

★ 2026년 4월 7일(화) 조간 (온라인 4.6.(월), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

보도자료	
청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF	<대외홍보실> 김윤숙 팀장, 고흥숙 연구원 ☎ 042-869-6119

<자료문의> 성균관대학교 화학공학과 박성준 교수(031-290-7349)

액체금속으로 빛은 '강철 수화젤 전해질' 개발 - 저온에서도 성능 저하 없이 작동하는 차세대 에너지 저장소자 구현 -

- 영하 20도의 혹한과 9배 이상의 급격한 변형에도 성능 저하 없이 작동하는 전해질*이 개발됐다.

* 전해질 : 이온 결합의 수용액 상태에서 전류가 흐르는 물질

- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 성균관대학교 박성준 교수 연구팀이 액체금속 입자를 개시제*로 활용해 초고신축·항동결 수화젤 전해질**을 개발, 극한 환경에서도 안정적으로 작동하는 에너지 저장기기 구현 가능성을 제시했다고 밝혔다.

* 개시제 : 액체 상태의 원료들이 단단하거나 질긴 고체(고분자)로 변하도록 첫 단추를 끼워주는 물질

** 수화젤 전해질 : 기존 액체 전해질(전기 통로)이나 고체 전해질과 달리 물을 가득 머금은 젤리 형태의 전해질

- 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 중견연구 및 나노·소재기술개발사업의 지원을 받아 수행됐으며, 국제 학술지 ‘나노 마이크로 레터스(Nano-Micro Letters)’에 3월 13일 온라인 게재되었다.

- 최근 웨어러블 전자기기의 발전과 함께, 높은 유연성과 안정성을 동시에 갖는 에너지 저장 기술에 대한 수요가 증가하고 있다.

- 에너지 저장기기에서 전해질은 전하를 나르는 통로 역할을 하는데, 이 통로가 얼지 않고(항동결) 고무줄처럼 늘어나며(초고신축) 전기를 잘 전달(이온 전도성)해야만 차세대 에너지 저장소자를

구현해 낼 수 있다.

- 그러나 기존 수화젤 전해질은 높은 수분 함량으로 인해 기계적 강도가 낮고, 저온 환경에서 쉽게 동결되어 성능이 저하되는 한계가 있다.

- 연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 액체금속 입자를 이용한 새로운 중합 전략을 제안했다.

- 수화젤 전해질을 사용하려면 외부 열이나 자외선과 같은 추가적인 에너지 공급이 필요하지만, 액체금속을 활용하면 별도의 장비나 에너지 없이도 균일한 고분자 네트워크를 형성할 수 있다.

- 여기에 소수성 상호작용*을 도입해 고분자 사슬 간 물리적 가교를 형성, 외부 변형 시 가역적으로 결합이 끊어졌다가 재형성되는 메커니즘을 구현했다. 이러한 구조를 통해 수화젤은 약 900% 이상의 파단신율**과 동시에 우수한 기계적 강도를 유지할 수 있음을 확인했다.

* 소수성 상호작용 : 수용액 속에서 물과 수소결합을 하지 않는 소수성 물질들이 모여 소수성 효과를 일으키는 현상

** 파단신율 : 재료의 끈질긴 정도(연성)를 나타내는 핵심 지표. 재료가 끊어지기 직전까지 원래 길이에 비해 얼마나 늘어났는가를 백분율로 표시한 값

- 더불어 염화리튬을 도입해 물 분자 간 수소결합을 효과적으로 억제해 수화젤 내부의 동결점을 낮추는 전략을 적용했다. 그 결과 영하 20도 조건에서도 전도성과 유연성이 동시에 유지되는 항동결 특성을 구현하는 것을 확인할 수 있었다.

- 이를 적용한 슈퍼커패시터는 45,000회 충·방전 이후에도 98%의 성능을 유지하는 등 우수한 안정성을 입증했다.

- 박성준 교수는 “이번 연구는 액체금속을 활용한 새로운 수화젤 전해질 설계 전략을 제시했다는 점에서 의미가 있다”며, “향후 웨어러블 전자기기 및 차세대 유연 에너지 저장장치 개발에 활용될 것으로 기대된다”고 밝혔다.

주요내용 설명

<작성 : 성균관대학교 박성준 교수>

논문명	Ultra-Stretchable Anti-Freezing Hydrogel Electrolytes Cross-Linked by Liquid Metal Particle Initiators Toward Soft Energy Storage Devices
저널명	Nano-Micro Letters
키워드	Liquid metal nanoparticle initiator (액체금속 나노입자 개시제), Anti-freezing hydrogel (항동결 수화젤), Wearable device (웨어러블 소자), Supercapacitor (슈퍼커패시터)
DOI	https://doi.org/10.1007/s40820-026-02126-7
저자	박성준 교수(교신저자/성균관대학교), Qingshi Zhang 박사과정(제1저자/성균관대학교), Priyanuj Bhuyan 박사(성균관대학교), Que Thi Nguyen 박사(성균관대학교)...

1. 연구의 필요성

- 웨어러블 전자기기와 유연 에너지 저장소자에 대한 수요가 빠르게 증가하면서, 변형에 잘 견디고 안전하게 작동할 수 있는 전해질의 중요성이 더욱 커지고 있다.
- 수화젤 전해질은 높은 수분 함량과 3차원 고분자 네트워크 구조 덕분에 우수한 유연성, 이온전도도, 누액 저감 특성을 가져 차세대 유연 에너지 저장소자의 유력한 후보로 평가받고 있다. 그러나 기존 수화젤 전해질은 실제 환경에서 물의 동결이나 탈수에 취약해 저온 조건에서 이온 이동과 전하 전달이 저하되고, 동시에 기계적 유연성도 약화되는 한계가 있다.
- 최근 관련 리뷰들에서도 유연 에너지 저장소자의 실용화를 위해서는 항동결성뿐 아니라 기계적 강도, 신축성, 장기 안정성을 동시에 확보한 환경 적응형 수화젤 전해질의 개발이 핵심 과제로 제시되고 있다.
- 본 연구 역시 이러한 문제의식에서 출발하여, 높은 신축성과 기계적 견고성, 저온 안정성을 동시에 갖는 수화젤 전해질 설계의 필요성에 주목하였다.

2. 연구내용

- 연구진은 액체금속 나노입자를 개시제로 활용하여 외부 열이나 자외선과 같은 추가적인 에너지 공급 없이도 라디칼 중합이 가능한 수화젤 전해질을 개발하였다. 이를 통해 기존의 복잡한 개시 공정을 단순화할 수 있으며, 균일한 고분자 네트워크를 형성할 수 있음을 확인하였다.
- 또한, 소수성 상호작용(SMA)을 도입하여 고분자 사슬 간 물리적 가교를 형성하고, 외부 변형 시 가역적으로 결합이 끊어졌다가 재형성되는 에너지 소산 메커니즘을 구현하였다. 이러한 구조를 통해 수화젤은 높은 파단 신율과 동시에 우수한 기계적 강도를 유지할 수 있음을 확인하였다.
- 더불어 염화리튬을 도입하여 물 분자 간 수소결합을 효과적으로 억제하고, 수화젤 내부의 동결점을 낮추는 전략을 적용하였다. 그 결과 저온 환경에서도 이온 이동이 원활하게 유지되며, -20°C 조건에서도 전도성과 유연성이 동시에 유지되는 항동결 특성을 구현하였다.
- 해당 수화젤을 전해질로 적용한 슈퍼커패시터를 제작하여 전기화학적 성능을 평가하였다. 그 결과 높은 정전용량과 장기 사이클 안정성을 나타냈으며, 반복적인 충·방전 과정에서도 성능 저하 없이 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다.

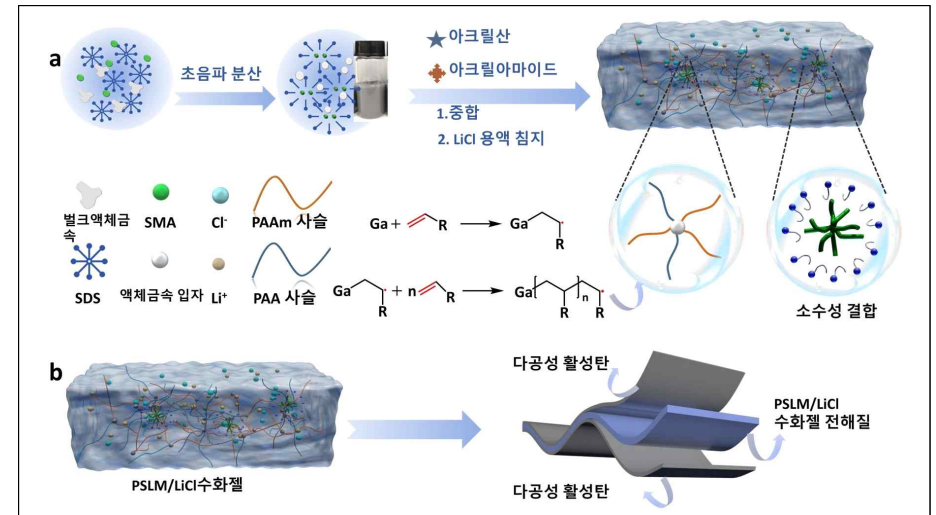
3. 연구성과/기대효과

- 이번 연구는 액체금속 개시 중합과 소수성 결합을 동시에 활용하여 수화젤 전해질의 기계적 강도와 항동결 특성을 동시에 향상시켰다는 점에서 학술적으로 큰 의미를 지닌다. 특히 기존 수화젤 전해질의 한계를 극복할 수 있는 새로운 설계 전략을 제시하였다.
- 저온 환경에서도 안정적인 이온 전도성과 기계적 유연성을 유지할 수 있게 됨에 따라, 향후 웨어러블 전자기기, 유연 에너지 저장장치, 소프트 센서 등 다양한 응용 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 반복적인

변형 조건에서도 안정적으로 작동할 수 있어 실용화 가능성을 높였다.

- 또한, 본 기술은 다양한 고분자 시스템 및 이온 전해질 설계에 적용할 수 있으며, 향후 다양한 기능성 소재와의 융합을 통해 극한 환경에서도 안정적으로 작동하는 차세대 유연 전자소자 개발로 확장될 수 있다.

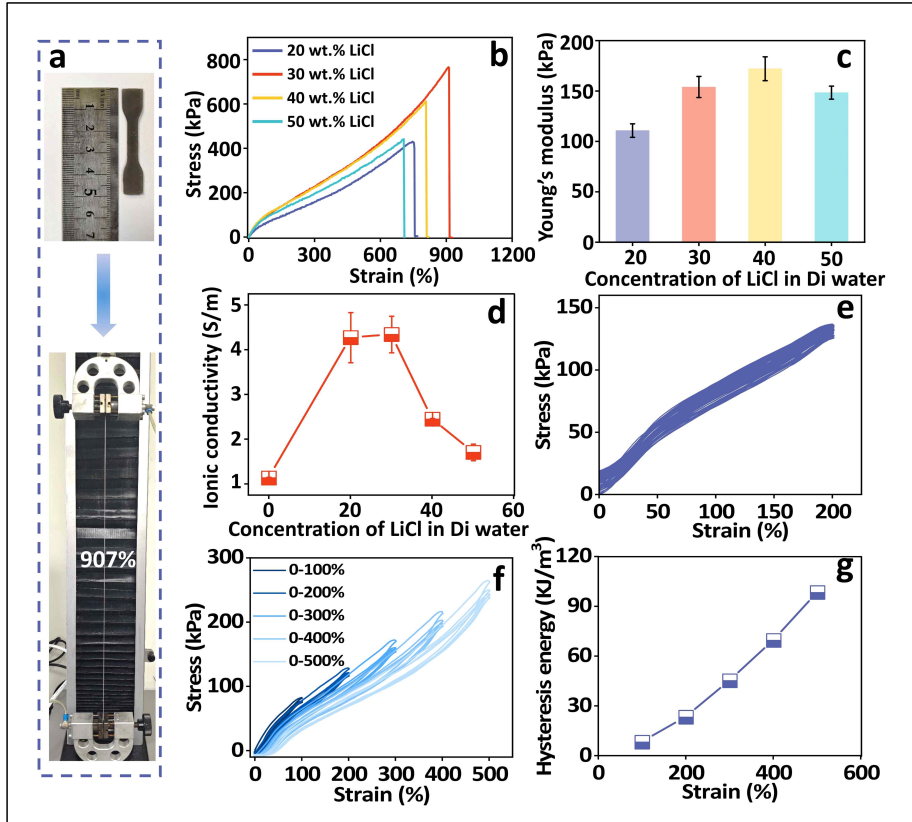
그림 설명



(그림1) 액체금속 기반 수화젤 전해질의 제조 및 소자 구조 모식도

(그림 1, a). 액체금속 입자를 초음파 분산을 통해 형성하고, 이를 개시제로 활용하여 아크릴아마이드(AAm)와 아크릴산(AA)의 라디칼 중합을 유도하는 수화젤 제조 과정을 나타냄. 중합 과정에서 도입된 SMA는 소수성 결합을 형성하여 고분자 네트워크 내 물리적 가교 역할을 수행하고, LiCl 용액 침지를 통해 수소결합을 억제함으로써 항동결 특성을 부여함.

(그림 1, b). 제조된 PSLM/LiCl 수화젤 전해질을 다공성 활성탄 전극 사이에 삽입하여 슈퍼커패시터를 구성한 모식도. 이 구조에서 PSLM/LiCl 수화젤 전해질은 내부의 연속적인 이온 전달 경로를 바탕으로 빠른 이온 이동을 가능하게 하며, 이에 따라 소자가 유연한 변형 조건에서도 안정적인 에너지 저장 성능을 나타낼 수 있음을 보여줌.



(그림2) 수화젤 전해질의 기계적 및 전기화학적 특성

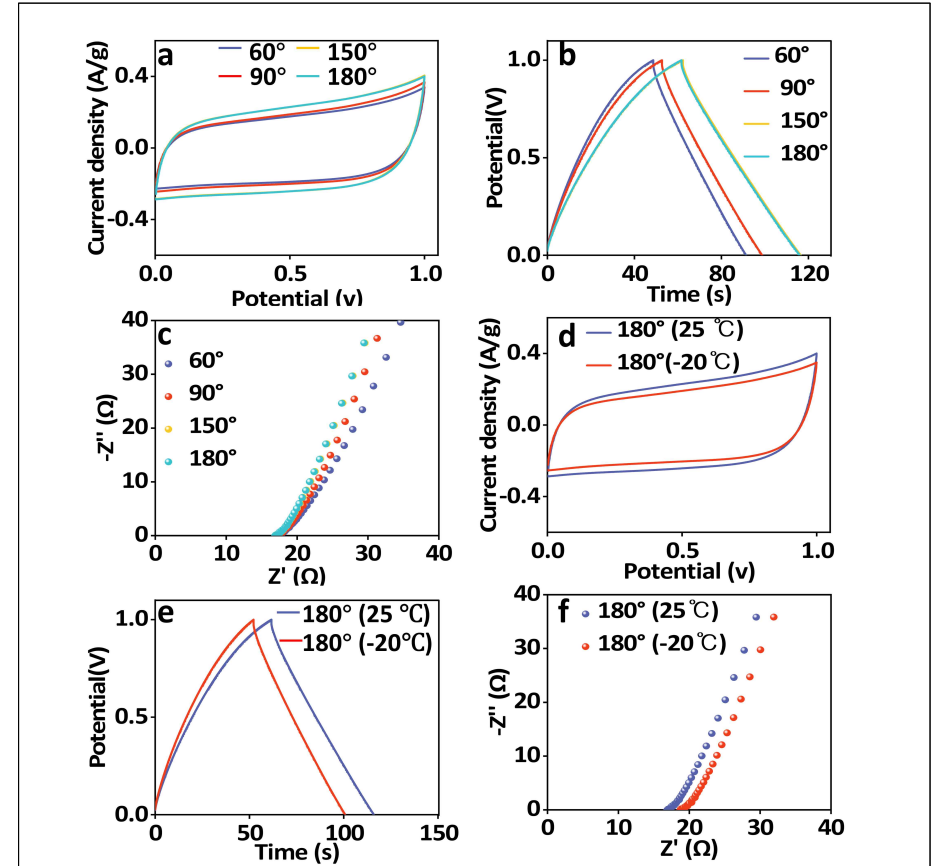
(그림 2, a). 수화젤 시편의 실제 모습과 인장 시험 결과를 나타냄. 약 907%의 최대 신장률을 보임.

(그림 2, b). LiCl 농도(20, 30, 40, 50 wt.%)에 따른 응력-변형률 곡선을 나타냄.

(그림 2, c). LiCl 농도에 따른 영률(Young's modulus)을 나타냄.

(그림 2, d). LiCl 농도에 따른 이온전도도(ionic conductivity)를 나타냄.

(그림 2, e~g). 반복적인 인장-이완 과정에서의 응력-변형률 곡선과 히스테리시스 거동을 나타냄. 변형률에 따른 히스테리시스 에너지 변화를 함께 제시함.



(그림3) 다양한 굽힘 조건 및 온도 환경에서의 슈퍼커패시터 전기화학적 특성

(그림 3, a). 다양한 굽힘 각도에서 측정된 슈퍼커패시터의 CV 곡선을 나타냄.

(그림 3, b). 다양한 굽힘 각도에서 측정된 슈퍼커패시터의 GCD 곡선을 나타냄.

(그림 3, c). 다양한 굽힘 각도에서 측정된 슈퍼커패시터의 EIS 을 나타냄.

(그림3, d~f). 25°C 및 -20°C에서 저장 후, 180° 굽힘 상태에서 측정된 슈퍼커패시터의 CV, GCD 및 EIS 결과를 나타냄.

연구 이야기

<작성 : 성균관대학교 박성준 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

최근 웨어러블 전자기기나 유연 전자소자가 빠르게 발전하면서, 다양한 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 에너지 저장 기술의 중요성이 점점 커지고 있습니다. 하지만 실제 환경에서는 단순한 실험 조건과 달리, 온도 변화나 반복적인 변형과 같은 외부 요인이 동시에 작용하기 때문에 기존의 전해질 소재로는 이러한 조건을 모두 만족시키기 어려운 경우가 많습니다. 특히 수화젤 전해질은 높은 유연성과 이온전도도를 갖는 장점으로 많은 연구가 진행되고 있지만, 저온 환경에서 쉽게 얼어버리거나 기계적 강도가 부족해 변형 시 성능이 저하되는 문제가 존재합니다. 예를 들어 겨울철 야외에서 전자기기를 사용할 경우 배터리 성능이 급격히 떨어지는 경험을 한 적이 있을 텐데, 이러한 현상은 내부의 물이 얼면서 이온 이동이 제한되기 때문에 발생합니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존에는 유기 용매를 도입하거나 다양한 첨가제를 사용하는 방법이 제안되었지만, 이 경우에도 기계적 특성과 전도성을 동시에 만족시키기 어려운 한계가 있었습니다. 따라서 보다 간단하면서도 효과적인 방법으로, 기계적 강도와 신축성, 그리고 항동결 특성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 전해질 설계 전략이 필요하다고 판단하였습니다. 이에 본 연구에서는 액체금속 입자를 개시제로 활용한 새로운 수화젤 전해질 시스템을 제안하고, 소수성 결합과 이온 상호작용을 동시에 활용하여 다양한 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 에너지 저장소자를 구현하고자 연구를 시작하게 되었습니다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

최근 웨어러블 전자기기 및 유연 에너지 저장소자에 대한 관심이 급증하게 된 이유는 다양한 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 차세대 전원 시스템의 필요성이 크게 증가하였기 때문입니다. 기존 액체 전해질은 높은 이온전도도를 가지는 장점이 있지만 누액 및 안정성 문제로 인해 유연 소자에 적용하는 데 한계가 있으며, 고체 전해질은 기계적 유연성과 이온 이동성이 부족한 문제가 존재합니다. 또한, 수화젤 전해질은 우수한 유연성과 전도성을 가지지만, 낮은 기계적 강도와 저온에서의 동결 현상으로 인해 실제 응용에 제약이 있었습니다. 저희는 이러한 한계를 해결하기 위해 액체금속 입자를 개시제로 활용한 수화젤 시스템에 주목하였으며, 소수성 상호작용을 도입하여 고분자 네트워크를 강화하고 LiCl을 이용한 항동결 특성을 동시에 구현하였습니다. 이를 통해 높은 파단 신율과 우수한 기계적 강도를 동시에 확보하고, 저온 환경에서도 안정적인 이온 전달이 가능한 수화젤 전해질을 개발하였으며, 이를 기반으로 유연한 슈퍼커패시터를 제작하여 다양한 조건에서도 안정적인 에너지 저장 성능을 구현하였습니다.

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

수화젤의 기계적 강도와 유연성을 동시에 확보하는 것이 가장 큰 어려움이었습니다. 일반적으로 가교 밀도를 높이면 수화젤이 단단해지는 대신 쉽게 깨지거나 신축성이 저하되는 문제가 발생하였습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 가역적인 소수성 결합을 도입하여 외부 변형 시 결합이 일시적으로 끊어졌다가 다시 형성되는 구조를 설계하였습니다. 이를 통해 에너지를 효과적으로 분산시키면서도 전체적인 네트워크 구조를 유지할 수 있었습니다. 또한 저온 환경에서도 성능을 유지할 수 있도록 LiCl을 도입하여 수소결합을 억제하고, 이온 이동이 가능한 상태를 유지하도록 설계하였습니다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

기존 수화젤 전해질 연구에서는 액체금속 입자를 주로 단순한 기능성 필러로 활용하거나, 별도의 열 또는 광 개시제를 통해 중합을 진행하는 경우가 많았습니다. 또한 기계적 강도 향상을 위해 화학적 가교를 도입할 경우, 신축성이 저하되는 문제가 발생하였습니다. 이번 연구에서는 액체금속 나노입자를 중합 개시제로 직접 활용하여, 외부 에너지 없이도 빠른 라디칼 중합이 가능하도록 설계하였습니다. 동시에 SMA를 도입하여 소수성 결합 기반의 물리적 가교 네트워크를 형성함으로써, 높은 가교 밀도를 유지하면서도 신축성을 저해하지 않는 구조를 구현하였습니다. 또한 LiCl 도입을 통해 수화젤 내부의 자유수(free water)를 효과적으로 억제하고, 저온에서도 이온 이동이 유지되는 환경을 조성하였습니다. 이를 통해 기존 연구에서 동시에 달성하기 어려웠던 고신축성, 높은 기계적 강도, 항동결 특성을 하나의 시스템에서 구현하였다는 점에서 차별성이 있습니다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

본 연구에서 개발된 수화젤 전해질은 높은 신축성과 항동결 특성을 동시에 갖고 있어, 웨어러블 전자기기, 유연 에너지 저장장치, 소프트 센서 등 다양한 분야에 적용될 수 있습니다. 특히 저온 환경에서도 안정적인 이온 전도성을 유지할 수 있기 때문에, 야외 환경이나 극한 조건에서 사용되는 전자소자에 활용 가능성이 있습니다. 또한 유연한 구조에서도 안정적으로 작동할 수 있어, 인체 부착형 디바이스나 변형이 반복되는 시스템에서도 적용이 기대됩니다. 다만 실용화를 위해서는 장기간 사용 시의 안정성 검증과 대면적 공정에서의 재현성 확보가 필요하며, 다양한 전극 소재 및 실제 디바이스 환경과의 호환성을 추가적으로 평가할 필요가 있습니다.