

## 액적 응축이 이상 밀폐형 써모사이폰의 열성능에 미치는 영향

이강원\* · 김준수\* · 남영석\*†

### Effect of Dropwise Condensation on the Thermal Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon

Kangwon Lee\*, Joon Su Kim\*, Youngsuk Nam\*†

Key Words : Thermosyphon(써모사이폰), Dropwise condensation(액적 응축), Surface modification(표면 개질), Heat transfer coefficient(열전달계수)

#### ABSTRACT

This study investigates the enhancement of thermal performance in a two-phase closed thermosyphon (TPCT) by promoting stable dropwise condensation on the condenser surface. Conventional TPCTs rely on filmwise condensation, which results in additional thermal resistance and degrades overall heat transfer efficiency. To address this, we developed a robust and hydrophobic ceria/PDMS/Teflon composite coating that maintains dropwise condensation even under high heat flux conditions without flooding or coating degradation. A custom-built, half-cylindrical visualization setup allowed in-situ visualization of internal two-phase flow and revealed the influence of condensation mode on system behavior. While dropwise condensation significantly improved local heat transfer coefficients at the condenser, the condensate was returned to the evaporator as a form of discrete droplets rather than a continuous film, resulting in decreased evaporation performance and increased overall thermal resistance. These findings highlight the complex interdependence between condensation and evaporation processes in TPCTs and suggest that surface modification of both sections is essential for overall system optimization.

#### 1. 서론

최근 에너지 수요 증가와 환경 문제가 심화되면서, 전 세계적으로 열관리 기술에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>(1)</sup>. 이에 따라 단순하고 수동적으로 작동하면서도 열전달 효율이 높은 시스템이 요구되고 있으며, 이러한 조건을 만족하는 대안 중 하나로 히트파이프가 주목받고 있다. 이상 밀폐형 써모사이폰(two-phase closed thermosyphon, 이하 TPCT)은 wickless 히트파이프로, 작동유체의 상변화 현상을 이용하여 열을 수동적으로 전달하는 고효율 열전달 장치이다<sup>(2)</sup>. TPCT는 증발부(evaporator), 단열부(adiabatic section), 응축부(condenser)의 세 구간으로 구성된다. 증발부에서는 작동유체가 외부로부터 열을 흡수하여 비등 및 증발을 통해 기화되며, 발생한 증기는 단열부를 거쳐 응축부로 이동한다. 응축부에서는 증기가 응축 과정을 통해 흡수한 열을 방출하

고, 응축된 액체는 중력에 의해 증발부로 환류되어 연속적인 사이클을 완성한다. 이러한 작동 원리에서 TPCT는 증발잠열을 활용하여 적은 온도차로도 다량의 열을 효율적으로 전달할 수 있어 우수한 열전달 성능을 발휘한다<sup>(3)</sup>. 높은 열효율, 단순한 구조, 무동력 작동이라는 장점으로 인해 TPCT는 전자기기 냉각, HVAC 시스템, 폐열 회수 등 다양한 산업 분야의 열관리 기술에 널리 활용되고 있다<sup>(4-6)</sup>.

TPCT의 열성능 향상을 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 대표적으로 작동유체의 종류<sup>(7)</sup>, 외피 재질<sup>(8)</sup>, 경사각<sup>(9)</sup>, 충전율<sup>(10)</sup> 등 주요 설계 인자의 영향을 분석한 연구가 있다. 또한, 상변화 열전달 향상을 목적으로 나노 유체를 작동유체로 적용한 연구<sup>(11)</sup>, 증발부 표면의 친수성 개질<sup>(12)</sup>, 응축부 표면에 다양한 발수 코팅을 적용한 연구<sup>(13)</sup>도 보고되고 있다.

특히, TPCT의 구성 요소 중 응축부는 전체 열성능에 큰 영향을 미치는 구간으로, 응축 형태에 따라 성능 차이가 크

\* 한국과학기술원, 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

† 교신저자, E-mail : ysnam1@kaist.ac.kr

게 나타난다<sup>(14)</sup>. 일반 금속 표면에서 나타나는 막 응축(filmwise condensation)은 표면 전체를 연속적인 액막이 덮어 추가 열저항층을 형성함으로써 응축 열전달 성능이 저하된다. 반면, 발수성 재료로 표면을 개질하면 액적 응축(dropwise condensation)이 유도되며, 액막이 아닌 개별 액적 형태로 나타난다. 액적 응축에서는 액적이 증기의 직접적인 응축과 인접 액적과의 병합을 통해 성장하며, 이후 일정 크기에 도달하면 중력에 의해 표면에서 이탈한다. 이 과정에서 표면의 고체-액체 접촉면적이 최소화되고, 새로운 핵생성 부위가 지속적으로 노출되어 열저항이 감소하며 높은 열전달 효율을 유지할 수 있다. 그 결과, 액적 응축은 막 응축에 비해 열전달 계수가 크게 향상되는 것으로 보고되고 있다<sup>(15)</sup>.

테플론(Teflon)과 같은 플루오르폴리머(fluoropolymer)는 대표적인 발수성 재료로 널리 활용되고 있다. 그러나 대부분의 플루오르폴리머 코팅은 기판과 화학적으로 결합할 수 있는 기능성 작용기가 없어 접착력이 낮다. 이로 인해 블리스터(blisters)나 박리(delamination)가 발생하며 내구성에 한계를 보인다<sup>(16)</sup>. 자기 조립 단분자막(self-assembled monolayers, SAMs) 역시 발수성을 부여하기 위해 흔히 사용된다. 그러나 나노미터 규모의 두께를 갖는 이러한 코팅은 장기간 사용시 기계적·화학적 안정성을 확보하기 어렵다<sup>(17)</sup>.

한편, 기존 TPCT 연구는 응축부와 증발부의 열전달 성능을 각각 독립적으로 향상시키는 데 주로 집중되어 왔다. 그러나, TPCT는 응축부와 증발부 두 구간이 작동유체의 순환을 통해 밀접하게 상호작용하는 시스템이므로, 한 구간의 성능 변화가 다른 구간의 동작에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 기존 연구에 따르면 응축부에 표면을 발수 코팅으로 개질할 경우 증발부 성능이 저하되는 현상이 보고되기도 하였다<sup>(18)</sup>. 그럼에도 불구하고 이러한 상호작용을 통합적으로 고려한 연구는 상대적으로 부족하며, 시스템 전체 관점에서 응축부와 증발부 간 메커니즘에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 선행 연구에서 내구성이 검증된 세리아(ceria) 기반의 발수 코팅을<sup>(19)</sup> 응축부에 적용하여 안정

적인 액적 응축을 구현하고, 이에 따른 응축부 열전달계수와 열저항 변화를 평가하고자 한다. 아울러 응축 모드에 따른 내부 유동의 변화를 가시화하여 비등부에 미치는 영향을 규명하고, 이를 바탕으로 응축부와 증발부 상호작용을 고려한 시스템 열저항 저감 전략을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 시편 제작

내구성 있는 발수 표면을 위해 두 종류의 세리아 기반 코팅을 사용하였다. 첫 번째 코팅은 Ceria/PDMS(이하 CP) 혼합 코팅으로(이하 CP), PDMS(Dow) 6 g을 n-hexane (95%, 덕산씨엔피) 40 g에 첨가한 후 15분간 교반한 후, CeO<sub>2</sub> 나노분말(15–30 nm, Thermo Scientific Chemicals) 10 g을 첨가하여 추가로 2분간 초음파 처리를 하여 용액을 제조하였다. 이후 준비된 용액을 이용하여 TPCT의 응축부를 딥 코팅(dip coating) 방식으로 코팅하였으며, 공정 후 코팅된 표면은 80 °C에서 12시간 동안 경화하였다. 제작된 CP 코팅의 표면 이미지는 Fig. 1a, 단면 SEM 이미지는 Fig. 1b와 같으며, 두께는 약 1.5 μm로 확인되었다.

두 번째 코팅은 Ceria/PDMS/Teflon 혼합 코팅으로(이하 CPT), CP 위에 Teflon 코팅을 추가로 진행하였다. Teflon AF 2400 X-J(Chemours)를 Fluorint FC-40(Sigma-Aldrich) 용매에 질량비 1 : 100으로 첨가한 후, 2시간 교반하여 용액을 제조한 후, 경화된 CP 표면 위에 딥 코팅으로 Teflon AF 코팅을 도포한 후, 80 °C에서 2시간 동안 경화하였다. 얇은 Teflon AF 코팅으로 인해 CP와 CPT 표면의 SEM 형상은 유사하게 관찰되었으며, 본 공정은 기존 CP 코팅의 발수성을 추가적으로 향상시키기 위함이다.

Goniometer(SmartDrop, Femtobiomed)로 접촉각 측정 결과, CP와 CPT 표면의 정적 접촉각(static contact angle)은 각각  $166.7^\circ \pm 1.39^\circ$ ,  $168.7^\circ \pm 1.23^\circ$ 가 나타났다. 전진 접촉각(advancing contact angle)은 각각  $171.7^\circ \pm 1.35^\circ$ ,  $171.5^\circ \pm 2.12^\circ$ , 후퇴 접촉각(receding contact angle)은 각

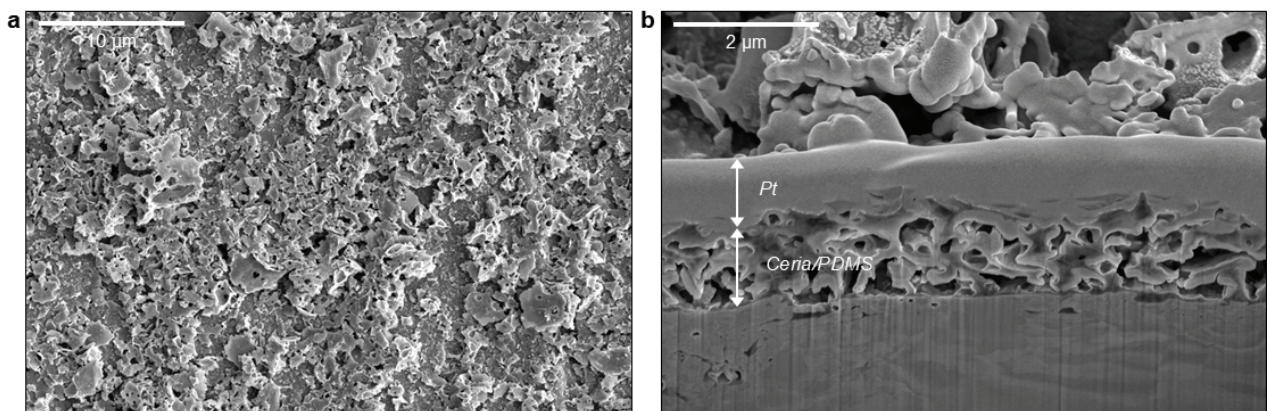


Fig. 1 (a) Top-view and (b) cross-sectional view of the CP coated surface

각  $165.1^\circ \pm 2.17^\circ$ ,  $167.3^\circ \pm 1.21^\circ$ 으로 접촉각 이력은 각각  $6.6^\circ$ ,  $3.1^\circ$ 으로 측정되었다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig. 2a에 나타난 바와 같이 구리 블록에 내경 25 mm, 전체 길이 650 mm의 반원통형 TPCT 채널을 가공하였다. 이러한 구성은 내부 유동을 용이하게 관찰하기 위해 설계되었다. 증발부, 단열부, 응축부의 길이는 각각 245, 160, 245 mm로 설정하였다. 유동 가시화를 위해 두께 15 mm의 평판 Pyrex 유리를 사용하였고, EPDM O-ring과 커버를 이용해 구리 외벽에 고정하였다. 구리 블록 외부는 글라스울로 단열하였다. 응축부 냉각을 위해 Fig. 2b와 같이 직경 8.3 mm의 원형 냉각 유로 4개를 가공하여 칠리(DH-3AE-SO, 대호냉각기)와 순환시켰다. 약  $15^\circ\text{C}$ 의 냉각수는 채널 상단으로부터 240 mm 떨어진 위치에 있는 4개의 유입구로 약 6.5 L/min으로 공급되었으며, 이 중 2개는 구리 블록 좌우 측면에, 나머지 2개는 후면에 배치하였다. 증발부는 균일한 열유속을 공급하기 위해 Fig. 2c와 같이 구리 블록 하부에 길이 245 mm의 카트리지 히터 4개를 삽입하였으며, 히터의 출력은 직류 전원공급장치(N89523A, KEYSIGHT)로 제어하였다. 정밀한 온도 측정과 구간별 열전달 성능을 평가하기 위해 Fig. 2d와 같이 T형 열전대(TJ36-CPSS-116G-12-SMPW-M, OMEGA™)를 등간격으로 삽입하였다. Fig. 2d에 흰색으로 표시한 열전대는 채널 외벽을 관통하여 끝단이 내부로 3 mm 위치하도록 고정하였고, 검정색으로 표시한 열전대는 채널 외벽으로부터 1 mm 떨어진 외부에 배치하였다. 총 20개의 열전대를 등간격으로 배치하였으며, 이 중 8개는 내부 포화온도를, 나머지는 외벽 온도를 측정하였다. 각 구간에서는 검정색으로 표시한 열전대 6개의 값을 이용해 평균 벽면 온도를 계산하였고, 흰색으로 표시한 열전대 3개의 값을 이용해 평균 내부 포화온도를 계산하였다.

#### 3.2 실험 방법

실험은 TPCT를 수평으로 고정한 후, 액체 공급 라인과 진공 라인을 연결하는 것으로 시작하였다. 진공 펌프(GHP-550K, KODIVAC)를 가동하여 챔버 내부 압력이 약 2 mTorr으로 배기하였고, 챔버를 격리한 후 압력 상승량이 분당 2 mTorr 이하가 된 시점에서 실험을 진행하였다. 이는 비응축성 가스가 응축 열전달에 확산 저항을 추가하여 열전달을 저해하여, 불응축 가스의 영향을 최소화하기 위함이다. 이후 상부 배기 밸브를 통해 탈기 챔버(degassing chamber)에 증류수를 주

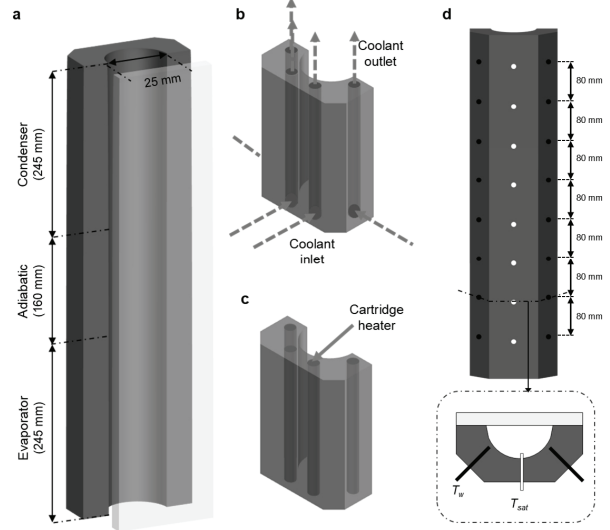


Fig 2. Schematic of the experimental setup for a TPCT. (a) The configuration of the TPCT. (b) Condenser section with coolant flow paths. (c) Evaporator section with the cartridge heaters. (d) The arrangement of the thermocouples along the TPCT

입하고, 직류 전원공급장치(N8741A, Keysight)에 연결된 침지형 카트리지 히터 2개로 2시간 동안 비등시켰다. 비등 증발 발생 증기는 상부 배기 밸브를 통해 외부로 배출하였다. 탈기가 완료되면 히터를 끄고 상부 밸브를 잠겼다. 탈기된 작동 유체는 진공 라인 밸브를 분리 후 내부 채널로 주입하였으며, 액체 주입 라인 밸브를 통해 충전률을 제어하였다. 충전률은 증발부 체적 대비 주입 액체의 체적비로, 본 연구에서는 25%로 설정하였다. 작동 유체를 주입한 후 액체 공급 라인을 분리하고 TPCT를 수직으로 설치하였다. 이어서 칠리를 통해 냉각 유로를 가동하였으며, 증발부 카트리지 히터는 전원 공급장치로 제어하였다. 영상 촬영은 DSLR 카메라(Nikon)로 수행하였다.

#### 3.3 데이터 처리

응축부와 증발부의 열전달계수(heat transfer coefficient, HTC)는 다음과 같이 계산하였다.

$$h_c = \frac{q_{net}}{A_c \Delta T_{sub}} \quad (1)$$

$$h_e = \frac{q_{net}}{A_e \Delta T_{sup}} \quad (2)$$

여기서  $h_c$ 와  $h_e$ 는 각각 응축부와 증발부의 열전달계수를 의미하며,  $q_{net}$ 은 증발부와 응축부 구간을 통과하는 총열전달률이다.  $q_{net}$ 은 증발부에 가해진 열량  $q_{evap} = VI$ 과 응축부에

서 소산된 열량  $q_{cond} = m_c c_{p,c} \Delta T_c$ 의 평균을 이용해서 구했으며 실험 결과 증발부와 응축부에서 열전달률은 평균 3.3%의 차이를 보였으며 이를 통해 실험 시스템의 에너지 보존이 확인되었다. 이에 따라  $q_{net} = \frac{q_{cond} + q_{evap}}{2}$ 으로 정의하였다.  $\dot{m}_c$

는 냉각수의 유량,  $c_{p,c}$ 는 냉각수의 정압 비열,  $\Delta T$ 는 냉각수의 입구와 출구의 온도 차이, 그리고  $I$ 와  $V$ 는 카트리지 히터에 가해지는 전류와 전압이다.  $A_c$ 와  $A_e$ 는 각각 응축부와 증발부의 면적이다.  $\Delta T_{sub}$ 는 벽면의 과냉각(subcooling)으로 정의되며, 이는  $(T_{sat,c} - T_{w,c})$ 로 나타난다. 여기서  $T_{sat,c}$ 는 응축부에서의 내부 유체 포화온도이며,  $T_{w,c}$ 는 응축부 벽면 온도이다. 마찬가지로  $\Delta T_{sup}$ 는 증발부 벽면 과열(superheat)을 의미하며  $(T_{sat,e} - T_{w,e})$ 로 정의된다. 여기서  $T_{sat,e}$ 는 증발부에서의 내부 유체 포화온도,  $T_{w,e}$ 는 증발부 벽면 온도이다. TPCT의 열성능은 총 열저항을 계산함으로써 평가하였다.

$$R_{th} = \frac{T_{w,e} - T_{w,c}}{q_{net}} \quad (3)$$

여기서 총 열저항은 응축부와 증발부의 상변화 열전달계수에 의해 결정되는  $R_c$ 와  $R_e$ , 그리고 양 끝단 사이의 유체 압력 강하에 의해 발생하는  $R_{vapor}$ 로 구성된다. 식 (3)에서는 히터에서 발생한 모든 열이 상변화 과정을 통해 전달된다고 가정하였다. 즉, 유리 외벽을 통한 열손실이나 구리 본체를 통한 축 방향 열전도는 무시하였다. 이러한 가정은 수치 시뮬레이션 분석을 통해 검증되었다<sup>(20)</sup>. 또한, 증발부와 응축부의 HTC 및 전체 열저항의 불확도는 오차 전파법을 통해 산정하였다.

### 3.4 모델

증발부 열전달계수는 물-구리 조합에 대한 Rohsenow 핵플 비등(nucleate pool boiling) 모델을 적용하여 산정하였다<sup>(21)</sup>.

$$\frac{c_{p,l} \Delta T_{sup}}{h_{fg}} = 0.017 \left[ \frac{q''_e}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{\gamma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} Pr \quad (4)$$

여기서  $c_{p,l}$ 은 물의 비열,  $h_{fg}$ 는 증발 잠열,  $q''_e$ 는 증발부 열유속,  $\mu_l$ 는 물의 점도,  $\gamma$ 는 물-증기 계면의 표면장력,  $\rho_l$ 는 액체 밀도,  $\rho_v$ 는 증기 밀도,  $Pr$ 는 Prandtl 수를 나타낸다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 열전달 특성 및 거동

실험 대조군으로는 Teflon AF 코팅 응축부를 갖는 TPCT(이하 Teflon)와 아무 개질 하지 않은 친수성 구리 응축부를 갖는 TPCT(이하 bare)도 제작하였다. Fig. 3는 bare, CP, Teflon AF, CPT TPCT 응축부에서 열유속 변화에 따른 응축 거동을 나타낸다. Bare에서는 응축이 일어나면서 표면에 전체적으로 액막이 형성되는 것을 확인하였다(Fig. 3a). CP는 낮은 열유속( $< 20 \text{ kW/m}^2$ )에서는 액적 형태로 응축이 나타났으나, 열유속이 증가함에 따라 flooding 영역이 점차 확대되었고,  $60 \text{ kW/m}^2$ 에 도달했을 때는 표면 전체가 막 응축에 가까운 형태로 전환되었다(Fig. 3b). 이는 CP의 다공성 구조와, 표면 발수성이 탄화수소 흡착이라는 불안정한 메커니즘에 기인한 것으로 추정된다<sup>(19)</sup>. 반면, Teflon에서는 안정적인 액적 응축이 관찰되었다. 수많은 미세한 액적이 성장한 뒤 중력에 의해 미끄러져 떨어지는 거동을 보였다. 이 과정에서 미끄러지는 액적이 주변 액적을 함께 끌어내어 표면에 재핵생성을 촉진하였다. 그러나 표면의 미세한 핀홀(pinhole) 내부에서도 응축이 진행되며 블리스터가 형성되었다(Fig. 3c). 열유속 증가와 함께 블리스터도 성장하였고, 최종적으로 코팅 박리로 이어져 표면의 내구성이 충분하지 않음을 확인하였다. 이는 코팅의 낮은 접착력에 기인한 것으로, 플루오르폴리머 계열 코팅에서 일반적으로 보고되는 현상이다<sup>(16)</sup>. 한편, CPT에서는  $60 \text{ kW/m}^2$ 에서도 안정적인 액

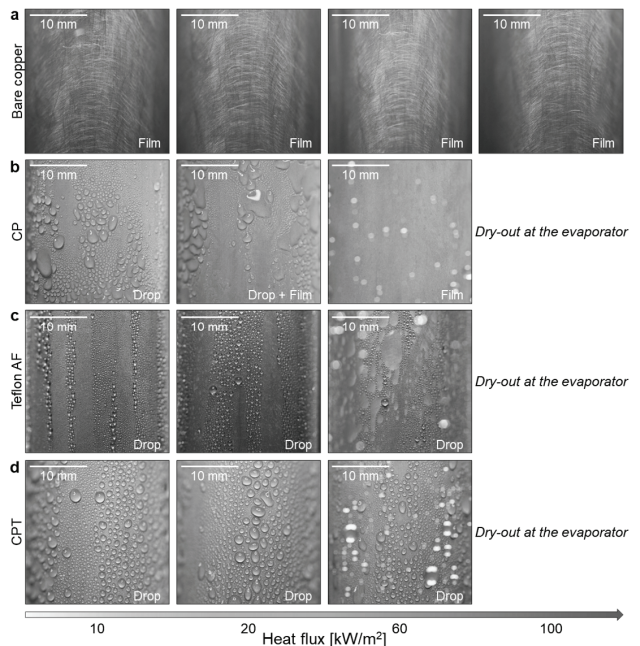


Fig. 3 Condensation behavior of the (a) bare copper, (b) CP, (c) Teflon AF, (d) CPT coated TPCTs at various heat fluxes

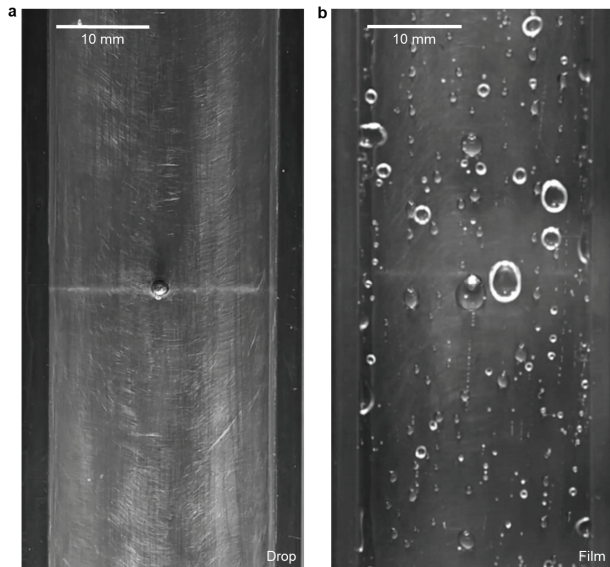


Fig. 4 Condensate transport behavior in the adiabatic section for (a) filmwise condensation and (b) dropwise condensation

적 응축을 유지하였다(Fig. 3d). CP에서 관찰된 flooding 현상이나 Teflon의 블리스터와 박리 문제없이 우수한 내구성을 보였다.

한편, bare TPCT는 100 kW/m<sup>2</sup>에서도 dry-out이 일어나지 않은 반면, 응축부에 발수 코팅이 된 TPCT에서는 상대적으로 낮은 열유속에서도 증발부의 dry-out이 관찰되었다. 이는 응축 모드에 따른 응축부에서 증발부로 액체가 이동하는 방식의 차이에서 기인한 것으로 추정된다. Bare TPCT에서는 막 응축으로 인해 응축수가 표면을 따라 연속적인 액막을 형성하며 증발부로 공급되었다. 반면, 발수 코팅이 적용된 표면에서는 액적 응축이 발생하여 응축수가 개별 액적 형태로 미끄러져 내려갔고, 그 결과 증발부에서도 액적 형태로 불연속적인 표면 젖음이 나타났다. 이러한 불연속적인 액체 공급은 증발부의 열전달 효율을 저하시키고 국부적인 과열을 유발하여 dry-out의 원인이 된 것으로 추정된다(Fig. 4). 따라서, 액적 응축이 응축부 열성능 향상에는 기여할 수 있으나, TPCT와 같이 응축부와 증발부간 직접적으로 연계되는 시스템에서는 오히려 증발부 dry-out을 촉진하는 요인이 될

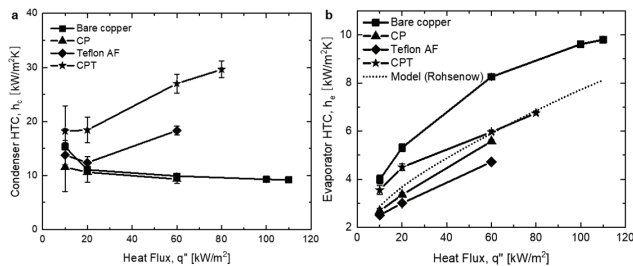


Fig. 5 (a) Condenser and (b) evaporator heat transfer coefficient as a function of heat flux

수 있음을 보여준다.

#### 4.2 열전달 성능

Fig. 5a는 TPCT의 응축부 열전달 성능을 보다 정밀하게 평가하기 위해 산출한 응축부 열전달계수  $h_c$ 를 나타낸 것이다. Bare TPCT(사각형)는 열유속이 증가함에 따라 액막의 두께도 함께 증가하여 전도 저항이 크게 작용하였고, 그 결과 응축부 열전달계수는 감소하여 약 9 kW/m<sup>2</sup> · K의 낮은 값을 보였다. CP TPCT에서는 코팅의 열저항과 flooding에 의해 응축부 열전달계수가 bare TPCT와 비슷하게 나타났다. 반면, Teflon TPCT에서는 액적 응축에 의해 응축부 열전달계수가 60 kW/m<sup>2</sup>에서 약 18 kW/m<sup>2</sup> · K로 향상된 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 블리스터와 코팅 박리에 의해 향상의 한계를 보였다. 마지막으로, CPT TPCT는 다른 표면들에 비해 월등히 높은 응축부 열전달 성능을 나타냈다. 60–80 kW/m<sup>2</sup>의 열유속 환경에서 열전달계수가 29–30 kW/m<sup>2</sup> · K로 bare copper TPCT에 비해 약 3배 향상된 성능을 보였다.

반면 증발부 열전달계수  $h_e$ 는 다른 경향을 보였다. 모든 경우에서 열유속이 증감함에 따라 비등도 활발해졌고 증발부 열전달계수 또한 함께 증가하였다. 하지만 bare TPCT의 증발부 열전달계수가 4–9.8 W/m<sup>2</sup> · K가 나타난 반면, CP, Teflon, CPT TPCT는 각각 2.7–5.6, 2.5–4.7, 3.5–6.8 W/m<sup>2</sup> · K로 상대적으로 낮게 나타났다. 또한, 열유속이 증가함에 따라 dry-out도 발생하였다. 모든 TPCT가 같은 증발부 표면을 가졌음에도 불구하고, 이러한 차이는 응축 모드에 따른 액체 공급 형태의 차이가 증발부의 증발 열전달 효율에 영향을 미친 결과로 추정된다. Fig. 5b의 검은색 점선은 Rohsenow 핵 풀 비등 모델을 나타내며, 증발에 의한 열전달이 상대적으로 적게 발생하는 TPCT 결과가 이에 근접한

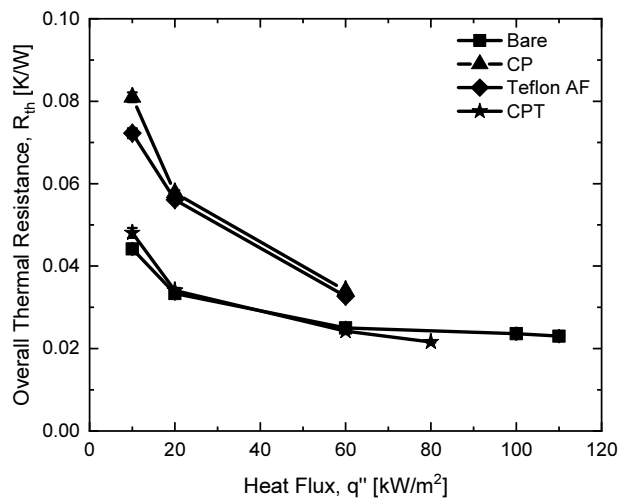


Fig. 6 Overall thermal resistance of different surface modified TPCTs as a function of heat flux

점에서 이를 뒷받침한다.

Fig. 6은 열유속에 따른 전체 열저항  $R_{th}$ 의 변화를 나타낸다. 모든 경우에서 열유속이 증가함에 따라 열저항이 감소하였다. 이는 열유속이 증가할수록 증발부에서 비등이 활발해지는 동시에 응축부에서 응축도 촉진되었기 때문이다. 그러나 CP와 Teflon TPCT는 증발부 열전달계수의 감소로 인해 모든 구간에서 bare copper TPCT보다 높은 열저항을 나타내었다. CPT TPCT 또한  $10 \text{ kW/m}^2$ 에서는 증발부 열전달계수의 저하로 인해 열저항이  $0.048 \text{ K/W}$ 로 bare TPCT보다 8.8% 높게 나타났다. 그러나  $60 \text{ kW/m}^2$ 부터 향상된 응축부 성능으로 인해 상대적으로 낮은 증발부 성능에도 불구하고 열저항이  $0.024 \text{ K/W}$ 로 bare copper TPCT보다 3.2% 감소하였고, 이후 격차는 더욱 확대되었다. 다만, 열유속이  $80 \text{ kW/m}^2$ 를 초과할 경우 증발부에서 dry-out이 발생하여 열전달 성능이 제한되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 이상 밀폐형 써모사이폰의 응축부 표면에 세리아 기반 발수 코팅을 적용하여 액적 응축을 유도하고, 이에 따른 열전달 특성과 시스템 거동을 분석하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 응축부의 경우, CPT TPCT에서 안정적인 액적 응축을 통해 bare TPCT 대비 최대 약 209% 향상된 응축부 열전달계수를 확보하였다.
- 2) 반면, 응축부에서 형성된 액적이 불연속적으로 증발부로 이동하면서 증발부 표면의 젖음성이 저하되었고, 이에 따라 증발부 열전달계수가 감소하며 bare TPCT보다 낮은 열유속에서도 dry-out이 발생하였다. 이는 응축부 성능 향상이 전체 시스템 성능 저하로 이어질 수 있음을 시사한다.
- 3) 이러한 한계를 극복하기 위해서는 증발부 표면에 액적을 효과적으로 퍼뜨릴 수 있는 표면 개질 전략이 효과적일 것으로 예상된다. 응축부에서의 액적 응축 특성과 증발부에서의 액적 공급 특성을 동시에 최적화한다면, TPCT의 전체 열성능을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 지원을 받아 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(과제번호: 20212020800270)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- (1) Zhang, Z., Wang, X., and Yan, Y., 2021, "A review of the state-of-the-art in electronic cooling," *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Vol. 1, p. 100009.
- (2) Zohuri, B., 2011, "Heat pipe design and technology," FL: Taylor and Francis Group, LLC.
- (3) Noie, S., 2005, "Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 495-506.
- (4) Jouhara, H., and Merchant, H., 2012, "Experimental investigation of a thermosyphon based heat exchanger used in energy efficient air handling units," *Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 82-89.
- (5) Eidan, A. A., Najim, S. E., and Jalil, J. M., 2016, "Experimental and numerical investigation of thermosyphon performance in HVAC system applications," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 12, pp. 2879-2893.
- (6) Abd El-Baky, M. A., and Mohamed, M. M., 2007, "Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning," *Applied thermal engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 795-801.
- (7) Jouhara, H., and Robinson, A. J., 2010, "Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283," *Applied thermal engineering*, Vol. 30, No.2-3, pp. 201-211.
- (8) Baojin, Q., Li, Z., Hong, X., and Yan, S., 2009, "Heat transfer characteristics of titanium/water two-phase closed thermosyphon," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 9, pp. 2174-2179.
- (9) Kim, Y., Shin, D. H., Kim, J. S., You, S. M., and Lee, J., 2019, "Effect of sintered microporous coating at the evaporator on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 131, pp. 1064-1074.
- (10) Kim, Y., Shin, D. H., Kim, J. S., You, S. M., and Lee, J., 2018, "Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 145, pp. 328-342.
- (11) Khandekar, S., Joshi, Y. M., and Mehta, B., 2008, "Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 6, pp. 659-667.
- (12) Ng, V. O., Yu, H., Wu, H. A., and Hung, Y. M., 2021, "Thermal performance enhancement and optimization of two-phase closed thermosyphon with graphene-nanoplatelets coatings," *Energy Conversion and Management*, Vol. 236, p. 114039.

- (13) Seo, D., Park, J., Shim, J., Nam, J., Shin, D. H., Nam, Y., and Lee, J., 2021, "Enhancing heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon using a polymer-coated hydrophobic condenser," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 196, p. 117350.
- (14) Carey, V. P., 2020, *Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment*, CRC Press.
- (15) Rose, J., 2002, "Dropwise condensation theory and experiment: a review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 216, No. 2, pp. 115-128.
- (16) Ma, J., Cha, H., Kim, M. K., Cahill, D. G., and Miljkovic, N., 2019, "Condensation induced delamination of nanoscale hydrophobic films," *Advanced Functional Materials*, Vol. 29, No. 43, p. 1905222.
- (17) Wang, R., Jakhar, K., Ahmed, S., and Antao, D. S., 2021, "Elucidating the mechanism of condensation-mediated degradation of organofunctional silane self-assembled monolayer coatings," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 13, No. 29, pp. 34923-34934.
- (18) Seo, D., Park, J., Shim, J., Nam, J., Shin, D. H., Nam, Y., and Lee, J., 2021, "Effects and limitations of superhydrophobic surfaces on the heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 176, p. 121446.
- (19) Shim, J., Oh, S., Kim, S., Seo, D., Shin, S., Lee, H., Ko, Y., and Nam, Y., 2023, "Long-lasting ceria-based anti-frosting surfaces," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 140, p. 106550.
- (20) Seo, D., Kim, Y., Seo, J. H., Shin, D. H., Nam, Y., and Lee, J., 2021, "Modeling and optimization of hydrophobic surfaces for a two-phase closed thermosyphon," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 165, p. 120680.
- (21) Rohsenow, W. M., 1952, "A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids," *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 74, No. 6, pp. 969-975.