

유체 다이오드 멤브레인을 이용한 효율적인 태양열 기반 담수화 및 전기 생산 디바이스 개발

태양광 기반 증발식 담수화는 태양 에너지를 이용해 물의 표면에서 선택적으로 증발을 유도하고 생성된 수증기를 응축해 담수를 얻는 기술로 저에너지·저비용·분산형 담수화가 가능하다는 점에서 각광받고 있다. 다양한 형태의 멤브레인과 태양광 흡수층을 물-공기 계면에 배치한 형태로 주로 개발이 이루어지고 있다. 지속적인 물 공급을 위해서는 높은 친수성과

개방형 구조가 요구되며, 동시에 증발 표면의 열이 물속으로 전달되지 않도록 하는 우수한 열 차단 성능이 필요하다. 또한 장시간 운전 시 발생하는 염분 축적을 효과적으로 억제하는 문제 역시 핵심적인 기술적 과제로 남아 있다.

본 연구에서는 태양광 기반 증발식 담수화에서 주요한 기술적 한계 중 하나인 물 공급과 열 손실 사이의 근본적인 상충 문제를 해결하기 위해, 유체 다이오드 멤브레인 (fluidic diode membrane, FDM)이라는 새로운 개념의 증발형 멤브레인을 제시한다. 이 멤브레인은 한쪽은 큰 기공, 반대쪽은 작은 기공을 갖고 그 사이가 점진적으로 변화하는 비대칭

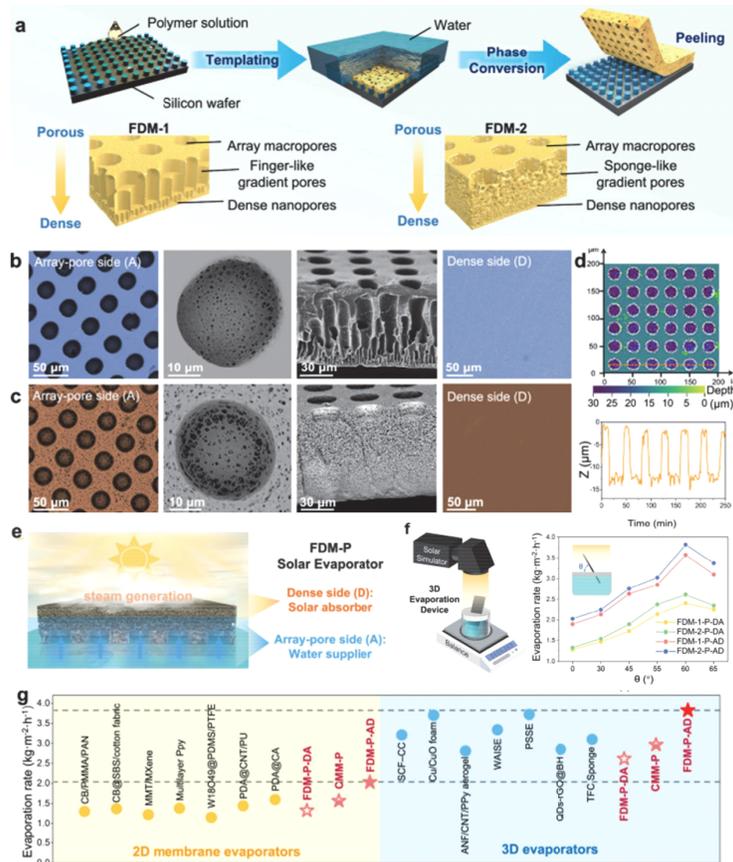


그림 1. (a) 연구에 사용된 유체 다이오드 멤브레인들 (FDM)의 제작 과정과 형태 개요도. (b) FDM-1과 (c) FDM-2의 주사전자현미경 이미지와 (d) FDM의 3차원 표면 미세형상 및 깊이 프로파일. (e, f) 태양광 기반 증발식 담수화 응용 개요도와 수면과의 각도에 따른 증발속도 그래프. (g) 기존의 보고된 다른 형태의 증발 멤브레인과 성능 비교 그래프.

구조로 설계되어, 물은 한 방향으로만 빠르게 이동하지만 반대 방향으로만 억제된다. 이로 인해 증발 표면에는 충분한 물이 공급되면서도, 열은 국소적으로 잘 보존되어 태양 에너지를 보다 효율적으로 증발에 사용할 수 있게 된다. 실험결과 표준 시험 조건(1 sun)에서 최대 증발 속도 $3.82 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 기존에 보고되었던 증발 장치 대비 뛰어난 효율을 보였으며 염분 축적에 대한 저항성과 장기 안정성도 함께 보고하였다. 뿐만 아니라 선택적 유체의 흐름을 이용하여, 증발 시 최대 1.6 V 전압의 전력을 생성할 수 있음을 보여, 담수화와 동시에 전력 생산이 가능함도 함께 보여주었다.

본 연구결과는 “Spatially regulated water-heat transport by fluidic diode membrane for efficient solar-powered desalination and electricity generation”의 제목으로 2025년 *Nature Communications*에 게재되었다.

Y. Cao et al., *Nat. Commun.*, **16**, 5050 (2025), DOI: 10.1038/s41467-025-60283-6

3D 프린팅 기반의 내오염성 자가 부상식 태양열 증발기 개발

본 연구에서는 태양광을 이용한 표면 증발식 담수화의 대표적인 한계인 염분 축적 한계를 극복하기 위해, 3D 프린팅

기술을 활용한 오염 방지형 부상식 태양광 증발기를 제안한다. 구체적으로 알루미늄 합금 기반의 오목한 계층 구조를 만들고 상단에는 광열 변환을 위한 폴리피롤(polypyrrole, PPy) 층을, 하단에는 초소수성 부식 방지 층(polytetrafluoroethylene, PTFE)을 코팅하여 제작하였다. 이를 기반으로 수증기가 상단이 아닌 하단으로 배출되게 하여 상층부의 광흡수층에 염분이 쌓이는 것을 원천적으로 차단할 뿐만 아니라, 오목한 형상을 이용한 태양열 집중을 촉진하여 에너지 손실을 최소화 한다.

개발된 증발기는 표준 시험 조건(1 sun)에서 증발 속도 $2.23 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 높은 증발 속도를 달성했으며, 구리 편이 내장된 자가 부상식 담수 수집기를 이용할 경우 저온의 해수를 천연 냉각 자원으로 활용하여 $1.23 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 담수 수집률을 보였다. 실제 홍콩 해변에서 진행된 실증 시험 결과, 정수된 물의 이온 농도는 세계보건기구(WHO)의 음용수 기준을 충족하였으며, 저비용 수분 흡수층의 교체만으로 17일 이상의 장기적인 안정성을 입증하여 실제 현장 적용 및 상용화 가능성을 보여주었다.

본 연구결과는 “Large-scale 3D printed fouling-resistant self-floating evaporator”의 제목으로 2025년 *Nature Communications*에 게재되었다.

Y. Pu et al., *Nat. Commun.*, **16**, 3677 (2025), DOI: 10.1038/s41467-025-58952-7

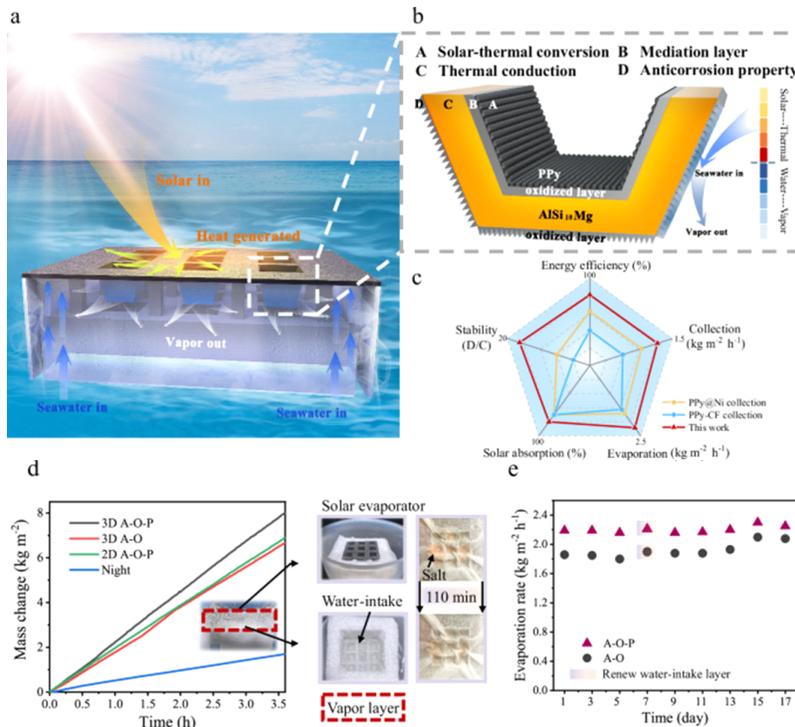


그림 2. (a) 하단 수증기 배출을 위한 부유식 증발 장치 및 (b) 3D 오목 형상 태양광 증발기 상부의 개요도. (c) 다른 폴리피롤 기반 증발 기술과의 성능 비교도. (d) 부유식 증발 장치를 사용할 때 시간에 따른 질량 변화와 (e) 이를 기반으로 계산된 증발 속도 성능.

폴리전해질 하이드로겔로 기능화된 광열 스펀지를 이용한 담수화 및 전력생성 디바이스 개발

본 연구에서는 태양광을 이용하여 담수화와 전력 생산을 동시에 수행할 수 있는 이중 기능성 태양열 증발기를 제안한다. 멜라민 스펀지에 먼저 환원된 그래핀 옥사이드를 코팅하여, 이를 통해 전기 전도성과 우수한 태양광 흡수 및 전환 기능을 부여한다. 이후 폴리스티렌 설푼산(polystyrene sulfonic acid, PSS)과 탄소 나노입자(carbon dots, CDs)가 포함된 혼합 용액을 채우고 건조 과정을 거친 후, 최종적으로 폴리비닐 알코올(PVA)을 상단 표면에 균일하게 도포하여 겔을 형성한다. 최종적으로 형성된 PSS/PVA 기반 폴리전해질 하이드로겔은 물 분자를 중간수 상태로 유도해 증발 엔탈피를 크게 낮추게 되고, 이를 통해 증발 효율을 극대화하는 동시에 염의 축적을 막게 된다. 그 결과, 표준 측정 조건(1 sun)에서 $3.53 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 우수한 증발 속도와 98.6%의 태양-증기 변환 효율을 달성하였으며, 실제 고염도 해수에서도 염이 표면에 축적되지 않고 장시간 안정적으로 작동함을 보였다.

더 나아가 이 시스템은 물 증발 과정에서 형성되는 지속적인 양성자 농도 구배를 이용해 전기를 생성할 수 있는데, 해수 내 존재하는 이온의 용존 효과로 인해 추가적으로 생성된 이온 전기장을 이용하여 더욱 향상된 출력을 구현할 수 있었다. 실제 해수 조건에서 약 0.97 V의 전압과 $172 \mu\text{A cm}^{-2}$ 의 전류 밀도를 장시간 안정적으로 제공할 수 있었으며, 여러 유닛을 직렬·병렬로 연결해 외부 보조 장치 없이도 전자계산기나 LED 등을 구동할 수 있음을 보였다. 즉, 저렴한 재료와 간단한 공정을 통해 깨끗한 물과 전기 에너지를 동시에 생산 가능한 전략을 효과적으로 제시할 수 있었다.

본 연구결과는 “Polyelectrolyte Hydrogel-Functionalized Photothermal Sponge Enables Simultaneously Continuous Solar Desalination and Electricity Generation Without Salt Accumulation”의 제목으로 2024년 *Advanced Functional Materials*에 게재되었다.

〈L. Li et al., *Adv. Funct. Mater.*, **36**, 2401171 (2024), DOI: 10.1002/adma.202401171〉

〈고종국, email: kojkg@gachon.ac.kr〉

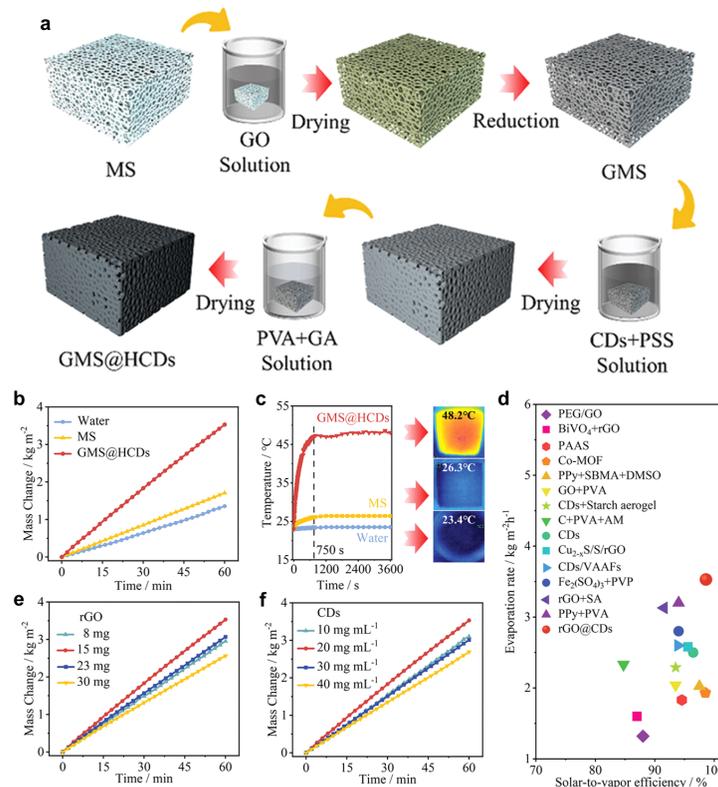


그림 3. (a) 폴리전해질 하이드로겔로 기능화된 광열 스펀지 제작 개요도. 표준 측정 조건(1 sun) 하에서 서로 다른 증발 시스템 및 대조군 (water)의 (b) 시간에 따른 수분 증발의 질량 변화와 (c) 표면 온도(왼쪽) 및 이에 대응하는 적외선 사진(오른쪽). (d) 기보고된 증발기들 간의 수분 증발 속도 및 태양광-증기 변환 효율 비교 그래프. (e) 환원된 그래핀 옥사이드(rGO) 및 (f) 탄소 나노입자(CDs) 함량이 증발 성능에 미치는 영향 측정 그래프.