

태양광-담수화용 고 내염성의 셀룰로오스 나노섬유-폴리에틸렌이민 나노복합체 기반 코팅제

바달얀 시라누쉬[#] · 구본준[#] · 이규복[†]

충남대학교 에너지과학기술대학원

(2022년 11월 2일 접수, 2022년 12월 27일 수정, 2022년 12월 28일 채택)

Cellulose Nanofiber-Polyethylenimine Nanocomposite-Based Coating Material with High Salt-Resistance for Solar-Desalination

Siranuysh Badalyan[#], Bon-Jun Ku[#], and Kyubock Lee[†]

Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University,
99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

(Received November 2, 2022; Revised December 27, 2022; Accepted December 28, 2022)

초록: 광열 재료를 기반으로 한 태양광-수증기 발생기술은 무한한 태양 에너지를 활용하여 담수화할 수 있는 유망한 기술이다. 그러나 광열재료와 물의 계면에서 국부적으로 발생하는 열에 의해서 수증기가 발생할 때 축적되는 소금은 광열재료를 코팅하여 수증기 변환 효율을 저하시키는 문제가 있다. 본 연구에서는 높은 염 저항 특성을 갖는 cellulose nanofiber(CNF)와 polyethylenimine(PEI) 나노복합체 기반의 코팅제를 개발하였다. CNF-PEI 나노복합체를 광열 특성을 갖는 탄소 펠트의 상단 표면에 코팅하여 친수성을 향상시키고 양이온화하여 표면 염 생성을 억제하도록 하였다. 다양한 양의 CNF-PEI 나노복합체 코팅에 따른 구조, 광 및 화학특성을 분석하였고, 3.5 wt% NaCl 용액을 이용한 태양광-수증기 발생 실험을 통해서 내염특성을 확인하였다. CNF-PEI 나노복합체는 여러 종류의 광열재료에 코팅이 가능하여 태양광-담수화에 다양한 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract: Solar-to-steam generation technology based on photothermal materials is a promising technology for desalination by utilizing infinite solar energy. However, salt accumulation on the photothermal materials due to steam generation by locally generated heat at the interface between photothermal material and bulk water, can decrease solar-to-steam conversion efficiency. In this study, a coating agent based on cellulose nanofiber (CNF) and polyethylenimine (PEI) nanocomposites with high salt resistance was developed. The CNF-PEI nanocomposite was coated on the top surface of the photothermal carbon felt for improving hydrophilicity and cationization to suppress the salt accumulation on the surface. Structural, optical, and chemical properties according to various amounts of coating agent (CNF-PEI nanocomposites) were analyzed, and salt resistance properties were confirmed through a solar-to-steam generation test using a 3.5 wt% NaCl solution. The CNF-PEI nanocomposites have advantage to be used as wide applications for solar-to-steam desalination due to the possibility of coating on various types of photothermal materials.

Keywords: solar-to-steam, cellulose nanofiber polyethylenimine, coating agent, salt-resistant.

서 론

최근 몇 년 동안, 태양광-수증기 발생에 의한 담수 생산은 산업 및 학계의 광범위한 관심을 받고 있다. 기존의 여과 기술은 에너지 소비가 크고 생산 비용이 비싸다는 단점을 가지고 있는 반면, 태양광-수증기 발생 시스템은 높은 에너지 변

환 효율과 더 중요하게는 깨끗하고 재생 가능한 태양광 에너지 활용 측면에서 큰 이점이 있다.¹ 효과적인 태양광-수증기 발생 시스템을 위한 광열 재료는 광 흡수-변환 특성과 태양 광으로부터 과생된 열을 국부화하는 단열 특성을 기본 메커니즘으로 한다. 이러한 표면/국부화 기화 방식은 주변 환경으로의 불가피한 열 손실 또는 물로의 열전이를 줄여 태양광-수증기 발생 변환 효율의 한계를 높이는 연구로 진행되어 왔다.

효율적인 태양광-수증기 발생을 위한 다양한 광열 물질들이 개발되었는데, 대표적으로 천연재료,²⁻⁷ 탄소계 재료,⁸⁻¹⁰ 금속성 플라즈몬 재료,¹¹⁻¹³ 반도체 재료,^{14,15} 다공성 고분자¹⁶ 등

[#]These authors equally contributed to this work.

[†]To whom correspondence should be addressed.

kyubock.lee@cnu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-3659-8748

©2023 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

이 있다. 그러나 해수가 증발하는 동안 소금 결정이 축적되면서 태양광 흡수 표면을 덮을 뿐만 아니라 물 수송 경로를 차단하여 결과적으로 태양광-수증기 발생 효율을 저하시키는 문제점이 있다.¹⁷ 이러한 문제를 극복하기 위해 지금까지 Janus 코팅,^{18,19} 초소수성 코팅,²⁰ 전하 반발 작용기 코팅²¹ 및 정렬된 채널과 큰 직경 크기의 기공을 가지는 지지체^{22,23}를 사용하는 연구가 진행되어왔다. 그러나 소금 축적 억제를 위한 내염 성능 향상은 경우에 따라 불가피하게 태양광-수증기 발생 장치의 증발 효율을 감소시켰다.^{19,21,23} 또한 특정 조건에서만 구현 가능한 내염 성능 향상법들인 경우가 많아서 태양광-수증기 발생 시스템의 실용화를 위한 효율적이고 다양한 경우에 적용이 용이하고 증발효율에 영향을 최소화한 내염 성능 향상법 개발이 여전히 필요하다.

CNF는 ~수 nm 직경을 가진 풍부하고 친환경적이며 화학적/기계적 안정성이 우수한 나노섬유로서 자가조립시 결정패턴을 이루지 않는 무정형 고분자로 빛 투과성이 90% 이상으로 좋다. 또한 친수성 표면을 갖추고 있어 물 흡수력을 유지할 수 있는 코팅 재료이다.^{24,25} 이때 높은 친수성 표면은 CNF가 물에 용해되는 문제점이 있는데 기존 연구에서는 아민 그룹을 가지는 분지형 고분자인 PEI를 혼합하여 기계적 강화를 이루었다. Zhang *et al.* 그룹은 PEI를 가교제로 활용하여 높은 비표면적과 유연성을 가지는 강화된 CNF 기반 하이드로겔을 합성하였으며, Zhao *et al.* 그룹은 PEI grafted CNF를 합성하여 수용액 상태에서 사용 가능한 약물 전달 물질로 개발하였다.^{26,27}

본 연구에서는 다양한 광열재료에 적용 가능한 CNF (cellulose nanofiber)-PEI(polyethyleneimine) 나노복합체로 이루어진 내염 강화 코팅제를 개발하였다. PEI의 -OH, -amine 작용기 사이의 정전기적 상호작용을 이룬 나노복합체는 CNF의 구조적 변형을 억제할 뿐만 아니라 친수성 작용기를 보강하여 흡수성, 물 이동성을 증가시켜 염 확산을 유도하였다. 또한 amine의 양이온 전하는 소듐 이온을 반발하여 상부 표면에 염 결정 형성을 억제하였다. 결과적으로 광열 재료의 태양광-수증기 발생 효율성을 훼손하지 않으며 내염 특성을 강화할 수 있는 간단한 코팅제를 개발하였다.

실 험

시약 및 재료. 이 연구에 사용된 모든 화학물질은 추가 정제 없이 사용하였다. 2 wt% 함유 cellulose nanofiber(CNF) 하이드로겔은 POLYCELLU Inc.(한국)에서 구입했으며, 평균 Mw가 ~25,000인 분지형 polyethylenimine(PEI)은 Sigma-Aldrich Chemical Reagent Co., Ltd.(미국)에서 구입했으며, 1 mm 직물 두께의 activated carbon felt(AC)는 Shenzhen Dengfang Nonwoven Fabric Product Co., Ltd.(중국)에서 구입하였다.

AC-CFx 제조. CNF-PEI 나노복합체 분산액은 먼저 3차 증

류수 용매에 2.45 g/L의 CNF와 20 g/L의 PEI를 분산시킨 이후 bath sonication(SD-80H, sd-ultra Inc., 한국)를 이용하여 2시간의 초음파 처리를 통해 용질을 용해시켜 제조하였다 (CNF:PEI 농도 비율은 0.121:1). 진공여과기법을 통해 지름 3.5 cm 원형 AC 상부표면에 CNF-PEI 나노복합체 분산액을 침착시켰다. 이후 오븐에서 60 °C 조건하에 2시간 동안 건조시켜 나노복합체 코팅을 완료하였다. 침착 분산액의 양은 각 0, 3, 5, 10 ml로 조절하였으며, 샘플 명명을 AC-CFx로 하였다 (Table 1, x= 침착된 CNF-PEI 나노복합체의 단위면적당 무게, $g_{\text{CNF-PEI}}/m^2$).

AC-CFx 특성 분석. 주사 전자 현미경(SEM, Merlin Compact, Carl Zeiss Co. Ltd., 독일)을 이용하여 형상 이미지를 얻었고 푸리에 변환 적외선 스펙트럼(FTIR, VERTEX 80v, Bruker Co. Ltd., 독일) 분석을 수행하였다. 파장에 따른 광 흡수 스펙트럼은 자외선/가시광선 분광 광도계(SolidSpec-3700, Shimadzu Co. Ltd., 일본)를 사용하여 확보하였다.

태양광-수증기 발생 측정. 태양광-수증기 발생 실험 동안 온도(20~25 °C), 습도(15~30%) solar power(1 kW/m²)의 조건을 유지하였다. 태양광 시뮬레이터(PEC-L01, Peccell Technologies Inc., 일본)로 1 kW/m² 세기의 태양 조사 하에서 태양광-수증기 실험을 수행하였다. 실시간 증발 속도는 소프트웨어에 연결된 10초마다 중량 변화 기록용 전자저울(AND FX-200i, AND Co. Ltd., 일본)을 이용하여 측정하였다. AC-CFx의 표면 온도는 열화상 카메라(FLIR 720001, FLIR Systems Inc., 미국)로 측정하였다. 열확산 방지를 위하여 대상 용액의 표면에 떠 있는 폴리스티렌 절연체 위에 AC-CFx를 배치하여 직접적인 물과의 접촉 피하였다. 여과지 조각은 모세관 현상을 이용하여 물이 공급되는 채널로 사용되었고 높은 친수성으로 인해 AC-CFx에 지속적으로 충분한 양의 물을 공급할 수 있었다. 증류수를 이용한 태양광-수증기 발생 실험은 0.5 h 동안 수행되어 평균 수증기 발생률을 계산하였고, NaCl 수용액을 이용한 실험은 8 h 동안 수행되었으며, 1시간 마다 평균 수증기 발생률을 계산하였다. AC-CFx의 소금 축적량은 다음과 같이 측정되었다. 8 h 태양광-수증기 발생 실험 수행 이후 회수된 AC-CFx 샘플은 오븐을 이용하여 건조되었다. 완전히 건조된 AC-CFx의 무게를 전자저울(AND HR-250AZ, AND Co. Ltd., 일본)을 이용하여 측정되었다. 소금 축적량은 태양광-수증기 발생 실험 전후 AC-CFx 무게 차이를 실험 전 AC-CFx 무게로 나누어 계산하였다.

결과 및 토론

Figure 1은 CNF-PEI 나노복합체 분산액을 AC 상부 표면에 코팅한 AC-CFx(AC + CNF-PEI nanocomposites, x = 침착된 CNF-PEI 나노복합체의 단위면적당 무게)의 모식도이다. AC는 높은 광 흡수율과 낮은 열 전도성, 열 관리에 우수한 광

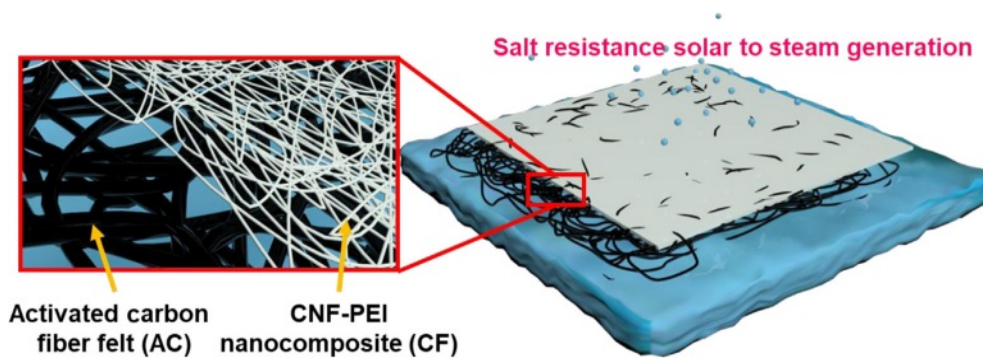


Figure 1. Schematic diagram of the coated CNF-PEI nanocomposites on activated carbon fiber felt (AC-CFx).

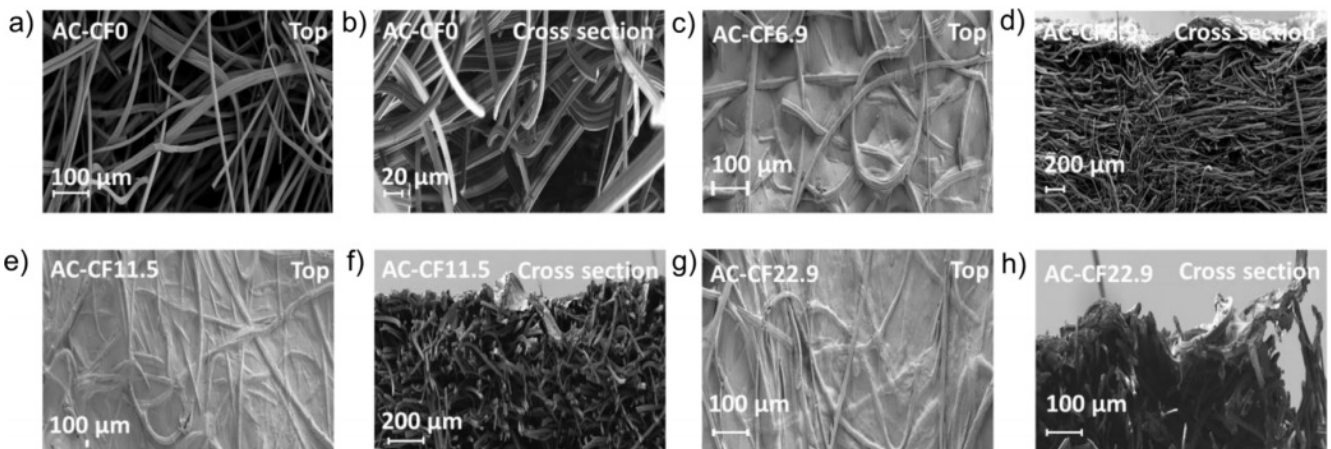


Figure 2. SEM images of the AC-CFx. (a) AC-CF0 of top view; (b) cross section view; (c) AC-CF6.9 of top view; (d) cross section view; (e) AC-CF11.5 of top view; (f) cross section view; (g) AC-CF22.9 of top view; (h) cross section view.

열 재료로 활용된다.²⁸ 또한 AC는 상업적으로 이용가능하기 때문에 풍부하며, 비용적인 측면에서 우수한 재료로 평가할 수 있다. Figure 2는 AC-CFx를 FE-SEM으로 관찰한 사진을 보여 주고 있다. 무작위로 얽혀진 AC 섬유에 의한 큰 기공 구조(~수십 μm)는 생성된 증기의 빠른 탈출효과와 함께 재료 내부의 물 저장소 역할을 수행하여 국부적 증발 효과를 강화한다. AC 층과 CF 층이 구분되어 형성된 다층 형상을 옆면 SEM 사진을 통해 확인할 수 있다. CNF-PEI 나노복합체는 진공여과기법 과정에서 AC 층에 깊이 침투하지 못하며 AC 층 상부표면에 얇은 막으로 형성한다. CNF의 섬유 직경은 5~30 nm 정도로 AC 기공층에 충분히 침투가 가능함에도 불구하고 AC 층 상부표면에만 막으로 형성된 이유는 나노복합체의 자가 응집 때문이다. PEI는 amine 계열 작용기를 가진 고분자로서 CNF간의 정전기적 상호작용을 통해 인력을 형성하며 가교역할을 수행하고 분산액을 젤화 한다. 따라서 젤화된 CNF-PEI 분산액은 광열재료인 AC의 상부 표면에만 막을 형성시켜 AC의 특성을 침해하지 않는 것을 확인하였다. CNF-PEI 나노복합체는 물 흡수/탈수에 따라 고분자 부피 팽창/수

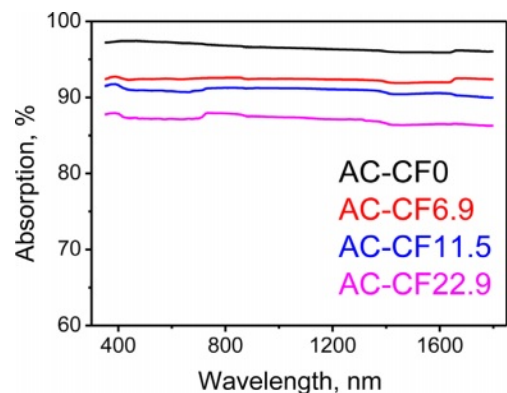


Figure 3. UV-vis analysis of the AC-CFx.

축 특성을 가지는데, 건조시 상부 표면을 수축시킨다. 이러한 이유로 CNF-PEI 분산액의 코팅량이 많아질수록 AC 상부 표면의 거칠기(roughness)가 증가되는 현상이 나타나는데, 이는 SEM 사진을 통해 확인하였다. 코팅된 나노복합체가 광열재료의 광 흡수성에 미치는 영향을 파악하는 것은 중요하다.

Figure 3은 CNF-PEI 나노복합체 양에 따른 광 흡수율 차이를 보여준다. 각 AC-CFx의 흡수율은 350~1800 nm 광 파장 영역에서 평균 96.6%(x=0), 92.4%(x=6.9), 90.9%(x=11.5), 87.1%(x=22.9)에 해당한다. 코팅된 나노복합체 양에 따라 4.2~9.4% 정도의 광 흡수 저하율을 보인다. CNF-PEI 나노복합체의 양이 증가함에 따라 흡수율이 약간씩 저하되는 경향성을 보이는데, CNF-PEI 나노복합체의 두께 상승에 의한 저하도 있지만 더 크게는 상부 표면의 거칠기 증가에 따른 광 산란도 한 요인으로 보인다. 나노복합체의 코팅에도 불구하고 흡수율의 저하가 적은 것은 CNF의 높은 광 투과성에 기인한다. 자가 조립시 결정패턴을 이루지 않는 무정형 고분자막을 형성하여 높은 광 투과 특성을 발현한다.^{24,25} 이러한 CNF-PEI 나노복합체는 태양광-수증기 발생효율에서 중요한 인자인 광 흡수성 및 열 관리 특성을 대부분 유지시키는 결과를 보인다. FTIR 스펙트럼을 통해 나노복합체의 표면 작용기 분석이 수행되었다(Figure 4). FTIR 분석은 AC-CFx의 상단과 하단 표면을 각각 측정하여 CNF, PEI 작용기 도입여부를 파악하였다. CNF-PEI 나노복합체 시료의 대부분은 AC를 관통하지 않았기 때문에 AC-CFx 하단면 FTIR 스펙트럼(Figure 4(a))

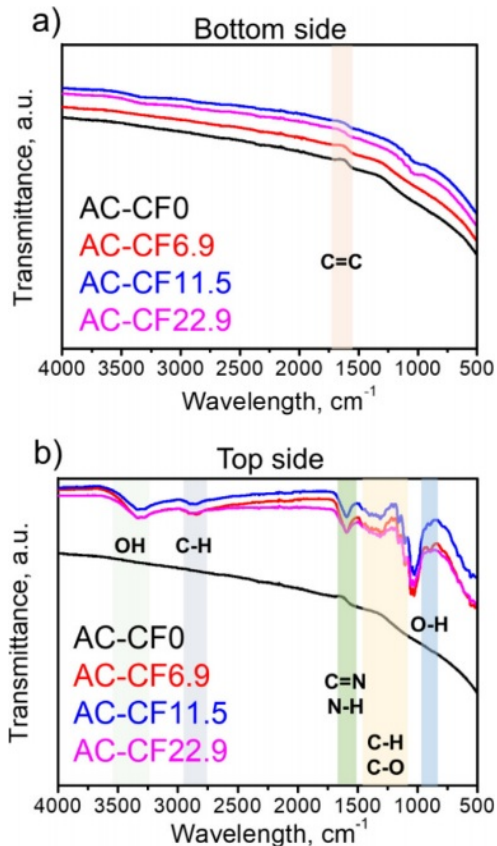


Figure 4. FTIR analysis of (a) bottom side; (b) top side of the AC-CFx.

에서는 AC의 고유진동만이 관찰된다. 1560 cm^{-1} 영역의 밴드는 방향족 고리 C=C 신축 진동(stretching vibration)에 해당한다.²⁹ 반면 AC-CFx의 상단면 FTIR 스펙트럼에서는 CNF 구조의 -OH 기의 신축진동(3270-3330 cm^{-1} 단위)을 볼 수 있으며, C-H 신축진동(~2900 cm^{-1})을 확인할 수 있다.³⁰ 1450-1243 cm^{-1} 및 1057 cm^{-1} 범위의 피크는 CH 및 CO의 대칭 및 비대칭 진동에 기인하며, CNF의 카르복실산 작용기에 해당한다.³¹ C=N 신축진동은 1660 cm^{-1} 에서 나타나고, 1차 아민 N-H 굽힘진동(bending vibration)은 1590 cm^{-1} 영역에서 관찰되었으며 이는 PEI amine 작용기에 해당한다. 1101 cm^{-1} 의 피크는 C-N 결합의 신축 진동일 가능성이 크다.³² AC-CFx의 상단 및 하단면의 표면 작용기를 분석한 결과, 하단면은 탄화 탄소인 AC에 의한 amide 그룹이 대부분으로 소수성이 강한 반면, 상단부는 CNF-PEI 나노복합체로 코팅되어 있어 amino acid, hydroxyl group 등 친수성이 강한 작용기들이 많이 함유되었다. 이는 코팅된 상단부에 친수성 특성이 강화되었다는 것을 확인할 수 있다. 친수성의 도입은 물 이동량을 증가시키고, 염이온의 확산과 교환을 유도한다. 또한 표면의 amino acid는 수용액 상태에서 양이온화되어 양이온인 소듐 이온을 반발시켜 염 형성을 억제할 수 있다. 이는 결과적으로 염 결정 생성에 대한 저항성을 가지도록 한다.

Figure 5는 CNF-PEI 나노복합체의 코팅양에 따른 태양광-수증기 발생률을 측정 결과를 보여준다. 실험은 0.5 h 동안 수행되었으며, 평균 수증기 발생률을 계산하였다. 수증기 발생률은 모사태양광 조사가 없을 때, 즉 0 sun(0 kW m^{-2})에서 각각 0.17 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=0), 0.19 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=6.9), 0.21 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=11.5), 0.21 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=22.9)로 측정되었다. 1 sun(1 kW m^{-2})의 모사태양광 조사 하에서는 각각 1.13 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=0), 1.12 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=6.9), 1.11 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=11.5), 1.10 $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (x=22.9)로 측정되었다.

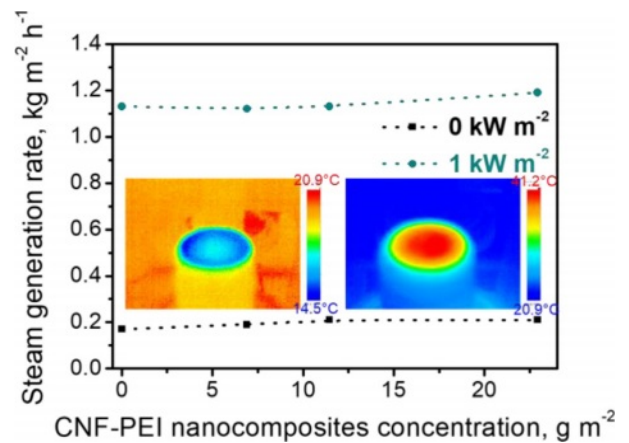


Figure 5. Solar-to-steam experiments of AC-CFx with DI H₂O under 0, 1 kW m^{-2} sun intensity. Input IR pictures of AC-CF6.9 sample in the darkness and while working under 1 kW m^{-2} sun irradiation.

$\text{m}^2\text{h}^{-1}(x=6.9)$, $1.13 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=11.5)$, $1.19 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=22.9)$ 로 측정되었다. 태양광 조사에 따른 태양광 수증기 발생률 증가는 평균 5.7배이며, AC-CFx는 효과적인 수증기 발생을 가진다고 볼 수 있다. Figure 5의 내부 사진은 AC-CF6.9의 태양광 조사 전후의 열화상 사진이다. 태양광 조사 전에는 물의 증발열에 의한 냉각현상으로 AC-CF6.9 표면은 주변 온도에 비해 낮은 온도를 보인다. 태양광 조사 이후 AC-CF6.9 표면 온도는 40°C 까지 상승하며 집중적인 가열 효과를 확인할 수 있다. CNF-PEI 나노복합체 양에 따른 수증기 발생률 비교를 했을 때, CNF-PEI 나노복합체가 코팅되지 않은 AC-CF0에 비해 CNF-PEI 나노복합체가 코팅된 AC-CFx는 평균적으로 (-0.6 ~ +5%) 차이를 보인다. CNF-PEI 나노복합체는 수증기 발생량에 큰 변화를 주지 않는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 목표한 광열재료의 태양광-수증기 발생효율을 저하하지 않는 코팅제로서 활용이 가능함을 증명한다. AC-CFx의 내염 특성을 탐구하기 위해 바닷물 염분과 비슷한 3.5 wt% NaCl 용액을

Table 1. Sample Names and Main Components

Sample	Amount of deposited CNF-PEI nanocomposites ($\text{g}_{\text{CNF-PEI}}/\text{m}^2$)
AC-CF0	0
AC-CF6.9	6.9
AC-CF11.5	11.5
AC-CF22.9	22.9

Table 2. 8 h Solar-to-steam Experiments of AC-CFx with 3.5 wt% NaCl Solution Under 1 kW m^{-2} Sun Intensity

Sample	Solar-to-steam experiment ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)		Salt accumulation ($\text{g}_{\text{NaCl}}/\text{g}_{\text{sample}}$)
	After 1 h	After 8 h	After 8 h
AC-CF0	0.98	1.09	4.60
AC-CF6.9	1.04	0.90	1.97
AC-CF11.5	1.10	1.10	1.73
AC-CF22.9	0.96	1.01	1.30

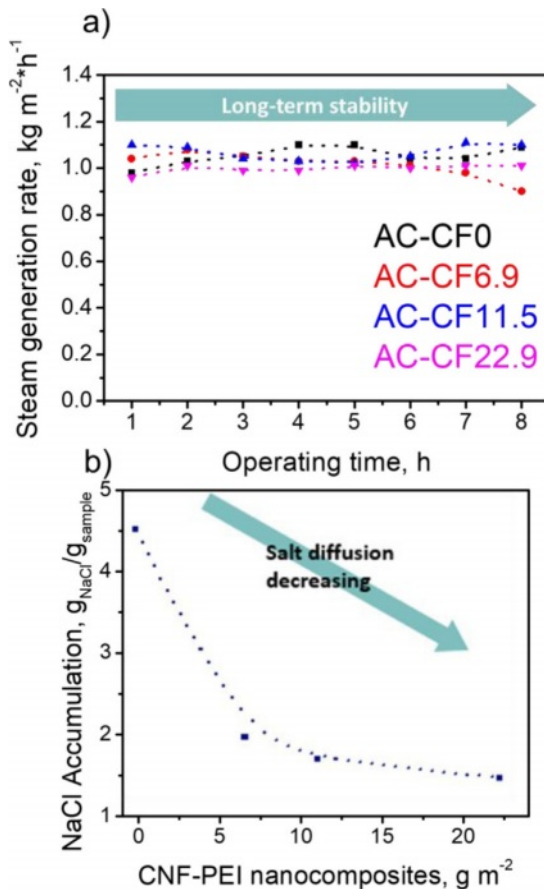


Figure 6. (a) 8 h Solar-to-steam experiments of AC-CFx with 3.5 wt% NaCl solution under 1 kW m^{-2} sun intensity; (b) Measured amount of salt, formed on the samples after 8 h solar-to-seam operation.

사용하여 태양광-수증기 발생률을 확인하였다(Figure 6(a)). 8시간의 태양광-수증기 구동 동안 매시간 수증기 발생률 평균값을 계산/측정하였다. 초기 작동 시간 1시간일 때에 AC-CFx의 수증기 발생률은 각각 $0.98 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=0)$, $1.04 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=6.9)$, $1.10 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=11.5)$, $0.96 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=22.9)$ 에 해당한다. 작동 8시간일 때의 수증기 발생률은 각각 $1.09 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=0)$, $0.90 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=6.9)$, $1.10 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=11.5)$, $1.01 \text{ kg m}^2\text{h}^{-1}(x=22.9)$ 에 해당한다. 8시간 염수에서 진행된 태양광-수증기 실험동안 수증기 발생률은 모든 AC-CFx에서 거의 변하지 않았으며, CNF-PEI 나노복합체 코팅에 의한 발생률 저하도 발생하지 않았다. 그러나 AC-CF0 역시 수증기 발생률이 저하되지 않은 이유는 샘플 내부에 우선적으로 소금 침적이 발생하였고 아직 광 흡수표면상으로 소금이 축적되지 않아 수증기 발생률 저하에 영향을 주지 않았다. 소금 축적 정도를 분명히 파악하기 위하여 8시간 태양광-수증기 실험에 사용된 AC-CFx의 소금 축적량을 측정하였다(Figure 6(b)). AC-CFx의 소금 축적량은 각각 $4.60 \text{ g}_{\text{NaCl}}/\text{g}_{\text{sample}}(x=0)$, $1.97 \text{ g}_{\text{NaCl}}/\text{g}_{\text{sample}}(x=6.9)$, $1.73 \text{ g}_{\text{NaCl}}/\text{g}_{\text{sample}}(x=11.5)$, $1.30 \text{ g}_{\text{NaCl}}/\text{g}_{\text{sample}}(x=22.9)$ 에 해당한다(Table 2). CNF-PEI 나노복합체 양이 증가할수록 축적된 염의 비선형 감소가 확인되며, 확실한 염축적 저항성을 보임을 확인하였다. 염수에서 진행된 태양광-수증기 발생 측정 결과와 샘플내의 염축적량 측정 결과를 토대로 최적의 샘플은 AC-CF11.5로 도출될 수 있다. AC-CF11.5는 가장 높은 수증기 발생률을 보이며, 높은 염축적 저항성을 가진다. AC-CF11.5는 AC-CF0에 비하여 소금 축적량이 63% 감소하였다.

결 론

본 연구에서는 고효율 태양광-수증기 발생에 적용 가능한 CNF-PEI 나노복합체를 개발하였다. 개발된 나노복합체를 광열재료로 사용한 탄소구조체의 표면에 코팅하면 태양광-수증기 발생효율은 감소시키지 않는 반면, 광열재료에 친수성 작용기 도입 및 양이온화에 의해서 염 축적을 억제하는 결과를 얻었다. 8시간의 염수 이용 태양광-수증기 발생 실험에서 수증기 발생 효율을 유지하였으며, 소금 축적량을 파악한 결과 나노복합체는 염 축적에 대한 저항성을 가짐을 확인하였다. 본 연구를 통해서 개발한 CNF-PEI 나노복합체는 다양한 광열재료에 적용하여 염 저항 코팅제로 활용이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글: 이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Cao, S.; Jiang, Q.; Wu, X.; Ghim, D.; Derami, H. G.; Chou, P. I.; Jun, Y. S.; Singamaneni, S. Advances in Solar Evaporator Materials for Freshwater Generation. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 24092-24123.
- Zhu, M.; Li, Y.; Chen, F.; Zhu, X.; Dai, J.; Li, Y.; Hu, L. Plasmonic Wood for High-efficiency Solar Steam Generation. *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, 1701028.
- Sheng, C.; Yang, N.; Yan, Y.; Shen, X.; Jin, C.; Wang, Z.; Sun, Q. Bamboo Decorated with Plasmonic Nanoparticles for Efficient Solar Steam Generation. *J. Therm. Eng.* **2020**, *167*, 114712.
- Li, Z.; Wang, C.; Lei, T.; Ma, H.; Su, J.; Ling, S.; Wang, W. Arched Bamboo Charcoal as Interfacial Solar Steam Generation Integrative Device with Enhanced Water Purification Capacity. *Adv. Sustain. Syst.* **2019**, *3*, 1800144.
- Saleque, A. M.; Ma, S.; Ahmed, S.; Hossain, M. I.; Qarony, W.; Tsang, Y. H. Solar Driven Interfacial Steam Generation Derived from Biodegradable Luffa Sponge. *Adv. Sustain. Syst.* **2021**, *5*, 2000291.
- Hu, N.; Xu, Y.; Liu, Z.; Liu, M.; Shao, X.; Wang, J. Double-layer Cellulose Hydrogel Solar Steam Generation for High-efficiency Desalination. *Carbohydr. Polym.* **2020**, *243*, 116480.
- Bae, K.; Ku, B. J.; Kim, Y.; Mnoyan, A.; Lee, K.; Lee, K. J. Black Diatom Colloids Toward Efficient Photothermal Converters for Solar-to-steam Generation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 4531-4540.
- Wang, X.; He, Y.; Cheng, G.; Shi, L.; Liu, X.; Zhu, J. Direct Vapor Generation Through Localized Solar Heating via Carbon-nanotube Nanofluid. *Energy Convers. Manag.* **2016**, *130*, 176-183.
- Ku, B. J.; Lee, B. M.; Kim, D. H.; Mnoyan, A.; Hong, S. K.; Go, K. S.; Kwon, E. H.; Kim, S. H.; Choi, J. H.; Lee, K. Photothermal Fabrics for Efficient Oil-Spill Remediation via Solar-Driven Evaporation Combined with Adsorption. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 13106-13113.
- Zhang, P.; Li, J.; Lv, L.; Zhao, Y.; Qu, L. Vertically Aligned Graphene Sheets Membrane for Highly Efficient Solar Thermal Generation Clean Water. *ACS Nano* **2017**, *11*, 5087-5093.
- Zhou, L.; Tan, Y.; Ji, D.; Zhu, B.; Zhang, P.; Xu, J.; Zhu, J. Self-assembly of Highly Efficient, Broadband Plasmonic Absorbers for Solar Steam Generation. *Sci. Adv.* **2016**, *2*, e1501227.
- Bae, K.; Kang, G.; Cho, S. K.; Park, W.; Kim, K.; Padilla, W. J. Flexible Thin-film Black Gold Membranes with Ultrabroadband Plasmonic Nanofocusing for Efficient Solar Vapour Generation. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 1-9.
- Shi, Y.; Zhang, C.; Wang, Y.; Cui, Y.; Wang, Q.; Liu, G.; Yuan, Y. Plasmonic Silver Nanoparticles Embedded in Flexible Three-dimensional Carbonized Melamine Foam with Enhanced Solar-driven Water Evaporation. *Desalination* **2021**, *507*, 115038.
- Tao, F.; Zhang, Y.; Cao, S.; Yin, K.; Chang, X.; Lei, Y.; Chen, X. CuS Nanoflowers/semipermeable Colloid Membrane Composite for High-efficiency Solar Vapor Generation. *Mater. Today Energy* **2018**, *9*, 285-294.
- Zhang, C.; Yan, C.; Xue, Z.; Yu, W.; Xie, Y.; Wang, T. Shape-Controlled Synthesis of High-Quality Cu7S4 Nanocrystals for Efficient Light-Induced Water Evaporation. *Small* **2016**, *12*, 38, 5320-5328.
- Chen, Q.; Pei, Z.; Xu, Y.; Li, Z.; Yang, Y.; Wei, Y.; Ji, Y. A Durable Monolithic Polymer foam for Efficient Solar Steam Generation. *Chem. Sci.* **2018**, *9*, 623-628.
- Sheng, M.; Yang, Y.; Bin, X.; Zhao, S.; Pan, C.; Nawaz, F.; Que, W. Recent Advanced Self-propelling Salt-blocking Technologies for Passive Solar-driven Interfacial Evaporation Desalination Systems. *Nano Energy* **2021**, *89*, 106468.
- Tan, M.; Wang, J.; Song, W.; Fang, J.; Zhang, X. Self-floating Hybrid Hydrogels Assembled with Conducting Polymer Hollow Spheres and Silica Aerogel Microparticles for Solar Steam Generation. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 1244-1251.
- Hu, R.; Zhang, J.; Kuang, Y.; Wang, K.; Cai, X.; Fang, Z.; Wang, Z. A Janus Evaporator with Low Tortuosity for Long-term Solar Desalination. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 15333-15340.
- Wu, X.; Jiang, Q.; Ghim, D.; Singamaneni, S.; Jun, Y. S. Localized Heating with a Photothermal Polydopamine Coating Facilitates a Novel Membrane Distillation Process. *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 18799-18807.
- Kashyap, V.; Al-Bayati, A.; Sajadi, S. M.; Irajizad, P.; Wang, S. H.; Ghasemi, H. A Flexible Anti-clogging Graphite Film for Scalable Solar Desalination by Heat Localization. *J. Mater. Chem. A* **2017**, *5*, 15227-15234.
- Zhang, Y.; Ravi, S. K.; Tan, S. C. Food-derived Carbonaceous Materials for Solar Desalination and Thermo-electric Power Generation. *Nano Energy* **2019**, *65*, 104006.
- Liu, Y.; Liu, Z.; Huang, Q.; Liang, X.; Zhou, X.; Fu, H.; Xie, W. A High-absorption and Self-driven Salt-resistant Black Gold

- Nanoparticle-deposited Sponge for Highly Efficient, Salt-free, and Long-term Durable Solar Desalination. *J. Mater. Chem. A* **2019**, 7, 2581-2588.
24. Rana, A. K.; Gupta, V. K.; Saini, A. K.; Voicu, S. I.; Abdellattifaand, M. H.; Thakur, V. K. Water Desalination Using Nanocelluloses/cellulose Derivatives Based Membranes for Sustainable Future. *Desalination* **2021**, 520, 115359.
25. Jin, J.; Lee, D.; Im, H. G.; Han, Y. C.; Jeong, E. G.; Rolandi, M.; Bae, B. S. Chitin Nanofiber Transparent Paper for Flexible Green Electronics. *Adv. Mater.* **2016**, 28, 5169-5175.
26. Li, Y.; Grishkewich, N.; Liu, L.; Wang, C.; Tam, K. C.; Liu, S.; Sui, X. Construction of Functional Cellulose Aerogels via Atmospheric Drying Chemically Cross-linked and Solvent Exchanged Cellulose Nanofibrils. *Chem. Eng. J.* **2019**, 366, 531-538.
27. Zhao, J.; Lu, C.; He, X.; Zhang, X.; Zhang, W.; Zhang, X. Polyethylenimine-grafted Cellulose Nanofibril Aerogels as Versatile Vehicles for Drug Delivery. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, 7, 2607-2615.
28. Li, H., He, Y., Hu, Y.; Wang, X. Commercially Available Activated Carbon Fiber Felt Enables Efficient Solar Steam Generation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 9362-9368.
29. Yusof, N.; Rana, D.; Ismail, A. F.; Matsuura, T. Microstructure of Polyacrylonitrile-based Activated Carbon Fibers Prepared from Solvent-free Coagulation Process. *J. Appl. Res. Technol.* **2016**, 14, 54-61.
30. Oh, S. Y.; Yoo, D. I.; Shin, Y.; Seo, G. FTIR Analysis of Cellulose Treated with Sodium Hydroxide and Carbon Dioxide. *Carbohydr. Res.* **2005**, 340, 417-428.
31. Soleimanzadeh, H.; Bektashi, F. M.; Ahari, S. Z.; Salari, D.; Olad, A.; Ostadrahimi, A. Optimization of Cellulose Extraction Process from Sugar Beet Pulp and Preparation of its Nanofibers with Choline Chloride-lactic Acid Deep Eutectic Solvents. *Biomass Conv. Bioref.* **2022**, <https://doi.org/S13399-022-02885-4>.
32. Lindén, J. B.; Larsson, M.; Kaur, S.; Skinner, W. M.; Miklavcic, S. J.; Nann, T.; Nydén, M. Polyethyleneimine for Copper Absorption II: Kinetics, Selectivity and Efficiency from Seawater. *RSC Adv.* **2015**, 5, 51883-51890.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의
관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.