

## 태양열 활용 증발기의 성능 향상을 위한 국소적 젖음성 제어에 관한 실험적 연구

최진욱\* · 서용원\* · 모형욱\*\* · 김설하\*\*\*,†

\*경북대학교 정밀기계공학과  
37224 경상북도 상주시 경상대로 2559  
\*\*경북대학교 미래융합과학기술학과  
37224 경상북도 상주시 경상대로 2559  
(2021년 12월 14일 접수, 2021년 12월 30일 수정본 접수, 2022년 1월 4일 채택)

## Performance Enhancement of Solar-Driven Steam Generator by Local Wettability Control

Jinwook Choi\*, Yongwon Seo\*, Hyeong-Uk Mo\*\* and Seolha Kim\*\*\*,†

\*Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea  
\*\*Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea  
(Received 14 December 2021; Received in revised from 30 December 2021; Accepted 4 January 2022)

### 요 약

태양광을 이용한 증기 발생 방법은 순수한 물이 고갈되는 현재 사회에서 해수나 폐수에서 물을 수확할 수 있는 매우 유망한 기술이다. 태양광을 이용한 증기 발생 중에서 멤브레인을 이용한 증류법은 현재 개발 중에 있지만 멤브레인이 물과 직접 접촉하여 효율적인 증발량을 늘리기가 어려웠다. 본 연구에서는 PDMS (polydimethylsiloxane)와 산화 그래핀(GO)으로 구성된 태양열 멤브레인 증기 발생기와 부분적으로 멤브레인 전체에 절친 젖음성 제어를 통해 증발량을 개선하는 것을 제안하여 실험적 연구를 수행했다. 국부적인 젖음성 제어로 태양광과의 열교환 영역에서 열 국지화 및 온도 상승에서 상당한 개선을 보여주었다. 1sun(=1000 W/m)의 조사에서 1.54 kg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>의 증발 능력을 갖습니다. 그 결과, 태양열 멤브레인 증기 발생 시스템은 국부적인 물 회수 성능 메커니즘을 이해 및 실험적 확인을 수행할 수 있었다.

**Abstract** – Solar membrane steam generation is a very promising technology that can harvest purified water from seawater or wastewater during the current danger of running out of pure water. However, solar Membrane steam generation had direct contact with water, making it difficult to increase the efficient amount of evaporation. Here, we propose solar membrane steam generator composed of polydimethylsiloxane (PDMS) and graphene oxide (GO) and improved evaporation through wettability control in part throughout the water-absorbing membrane. Wettability control has shown significant improvements in thermal localization and temperature rise in the area of heat exchange with sunlight. The evaporator has an evaporation rate of 1.54 kg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> under 1 sun irradiation. The results showed that Solar membrane steam evaporation can effectively harvest pure water through an increase in evaporation.

Key words: Wettability, Solar steam generation, Graphene oxide, Porous medium

### 1. 서 론

물은 산업, 사회, 개인에게 필수적인 자원이다. 그러나 지구 기후 변화, 인구 증가, 산업화로 인해 물 부족은 전세계적으로 심각한 문제가 되고 있다. 해수담수화는 지구 전체 수자원의 97.5%인 바닷물로 물 부족 문제를 해결할 수 있는 해결책 중 하나로 인정받고 있다. 해수담수화는 염분을 제거하기 위해 주로 열, 압력 또는 화학적인

방법을 통한 담수화과정이 있으며, 해당 매커니즘 영범위 내에서 효율적으로 물을 수확하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 예를 들어, 최근 소개된 기술로는 증발법(MED, Multi-Effect Distillation), 역삼투법(RO, Reverse Osmosis), 금속 유기 골격체(MOF, Metal-Organic Framework)이 있으며, 기계공학 및 화학공학의 융합으로 다양한 접근방안이 제시되고 있다[1-3]. 그러나 통상적인 증발법과, 역삼투압 담수화 시스템은 높은 열원 혹은 전기 에너지 소비가 필요하기 때문에 복잡하고 비싼 외부 전력 공급원이 있어야 하며, 가난한 나라 혹은 외딴 도서 지역에서 광범위하게 적용되기에는 많은 극복사항이 존재한다. 그래서 최근에는 MOF의 도움을 통한 피동적인 형태의 물 회수 연구도 이루어지고 있지만, 영구적으로 순수한 물을 충분히 수확하기 위한 방법으로는 아직 성능이 부족한 실정이다.

† To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: shkim0731@knu.ac.kr

‡ 이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

따라서 태양열 재생 에너지를 이용한 멤브레인 증류법은 깨끗한 물을 얻기 위한 매우 유망한 전략으로써 매력적인 대안으로 자리잡고 있다.

태양광을 증발을 위한 열에너지로 직접 전환하는 태양열 멤브레인 증류법은 자가 발전, 정화, 살균 등 다양한 응용 분야에서 새롭게 등장한 기술이다[4]. 이에 따라 증기 증발에 태양에너지를 활용하기 위해 다공성 멤브레인 코팅 소재를 최적화하여 태양광 흡수, 열 국소화, 물 수송, 염분 제거 등을 개선하는 연구가 진행되어 왔다. 효율적인 태양열 흡수를 위해 그래픽 옥사이드(GO, Graphene Oxide), 환원 그래핀 옥사이드(rGO, Reduced Graphene Oxide), 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nanotube), 폴리피롤 등 다양한 카본블랙 소재를 멤브레인 코팅 소재로 이용하여 연구하고 있다[5-7]. 또한 불에 타는 천연 유기물을 이용한 탄화 코팅막을 제작해 효율적인 광대역 광열 흡수 효과를 볼 수 있다[8]. 그리고 구리, 알루미늄, 금과 같은 플라즈마 모닉 나노 입자는 원래 또는 MOF 상태에서 태양 발생 코팅 막 재료가 혼합되어 염분 제거 능력을 향상시키는 연구도 진행되고 있다[9].

태양열 멤브레인 증류법의 단점들을 보완하는 여러 연구들이 있지만 가장 큰 과제는 높은 증기 증발 효율을 극대화 및 유지하는 것이다. 그러나 물과 직접 접촉하는 멤브레인 증류기 하단부 및 측면부에서는 물로 통한 대류 및 전도의 열손실이 발생한다. 이에 따라 이번 연구에서는 해당 멤브레인의 표면 젖음성 제어를 통한 열 국소화의 극대화를 구현하고, 또한 열손실을 제어하는 방안을 통한 증발 성능 증진을 도모하였다. 따라서 물을 수송이 필요한 하부와 광열변환이 일어나는 상부에는 태양광 및 열을 잘 흡수하는 물질과 더불어 친수적인 표면을 구현하였으며, 이를 제외한 측면은 소수성 물질로 코팅하여 부력과 더불어 열손실을 제어한 멤브레인을 제작하여 성능을 평가하였다. 친수성 부분은 물을 흡수하지만, 막 옆면을 소수성을 코팅한 국부적 젖음성 제어를 통해 물과 접촉하는 구역의 차이를 만들어 열 손실을 줄여보려고 한다. 따라서 본 연구에서는 다공성 증발기의 젖음성의 제어를 통한 열 국소화 향상으로 증발량 극대화를 평가하고자 한다.

## 2. 시편 제작 및 실험

### 2-1. 멤브레인 제작

Fig. 1은 멤브레인 제작의 공정을 그림으로 나타낸다. 본 연구에서는 다공성 멤브레인 제작을 위해 상용 갈색 설탕(한국, CJ 제일제당)과 PDMS (Sylgard184) (미국, Dow Chemical)를 사용한다. 처음으로 상용 갈색 설탕을 이용하여 각설탕(35 mm × 35 mm × 10 mm, cylinder shape)을 만든다. 그 다음 플라스틱 비커에 PDMS 전합제와 경화제를 10:1(질량비) 비율로 섞은 후 PDMS 혼합제 위에 각설탕을 올려 놓고 설탕의 공극 사이에 PDMS 혼합제가 충분히 들어가기 위해 2시간 동안 진공을 설정한다. 2시간 이후 70 °C의 조건에서 3시간 동안 설탕 멤브레인 내부로 스며든 PDMS를 경화시킨다. 교반기를 이용하여 설탕이 포함된 PDMS를 60 °C 물에 담그고 2시간 동안 설탕을 용해시켜 다공성을 가진 PDMS 스펀지 형태의 다공성 멤브레인을 제작한다.

PDMS 스펀지는 기본적으로 소수성이므로 친수성으로 변환시키기 위해 PVA (Polyvinyl alcohol) (중합도 약 15000, FUJIFILM, 일본)를 이용한다. PVA를 사용하기 전에 먼저 스펀지의 표면에 산소 플라즈마 처리를 통해 일시적으로 높은 표면에너지를 활용하여 친수적인

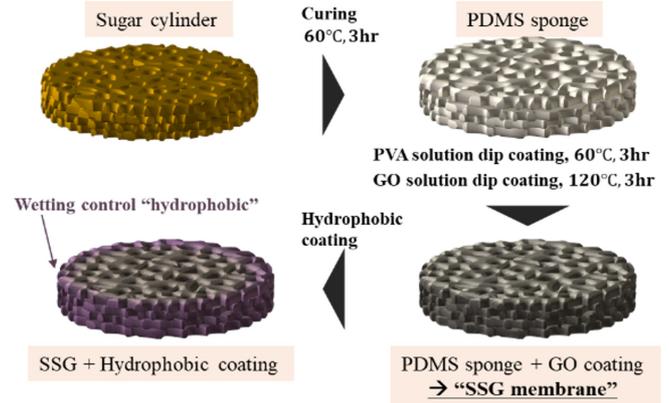


Fig. 1. Fabrication process (1<sup>st</sup> step: Making Sugar cylinder, 2<sup>nd</sup> step: Curing PDMS prepolymer, 3<sup>rd</sup> step: PVA coating 4<sup>th</sup> step: GO solution coating 5<sup>th</sup> step: Hydrophobic coating on the side sample).

성격을 띠도록 한다. 플라즈마 처리된 PDMS 스펀지를 1 wt%의 PVA 용액으로 20분 동안 담갔으며, 그 이후 진공 오븐에 60 °C로 약 3시간 동안 건조한다. 위와 같이 담금 및 건조 작업을 5회 반복 실시한다.

다음으로, 표면의 태양광 및 열의 흡수도를 높일 방안으로 그래핀 관련 물질을 표면에 코팅하였다. 우선, 그래핀을 이용하여 GO (Graphene Oxide) 파우더를 제작하고, 5 mg mL<sup>-1</sup>의 GO 용액을 만들어 친수성 PDMS와 함께 30분동안 진공 상태로 둔다. 그 이후 진공에 의해 공극 사이로 채워진 GO 용액을 3시간 동안 120 °C에서 건조한다. 이러한 딥 코팅 공정을 3회 반복하여 실시한다.

앞선 방법으로 제작된 시편은 그래핀이 코팅된 친수성 멤브레인이 제작되었다 (S1: PVA-GO). 실험 비교군을 준비하기 위하여 해당 표면에 소수성 물질(Glaco 용액)을 코팅하여, 전체적인 소수성 표면을 또 준비하였다(S2: Hydrophobic). 마지막으로 GO-PDMS 멤브레인의 측면부분에만 위 소수성 용액을 코팅한 시편을 준비하였다(S3: Side Phobic).

### 2-2. 태양열 증기 발생 멤브레인의 특성

친수성과 소수성 코팅의 접촉각 차이를 알아보기 위해 접촉각 측정기(Smart drop, Femtobiomed, 한국)를 이용하였다. Fig. 2는 접촉각 측정기를 이용해 소수성과 친수성 코팅에서의 측정된 접촉각 크

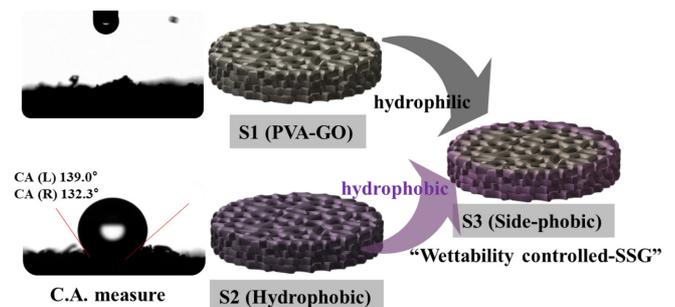


Fig. 2. Wettability feature on samples & Wettability control on side surface (measured contact angles (Left), Schematic of the wettability control samples (Right)).

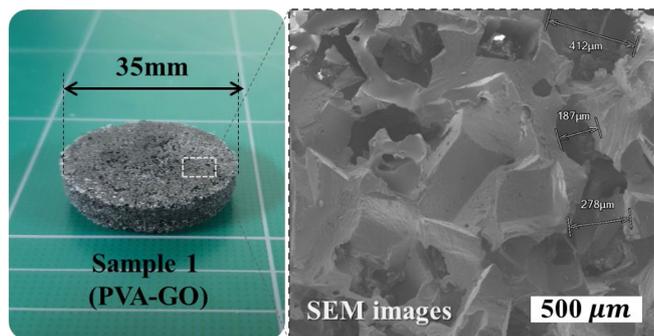


Fig. 3. Actual size sample (S1) (Left) & geometric structure observation through SEM (Scanning Electron Microscopy) (Right).

기를 알아볼 수 있다. 우선, S1의 소수성 표면 조건일 때에는 액적이 모세관 현상을 통해 멤브레인 내부로 빨려 들어가기 때문에 접촉각을 측정할 수 없었다. 이에 반하여, 소수성 코팅은 Cassie-baxter 효과로 인하여 표면에서 초 소수성에 가까운 132도로 측정이 되었다. 따라서 접촉각의 차이를 이용하여 최종적으로 국부적으로 옆면만 젖음성을 소수성으로 제어한 시편을 제작하였다. Fig. 3은 시편 및 해당 시편의 SEM 이미지를 보여준다. 대략적으로 100 µm의 기공들로 구성되어 있으며, 이를 통하여 친수적인 조건에서는 물을 흡수하는 모세관 현상을 구현할 것이며, 소수성 조건하에서는 Cassie-Baxter의 효과로 인하여 물과의 접촉을 최소화하는 기작을 기대하고 있다. 앞선 태양열 증기발생 멤브레인의 젖음성을 제어함으로써 멤브레인이 침수하는데 걸리는 시간을 알아보기 위해 초고속 카메라 (VEO E340L, Phantom, 미국)를 이용하여 1024 × 720 해상도에 50 fps로 촬영하였다. Fig. 4은 젖음성을 각각 다르게 제어함으로써 시간에 따른 침수 상태를 알아볼 수 있는 그림이다. 전체 소수성 코팅을 한 시편 2는 시간에 따른 물에 가라앉는 높이 변화가 별 다르게 없고, 전체 친수성 코팅을 한 시편 1은 물 위에 올려 두면 물을 흡수하기 때문에 대략 10분 정도 시간이 지나면 대부분 가라앉게 된다. 국

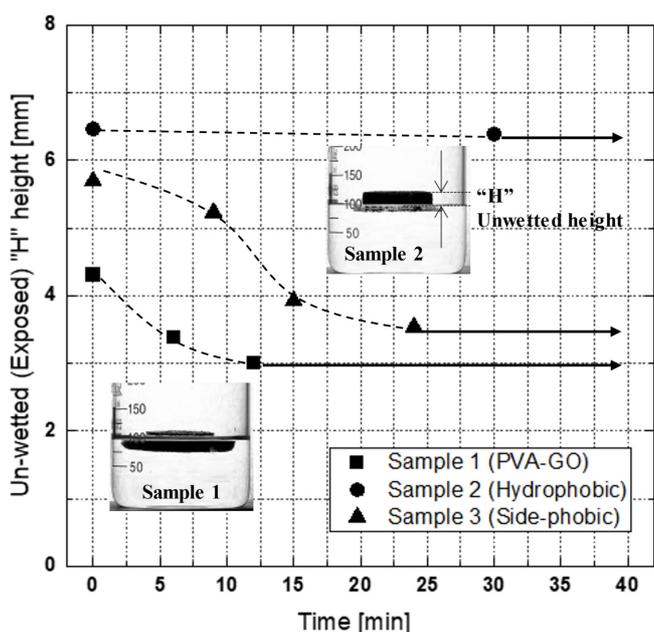


Fig. 4. Floating characteristics of wettability control samples (S1, S2, S3) on tap water pool.

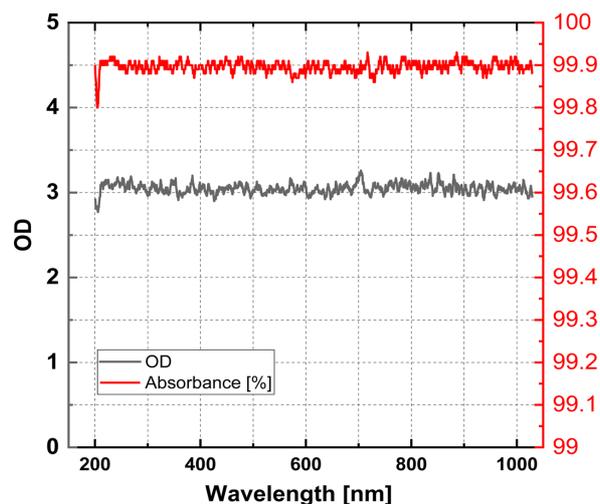


Fig. 5. GO solution - Light absorbance during solar simulator irradiation (OD(Optical Density) and Absorbance, Unit: dimensionless and %).

부적 젖음성을 제어한 시편 3은 옆면의 소수성 코팅에 의해 잠시 떠 있다 하단 부분의 친수성에 의해 물을 흡수하면서 가라앉게 되는 것을 볼 수 있다. 부력과 젖음성을 통한 힘의 상관관계에 관한 수식으로 표현했다.

$$F = \rho g h A - \pi D \gamma \cos \theta \quad (1)$$

여기서  $D$ 는 시편의 직경이고,  $\gamma$ 는 표면장력,  $\theta$ 는 접촉각,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $h$ 는 시편의 침전 깊이 그리고  $A$ 는 시편의 종단면적이다. 물과 젖음 표면 상에 접촉각은 시편의 유일한 힘의 상관관계는 부력에 의한 결과이다.

또한, 샘플의 태양광 흡수를 증대시키기 위하여 위해 본 실험에서는 GO 용액을 이용하였다. GO 용액의 태양광 흡수력을 알아보기 위해 UV-Vis-NIR 분광기(Ocean insight, 미국)를 이용하여 측정하였다. Fig. 5는 200 nm에서 1030 nm까지 나오는 광원으로부터 흡광도를 측정한 결과를 그래프로 보여주고 있다. 200 nm에서 1030 nm까지 나오는 빛에 GO 용액의 흡광도를 측정할 결과, OD (Optical Density) 값이 3으로 보였고, 흡광율로 변환하였을 때 99.9%의 흡광율을 보였다. 따라서 광열 반응을 이용한 태양열 증기 발생 멤브레인의 코팅 용액으로써 적합하다.

### 2-3. 태양열 활용 멤브레인의 증발 실험 방법

본 연구에서 제작된 태양열 증기발생 멤브레인의 증발량을 알아보기 위해 Fig. 6와 같이 실험 장치를 구성하였다. 솔라 시뮬레이터를 활용하여 암막커튼 내부에서 증발실험을 이행하였다. 내외부의 기온 및 습도 변화 섭동을 최소화하기 위하여, 암막커튼을 설치하였으며, 매 실험마다 기온 및 습도(24~26C, 20~23%)를 측정하여 비슷한 조건 범위 내에서 실험 결과를 도출하였다. 일정량의 물이 있는 비커에 태양열 증기발생 멤브레인을 넣고, 솔라 시뮬레이터에서 1 sun (=1000 kw/m<sup>2</sup>)의 빛을 조사하면 태양열 증기발생 멤브레인에 의해 물이 증발하는 방식으로 무게가 점점 줄어 들게 된다. 이를 전자 저울(Balance)을 이용하여 10분마다 측정하였다. 그리고, 상단에서 소형 적외선 카메라(FLIR Pro one, 미국)를 활용하여 증발 상황에서 시편의 표면 온도를 측정하였다.

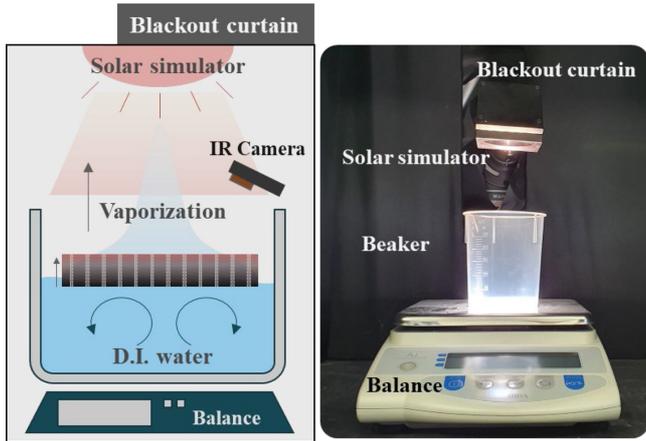


Fig. 6. Experimental setup for evaporation test (Schematic image (Left), Optical image (Right)).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 국부적으로 젖음성을 제어한 태양열 증기발생 멤브레인 성능평가

Fig. 7는 본 시편별로 증발된 물의 질량과 증발 유속을 측정한 실험 결과값이다. 우선, 전체면이 소수성으로 코팅된 시편(S2)은 예상대로 매우 낮은 증발 성능을 보여주었다. 해당 시편에서는 증발이 주로 발생하는 멤브레인의 상단 표면까지 물 전달이 제한적으로 고려되기에 낮은 증발 성능이 나타났다. 소수성 표면에 비하여 멤브레인 전체 내외부가 친수의 성격을 가진 S1 시편은 약 250% 향상된 증발 성능을 보여주었다. 이는 증발 표면까지 수월한 물 전달결과에 기인한 것이다. 그리고, 측면부만 소수성 처리된 시편 S3에서는 더 높은 증발 결과를 보여주었으며, S1 대비 30-40% 및 S2 대비 약 400% 향상된 증발 성능을 발생시켰다. 그림 8과 같이, 본 연구에서 가설한 멤브레인 측면부의 소수성 처리는 비이커 내 물로의 열손실을 보완하였기에 높은 증발 성능이 가능하였다.

본 연구에서는 친수성 처리와 소수성 처리가 멤브레인 내/외부에서 증발기작에 각각의 역할을 기대하였다. 즉, 멤브레인 내부 및 상하단

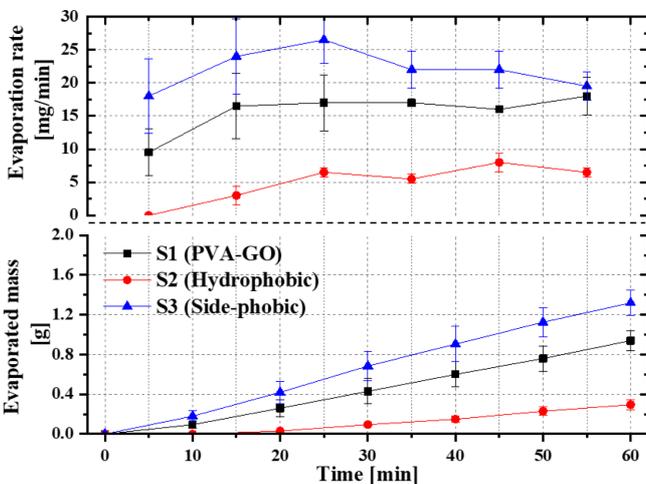


Fig. 7. Evaporated water weight & evaporation rate with tap water under 1 sun irradiation for 1 hour.

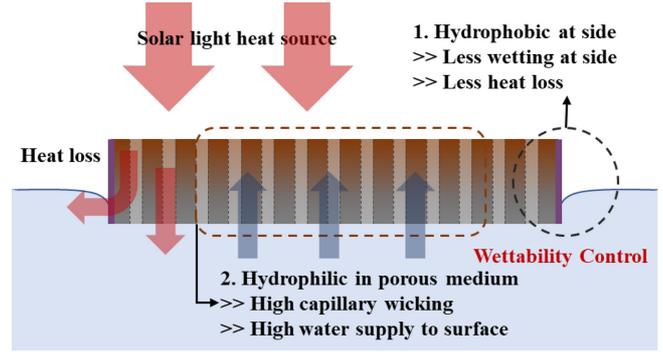


Fig. 8. Schematic Evaporation mechanism on wetting-controlled SSG (Side-phobic).

의 친수성은 원활한 물질 전달을 기대하였으며, 특히 100 μm 범위의 다공성 기공은 멤브레인 내부로 침투하는 물의 모세관 현상을 촉진할 것이라 고려하였다. 또한, 증발이 발생하는 표면에서의 친수적인 특성은 낮은 접촉각을 유지함으로써, 얇은 증발 막을 유발할 것이라 기대 되었다. 이는, 태양열이 집중된 표면에서 더욱 높은 증발 결과를 기대한다. 그리고, 측면부의 소수성 처리는 상단에 집중된 복사열을 비이커 내 물과의 접촉면적을 줄일 뿐만 아니라, 기본적으로 물위에 부유하는 멤브레인의 수면 상 높이를 제어하기에 열손실을 효과적으로 줄여줄 것이라 기대하였다. 이는, 멤브레인 상단에서 비교적 높은 온도를 유지할 것이며, 복사열에 의한 증발 성능을 촉진시킬 것이라 가정하였다. 위와 같이, 친수 및 소수의 특성이 태양열 이용 증발기에서 각각의 기작이 있기에, 최적의 표면 젖음성 제어 요구될 수 있다. 본 연구에서는 앞선 가설의 양극단 조건의 경우(S1 & S2) 및 젖음성이 제한적으로 제어된 시편(S3)을 준비하여 위 가설에 대한 증발 성능 변화를 확인하였다.

#### 3-2. 표면 온도 변화 측정 및 증발량 결과 분석

본 실험에서는 휴대용 열화상 카메라/렌즈를 활용하여, 증발 과정에서 표면온도를 측정하였다. 10분마다 증발량 변화와 더불어 표면 온도 변화를 확인하여 증발성능을 아래와 같이 분석하였다. Fig. 9는

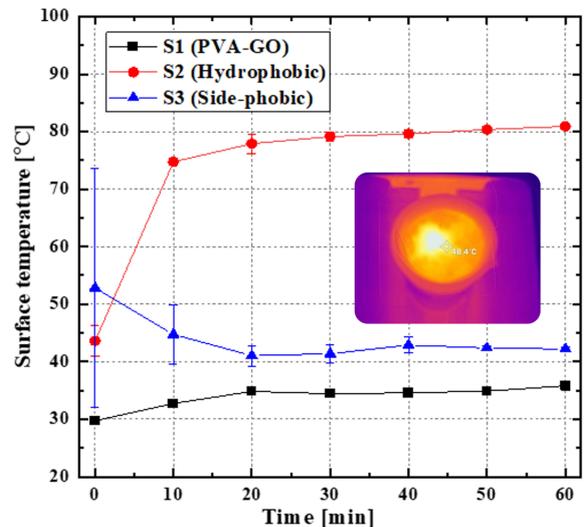


Fig. 9. Temperature variation on the sample's top surface during evaporation test under 1 sun irradiation for 1 hour.

각 시편별로 표면온도 변화를 나타낸다. 우선, 전면이 소수성 표면을 가진 S2에서 가장 높은 표면온도를 보여주었다. 증발 테스트와 함께 10분 안팎의 시간안에 높은 온도로 도달하여 열적 평형을 나타냈다. 앞선 Fig. 4의 수면 상 높이 결과에서 확인할 수 있듯이, 물에 침투된 멤브레인의 부분이 매우 제한적이기 때문에 열손실 측면에서는 최소화된 경우라 볼 수 있지만, 증발되어야 할 물의 전달 또한 제한적이기 때문에 증발 성능에서는 높은 표면온도에도 불구하고 가장 낮은 결과를 보여주었다. 이에 비하여, 친수성 시편(S1) 및 젖음성이 제어된 시편(S2)에서는 낮은 표면 온도를 보여주었다. 앞선 가정에 부응하듯이 S3에서 S1시편 대비하여 8~10 °C 가량 높은 표면 온도를 나타냈다. 위의 결과로 판단하여, 측면부 소수성 처리는 복사열에 대한 열손실을 줄여, 높은 표면온도 유지와 더불어 증진된 증발 성능 낼 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 태양열 기반의 멤브레인 증류법을 이용한 증발 현상을 관찰하였다. 물의 접촉은 증발을 할 때 필수적으로 필요하지만 물의 온도에 의해 열 손실이 일어나는 것을 알 수 있다. 따라서 젖음성 제어를 통해 물과의 접촉을 제한하거나 촉진시켜 물을 증발시키기 적합한 최적의 멤브레인 모델을 찾아보았고, 멤브레인의 하단 부분은 물을 수송할 수 있는 뛰어난 물 투과성을 보여주면서, 멤브레인의 측면 부분은 소수성 코팅으로 물과의 대류로 인한 열 손실을 최소화한 멤브레인을 제작하였다. 그에 따른 최적의 모델의 성능특성을 분석하였고, 젖음성 제어가 태양열 해수 담수화의 증발 효율 향상에 도움이 될 것으로 판단된다. 향후, 계획 및 극복사항으로는 좀 더 정밀히 제어된 표면 처리를 통하여 친수성/소수성 처리의 최적 조건을 제시할 수 있어야 하겠다.

#### 감 사

이 논문은 2019학년도 신입교수정착연구비(경북대학교)에 의하여 연구되었음. 해당 논문은 본 저자들의 2021년도 추계기계학회 포스터 발표 초안에서 시편 분석 및 실험 결과/분석을 보완하여 저널로써 투고됨을 알림.

#### Reference

1. Bandi, C. S., Uppaluri, R. and Global, A. K., "Optimization of MSF Seawater Desalination Processes," *Desalination*, **394**, 30-43(2016).

2. Peñate, B. and García-Rodríguez, L., "Current Trends and Future Prospects in the Design of Seawater Reverse Osmosis Desalination Technology," *Desalination*, **284**, 1-8(2012).
3. Lee, S. J., Hann, T. S. and Park, S. H., "Seawater Desalination Using MOF-incorporated Cu-based Alginate Beads Without Energy Consumption," *Applied Materials & Interfaces*, 16319-16326(2020).
4. Liu, X., Liu, H., Yu, X., Zhou, L. and Zhu, J., "Solar Thermal Utilizations Revived by Advanced Solar Evaporation," *Current Opinion in Chemical Engineering*, **25**, 26-34(2019).
5. Chen, L., Wang, H., Kuravi, S., Kota, K., Park, Y. and Xu, P., "Low-cost and Reusable Carbon Black Based Solar Evaporator for Effective Water Desalination," *Desalination*, **483**, 114412(2020).
6. Yu, K., Shao, P., Meng, P., Chen, T., Lei, J., Yu, X., He, R., Yang, F., Zhu, W. and Duan, T., "Superhydrophilic and Highly Elastic Monolithic Sponge for Efficient Solar-driven Radioactive Wastewater Treatment Under One Sun," *Journal of hazardous materials*, **392**, 122350(2020).
7. Li, Q., Zhao, X., Li, L., Hu, T., Yang, Y. and Zhang, J., "Facile Preparation of Polydimethylsiloxane/carbon Nanotubes Modified Melamine Solar Evaporators for Efficient Steam Generation and Desalination," *Journal of colloid and interface science*, **584**, 602-609(2021).
8. Lee, J. H., Kim, K. W., Park, S. H., Yoon, G. Y., Kim, J. J. and Lee, S. J., "Macroporous Photothermal Bilayer Evaporator for Highly Efficient and Self-cleaning Solar Desalination," *Nano Energy*, **77**, 105130 (2020).
9. Guo, H., Song, Y., Peng, H., Wang, Z., Ouyang, Y., Fu, Z., Wen, Z., Ding, M., Zhu, C. and Wang, C., "High-evaporation Rate Solar Evaporator Based on CuCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Coated Sponges with 3D Interconnected Pores," *Materials Letters*, **279**, 128475(2020).

#### Authors

**Jinwook Choi:** Bachelor's course, Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea; kenny98725@naver.com

**Yongwon Seo:** Bachelor's course, Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea; seoyw6585@naver.com

**Hyeong-Uk Mo:** Master's course, Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea; humo1223@knu.ac.kr

**Seolha Kim:** Assistant Professor, Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea; shkim0731@knu.ac.kr