 사용된 원숭이들이 2022년 집단 폐사한 사건이 잘 알려져 있다.
- 이를 해결하기 위해 전 세계에서 생체조직과 같이 부드러운 젤리타입의 전도성 하이드로젤을 이용한 생체 삽입소자를 앞다퉈 개발하고 있다. 다만, 작은 뇌세포에서 나오는 신호를 정밀하게 읽어내기 위해서는 하이드로젤을 미세 패터닝할 수 있어야 하나 **호물호물한 성질의 하이드로젤을 수 마이크로미터로 패터닝하는 기술은** 개발이 어려운 실정이다.

□ 연구결과

- 이에 본 연구팀은 전기전도성 고분자**를 기반으로 한 호물호물한 하이드로젤을 머리카락의 20배 수준의 두께로 패터닝 함과 동시에 세계 최고 수준의 전기전도도를 확보할 수 있는 공정을 개발하였다.
- 연구팀은 전도성 고분자와 투명한 기판의 계면에 레이저 광열에너지를 집중시킴으로써 두 소재 사이의 강한 결합을 만들었고, 레이저에 의한 전도성 고분자의 상 분리***를 통해 부드러운 하이드로젤로의 변성을 유도했다.
- 레이저의 높은 해상도와 자유도를 통해 원하는 위치에만 기판과의 강한 접합을 유도할 수 있으며 초미세 패터닝이 가능할 뿐만 아니라 **축축한 생리학적 환경에서 손으로 비비고 잡아당기고, 구기더라도 패턴이 안정적으로 남아있게 됨**을 증명했다.
- 개발된 공정으로 개발한 하이드로젤 뇌-컴퓨터 인터페이스 생체 전극은 쥐의 머리에 삽입되어 **3주 동안 안정적으로 뇌 신호를 컴퓨터로 전송**시키는데 성공했을뿐만 아니라 강한 접합특성으로 인해 한번 사용한 전극을 강력한 초음파 세척기로 세정하더라도 안정적으로 재사용까지 할 수 있었다.
- 서울대 고승환 교수는 이번 연구성과에 대해 **“일론 머스크의 뉴럴링크의 안정성 문제를 해결하**

고 더 나아가 뛰어넘을수 있는 차세대 인체 삽입형 생체 전극의 새로운 패러다임 제시하는 것” 이라고 설명했다.

○ 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 중견연구 사업의 지원으로 수행된 이번 연구 성과는 재료 분야 국제 저명학술지 ‘네이처 일렉트로닉스(Nature Electronics)’ 에 6월 28일(금) 게재되었다.

□ 용어설명

*하이드로젤 : 물을 함유한 상태로 형체를 유지할 수 있는 고분자 소재를 범용적으로 일컫는말.

**전도성 고분자 : 고분자 사슬을 따라 전하가 흐를 수 있는 고분자.

***상 분리 : 두 종류의 고분자가 고르게 분포되어 있던 전도성 고분자가 두 물질로 서로 크게 분리되는 현상.

※ 연구 이야기(선택, 추가하고 싶은 내용이 있을 경우)

□ 연구를 시작한 계기

○ 레이저를 통해 전도성 고분자의 상 (phase)를 제어하는 연구를 꾸준히 수행해왔습니다. 2022년도에 세계 최초로 전도성 고분자에 레이저를 조사하게 되면 상 분리가 일어난다는 현상을 발견해 Science Advances에 연구결과를 발표한 바 있습니다. 하지만 기존의 공정 조건으로는, 젖은 상태에서 강한 기계적 안정성과 접합력을 보유할 순 없었습니다. 그러던 와중에 단순하게 샘플을 거꾸로 뒤집어 투명한 기판 쪽으로 쬐보면 계면에서 접합이 생기지 않을까라는 아이디어가 떠올랐고 아이디어가 맞아 떨어졌습니다.

□ 연구과정 중 어려웠던 점

- 젖은 상태의 하이드로젤의 기계적, 전기적, 접합 물성을 정밀하게 계측하는 것이 까다로웠습니다. 대부분의 측정장비들은 건조한 시편들을 위해 상용화되어 있기에 정밀한 측정을 위해서는 직접 계측 설비부터 짜야했고 신뢰성이 확보될 때 까지 많은 샘플들을 소진해야 했습니다.
- 두번째로 어려웠던 점은 강한 접합이 만들어지는 메커니즘에 대한 이해였습니다. 하이드로젤과 기판 사이에 어떠한 결합이 생기는 것은 파악하겠으나 이를 과학적으로 증명하는 것이 큰 미션이었습니다. 계면에 대한 분석기법과 이론적 시뮬레이션까지 돌러가며 복합적인 메커니즘들을 설명할 수 있었습니다.

□ 이전 연구와 차별화 포인트

○ 이번 연구의 성과는 세계 최초로 전도성 하이드로젤을 고 전도성, 고 접합성, 그리고 고 해상도로 하나의 공정을 통해 구현한 데 있습니다. 우리가 달성한 5 마이크론 미터의 높은 해상도는 수십번의 반도체 공정으로도 간신히 구현가능하지만 레이저 공정은 한번의 스캐닝만으로 손쉽게 패터닝이 가능

합니다. 또한 기판과의 접합형성을 위해 다양한 표면 처리기법들이 사용되지만 처리과정이 복잡하거나 특정 기판에 국한되어 있어 사용이 제한적입니다. 우리 공정은 앞서 말했듯이 단순히 레이저 스캐닝만으로 고접합성이 만들어지게 되죠. 마지막으로 이렇게 제작된 하이드로젤 패턴이 세계 최고 수준의 전기전도성을 갖습니다. 이는 절연성 하이드로젤의 투입없이 순수하게 전도성 고분자만으로 하이드로젤을 형성했기 때문입니다.

○ 생체 삽입 소자가 적용되는 다양한 체내 장기는 사람마다 크기가 다르고 모양이 달라 맞춤형 제작이 필수적입니다. 이번 연구의 성과는 빠른 프로토타이핑과 우수한 소자성능을 통해 앞으로 펼쳐질 ‘뉴럴링크’와 같은 인체삽입형 뇌-컴퓨터 인터페이스 생체 전극 개발의 새로운 패러다임을 제시하여 현재 ‘뉴럴링크’의 문제점과 한계를 극복한 차세대 뇌-컴퓨터 인터페이스를 가능케 할것으로 기대됩니다.