



테플론 코팅과 오일 담지를 이용한 알루미늄 양극산화피막의 응축 열전달 향상

강민주¹, 이종훈¹, 차수진¹, 신예지¹, 김동현², 김경자², 이정훈^{1*}

¹부경대학교 금속공학과
²한국세라믹기술원 기업지원본부

Enhancement of Condensation Heat Transfer of Anodized Aluminum by Teflon Coating and Oil-Impregnation

Minjoo Kang¹, Jonghoon Lee¹, Soojin Cha¹, Yeaji Shin¹, Donghyun Kim², Kyung-Ja Kim², Junghoon Lee^{1*}

¹Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Republic of Korea

²Business Support Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Republic of Korea

(Received 14 April, 2021 ; revised 25 April, 2021 ; accepted 28 April, 2021)

Abstract

Surface modification technique enabling the control of condensation provides various benefit in various engineering systems, such as heat transfer, desalination, power plants, and so on. In this study, lubricant oil-impregnation into Teflon-coated nanoporous anodic oxide layer of aluminum to enhance a de-wetting and mobility of water droplet on surface. Due to the surface treatment improving water-repellency, the condensation mode is changed to dropwise, thus the frequency of sliding condensed water droplet on surface is increased. For these reasons, the surface of oil-impregnated Teflon-coated nanoporous anodic aluminum oxide shows significantly enhanced condensation heat transfer compared to bare aluminum surface. In addition, the porosity of anodic aluminum oxide affected the mobility of water droplet even with oil-impregnation and Teflon-coating, indicating that the optimization of porous structure of anodic oxide is required for maximizing the condensation heat transfer.

Keywords : Condensation Heat Transfer; Anodic Aluminum Oxide; Hydrophobic; Nanoporous Structure

1. 서 론

응축(Condensation)은 어디서나 일어날 수 있는 기체에서 액체로의 상변화 현상으로 에너지와 관련된 담수화, 우수저장, 증기발전, 환경제어 및 전자부품의 열제어 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히, 응축

열전달(Condensation Heat Transfer)은 고온의 수증기를 빠르게 냉각시키기 위하여 활용되고 있다 [1-3]. 고온의 수증기가 차가운 고체 표면에서 응축되면서 잠열을 회수하여 환경을 제어하는 것이다. 이 때, 고체 표면에서 수증기의 응축은 적상응축(Dropwise Condensation)과 막상응축(Filmwise Condensation)으로 나눌 수 있다. 적상응축은 고체 표면에 작은 액적의 형태로 부착되는 반면, 막상응축은 응축된 물이 고체 표면을 전체를 적셔 얇은 피막을 이루는 것이다 [4, 5]. 막상응축으로 형성된 얇은 수막(Water Film)은 차

*Corresponding Author: Junghoon Lee
Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University
Tel: +82-51-629-6345; Fax: +82-51-629-6339
E-mail: jlee1@pknu.ac.kr

가운 고체 표면과 수증기 사이의 온도 구배를 감소시키는 역할을 하고, 수증기와 고체 표면의 직접적인 접촉을 억제하기 되어, 응축 열전달을 감소시킨다. 반면, 적상 응축의 경우, 작은 액적의 형태로 응축되어 수증기와 고체 표면이 직접 접촉하는 부분이 언제나 존재하며, 액적(Droplet)은 그 크기에 따라 중력에 의해 이동하여 고체 표면에서 제거될 수 있다. 따라서, 응축 열전달을 위해서는 적상응축이 막상응축보다 바람직하다고 볼 수 있다[6, 7].

고체 표면이 물에 대한 젖음성이 낮은 소수성을 보일 때 적상응축의 형태를, 물에 대한 젖음성이 높은 친수성을 보일 때 막상응축의 형태를 보여준다[8]. 또한, 고체 표면에서 응축된 물방울의 이동성이 높을수록 작은 크기의 물방울이 쉽게 표면에서 제거되어 응축 열전달의 효율을 높여줄 수 있다. 따라서, 열전도도가 높은 금속 표면에 물방울의 이동성이 높은 소수성 표면을 구현하여 응축 열전달에 활용할 수 있다.

본 연구에서는 열전도도가 높은 알루미늄합금의 응축 열전달 성능을 향상시키기 위한 윤활유를 침지하는 소수성 표면처리를 양극산화 처리된 알루미늄합금 표면에 적용하였다[9, 10]. 알루미늄합금의 양극산화로 형성되는 나노다공성 표면 피막에 얇은 테플론을 코팅하고 과불화화합물 윤활유를 침지함으로써 물에 대한 높은 저항성 및 이동성을 구현하였다[11, 12]. 이러한 처리를 통하여 알루미늄합금의 응축 열전달 효율을 향상시킬 수 있는지를 확인하기 위하여 응축으로 인한 전달되는 열량을 측정하는 장치를 제작하여 평가하였다. 또한, 양극산화피막의 기공 구조를 제어하여 그 효과를 극대화하는 연구를 실시하였다.

2. 실험방법

알루미늄합금 1050 판재(두께: 1 mm)를 3 cm × 3 cm 크기로 절단하여 시료로 사용하였다. 양극산화처리 전 아세톤에서 탈지를 하였고, 그 후 25 vol.% HClO₄가 용해된 20 °C 에탄올에서 25 V로 10 분간 전해연마를 실시하였다. 알루미늄합금 시료를 0 °C의 0.3 M 옥살산(Oxalic Acid) 전해액에서 40 V를 30분간 인가함으로써 양극산화를 실시하였다. 나노다공성 양극산화피막의 기공의 크기를 조절하기 위하여 30 °C의 0.1 M H₃PO₄ 수용액에서 20, 40, 60, 80 분간 침지하였다.

제작된 양극산화 샘플은 테플론 용액(0.2 wt. % AF1600 in perfluoro-compound FC-75)에 침지 후 250°C에서 10분동안 처리함으로써 표면에 소수성을 부여하였다. 이 때 형성되는 테플론의 두께는 약 2~3 nm정도의 수준으로 표면의 형상에 크게 영향을 미치지 않는다. 그 후 과불화 화합물 윤활유(Krytox GPL 103, Dupont)에 샘플을 침지 하여 표면의 나노구조물에 윤활유가 스며들도록 하였다. 표면에 과도하게 잔류하는 윤활유는 압축공기를 이용하여 제거하였다.

표면 형상을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)를 사용하였다. 처리된 표면의 액체에 대한 젖음성 및 이동성을 SmartDrop으로 측정하였으며, 이 때 5 μL의 물방울(표면장력: 72 mN/m)을 이용하였다. 응축 열전달에 대한 평가는 직접 제작한 장치를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

알루미늄합금의 양극산화 피막은 나노 스케일의 기공 형상의 규칙적으로 배열된 기공을 포함하고 있다. 일반적으로 0 °C부근의 저온에서 정전압(Constant Voltage)로 형성된 양극산화피막의 경우 기공률이 5% 내외로 윤활유가 담지 될 수 있는 기공의 공간이 매우 적다. 따라서, 담지되는 윤활유의 양을 늘리기 위해서는 기공의 직경을 넓히는 처리가 필요하여 30 °C의 0.1 M H₃PO₄ 용액에 양극산화된 알루미늄합금을 침지하여 나노다공성 구조를 제어하였다 [13, 14]. 또한, 나노다공성 산화피막과 담지하는 과불화화합물 윤활유와 화학적 친화도를 높이고, 물에 대한 젖음성을 억제하기 위하여 얇은 테플론을 코팅하였다 [9, 11]. 그 후 과불화화합물 윤활유 Krytox GPL 103을 담지 하였는데, 기공 내부까지 완전히 채우기 위하여 순차적으로 용매를 바꾸어가면서 담지 하는, 용매교환법을 사용하였다. 이렇게 제작된 표면에 물이 접촉했을 때 고체의 나노다공성 피막에 접촉하지 못하여 쉽게 이동하는 특징을 보여준다. 이러한 시료 제작 과정을 그림 1에 간략히 나타내었다.

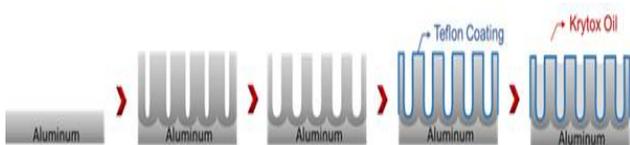


Fig 1. Schematic procedure for sample preparation with anodic oxidation, pore widening, Teflon coating and oil-impregnation..

그림 2에는 알루미늄 양극산화피막을 30 °C의 0.1 M H₃PO₄ 용액에 침지 시간에 따른 기공의 형상을 나타내고 있다. 양극산화만으로 형성된 피막에 기공의 직경은 11.3 ± 1.2 nm이고, 표면에서 기공이 차지하는 면적의 비율인 기공률은 1.1 %이다. 이러한 양극산화피막을 10 °C의 0.1 M H₃PO₄ 용액에 침지 후 20분 뒤에는 기공의 직경이 31.9 ± 2.3 nm, 40분 뒤에는 기공의 직경이 52.3 ± 3.1 nm, 60분 뒤에는 기공의 직경이 70.7 ± 4.3 nm, 80분 뒤에는 기공의 직경이 89.9 ± 7.1 nm로, 침지 시간이 길어짐에 따라 기공의 크기가 증가한다. 고정된 기공 사이의 거리에서 기공의 직경이 커짐에 따라 기공률 역시 증가하는데, 20분에는 8.2 %, 40분에는 24.8 %, 60분에는 44.3 %, 80분에는 78.3 %로 측정 되었다. 따라서, 기공률이 높아짐에 따라서, 더 많은 양의 윤활유가 침지되며, 윤활유로 채워진 표면의 비율이 높아진다는 것을 알 수 있다 [10].

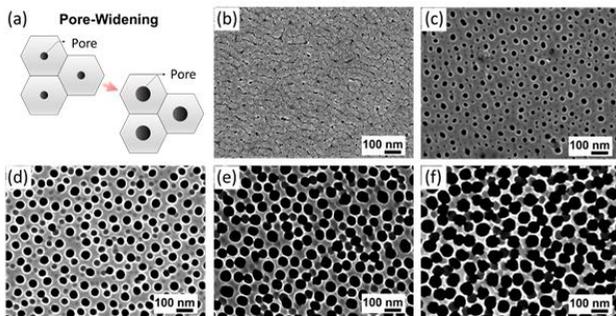


Fig 2. (a) Schematic procedure of pore-widening. Surface morphology of (a) as anodized surface and the surface with pore-widening for (c) 20 min, (d) 40 min, (e) 60 min and (f) 80 min.

이렇게 기공의 크기가 제어된 시료의 표면에 소수성의 테플론을 코팅하고 그 기공에 Krytox GPL 103 윤활유를 침지하였고, 제작된 표면의 물방울에 대한 젖음성을 평가하기 위하여, 접촉각, 접촉각 이력 및 구름각(Sliding Angle)을 측정하여 그림 3에 나타내었다. 양극산화로 인하여 친수성의 산화물이 다공성으로 형성된 알루미늄 표면은 접촉각이 크게 감소한다. 또한, 알루미늄의 금속성 표면 역시 친수성을 가지기 때문에, 양극산화 처리만 실시된 시료와 동일하게 표면의 기울어짐에 따라 물방울의 어떠한 움직임도 관찰할 수 없고, 접촉각의 이력 역시 30°이상으로 높은 편이다. 그러나, 박막의 테플론을 코팅 후 윤활유 침지로 인하여 접촉각은 120° 정도로 크게 증가한다. 이는, 물방울과 다공성 산화물 표면의 계면에 윤활유 막이 형성되기 때문이고, 이로 인하여

물방울은 매우 쉽게 이동하게 된다. 그 결과 낮은 접촉각 이력과 구름각을 보여준다. 그러나, 기공의 크기를 넓히는 처리를 실시하지 않은 경우(AAO-1)는 그 낮은 기공률로 인하여 윤활유가 담지 될 수 있는 공간이 적어 표면의 물방울이 다소 양극산화피막의 표면과 접촉하는 것으로 보인다. 따라서, AAO-1은 윤활유가 담지된 표면들 중 가장 높은 접촉각 이력과 구름각을 보여준다. 물방울의 이동성을 나타내는 구름각과 접촉각 이력은 기공을 넓히는 공정의 시간이 길어질수록 줄어들다가 60분(AAO-4)에서부터 다시 증가한다. 이러한 물방울의 이동성 차이는 기공구조의 형상, 기공률 및 다공성구조/액적 사이의 계면의 차이에 기인한다 [15, 16]. 본 연구에서는 인산에서 기공을 넓히는 40분간의 처리를 실시한 구조(AAO-3)가 물방울에 대하여 가장 높은 이동성을 보여준다.

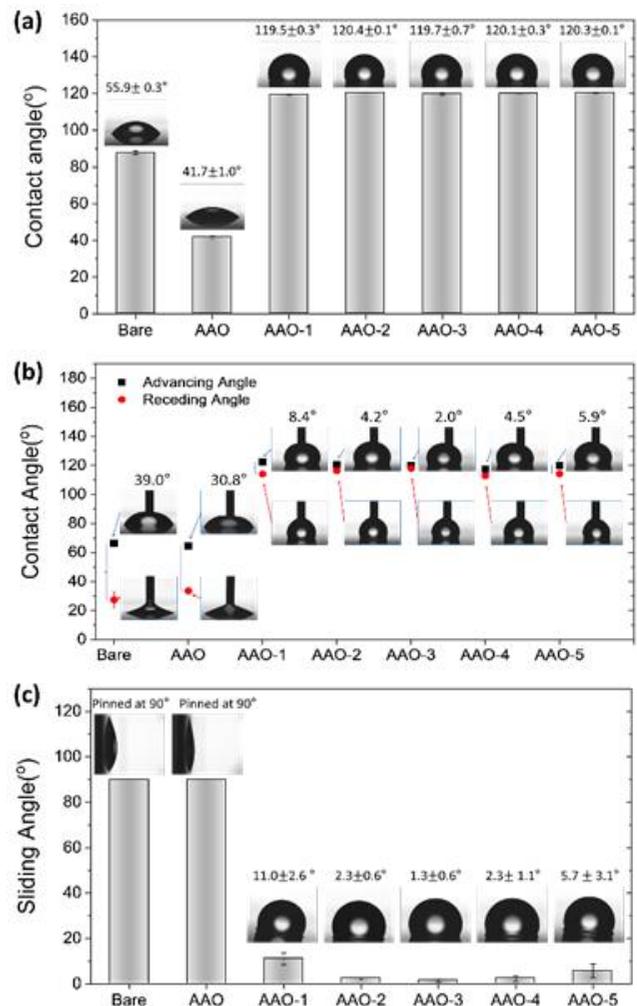


Fig 3. (a) Static contact angle, (b) contact angle hysteresis (advancing contact angle - receding contact angle) and (c) sliding angle of water droplet. Bare and AAO indicate the electropolished aluminum and as anodized surface, respectively. AAO-1, AAO-2, AAO-3, AAO-4 and AAO-5 indicate the oil-impregnated Teflon coated anodic aluminum oxide without, with 20 min, with 40 min, with 60 min and with 80 min pore-widening, respectively.

이러한 표면에서 응축을 통한 열전달을 측정하기 위하여 실험장치를 제작하였다(그림 4). 99 °C로 가열된 수조에 아크릴로 제작된 커버를 씌워 내부의 습도가 포화상태가 되도록 하였고, 그림 4(b)와 같은 열량 측정 장치를 제작하여 아크릴 커버에 장착하였다. 열량측정장치는 순 구리 블록으로 제작되었고, 샘플이 부착되는 표면에서 1cm 간격으로 열전대를 부착하였다. 구리 블록의 샘플 반대 부분은 20 °C의 냉각수가 순환되어 샘플의 표면 온도를 냉각시킬 수 있도록 하였다. 또한, 구리 블록을 테플론 블록으로 감싸 열 손실을 최소화 하였다. 실험 과정에서는 시료를 구리 표면에 서멀 그리스를 이용해 부착한 후, 2시간 뒤 1 cm 간격으로 삽입된 열전대의 온도가 안정 되었을 때를 기록하여, 구리 내부로 전달되는 열량을 측정하였다 [17, 18]. 이와 동시에 디지털 카메라를 이용하여 샘플의 표면에 응축되는 물방울의 크기와 증력에 의해 아래로 미끄러져 제거되는 빈도를 측정하였다.

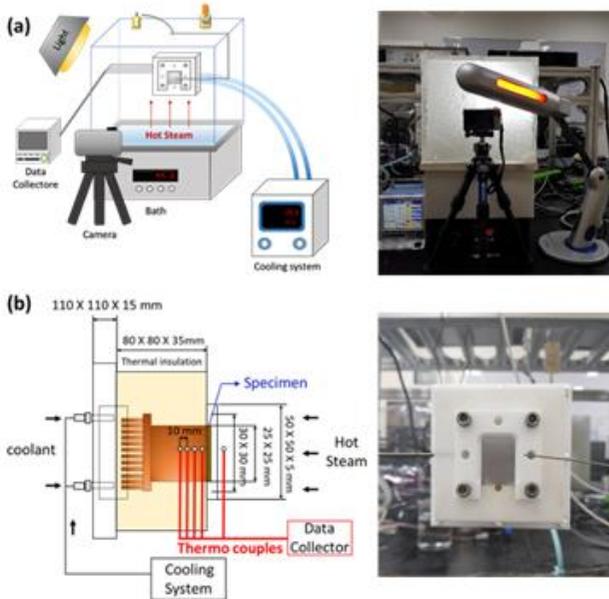


Fig 4. (a) Schematic and optical image of test setup. (b) Schematic cross-section of copper meter bar and optical image of meter bar with sample attachment.

각 샘플에 따라 측정된 열전대의 위치에 따른 온도를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에는 구리 블록에 부착된 샘플의 단면을 나타내고 있다. 샘플과 가장 가까운 열전대는 구리 블록의 표면에서 1 mm 정도 떨어진 곳에 위치하며, 그 다음 1 cm 간격으로 총 4개의 열전대가 배치되어 있다. 샘플의 반대쪽에서 냉각되고 있기 때문에 샘플에서 멀어질수록 열전대의 온도가 감소한다. 각 그래프에 표시된 결과는 선형으로

피팅(fitting)해 기울기를 구하여 그림 5에 함께 나타내었다 [17]. 이 때, 응축으로 인한 열 전달이 많을수록 각 열전대의 온도차이가 증가하여 온도 vs. 거리 좌표의 기울기가 커진다. 알루미늄 모재에 양극산화가 적용된 경우 온도 기울기가 더 낮아지지만, 양극산화된 표면에 테플론 코팅과 오일이 담지가 적용된 후 온도 기울기는 커진다. 특히, 구름각과 접촉각 이력이 가장 낮았던 인산에서 기공을 넓히는 40분간 처리한 구조(AAO-3)와 60분간의 처리를 실시한 구조(AAO-4)에서 가장 가파른 온도 구배를 보여준다.

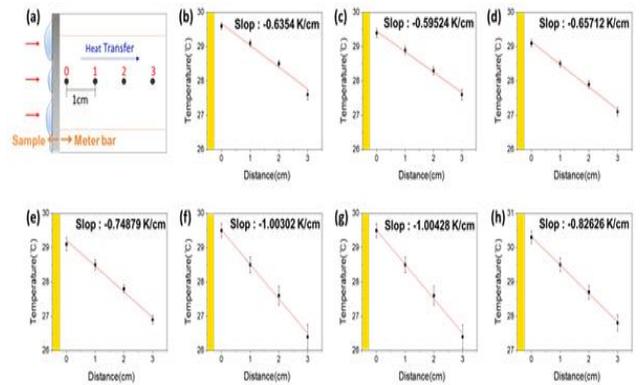


Fig 5. (a) Schematic cross-sectional temperature profile. Measured temperature of each thermocouple in copper meter bar with (b) bare aluminum, (c) as anodized aluminum, (d) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide without pore-widening, (e) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 20 min of pore-widening, (f) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 40 min of pore-widening, (g) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 60 min of pore-widening, (h) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 80 min of pore-widening.

그림 5에 나타난 좌표의 기울기에 20 °C부근에서 구리의 열전도도 (400 W/m·K)를 곱하면 샘플의 표면에서 응축을 통하여 전달되는 열량을 구할 수 있으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 알루미늄 모재의 경우 평균적인 응축 열전달량은 2.54 W/m²이고, 양극산화 후 다소 감소한 2.38 W/m²으로 측정되었다. 양극산화된 표면에 테플론 코팅과 윤활유 침지가 적용되면 응축 열전달량은 2.63 W/m²으로 다소 증가하지만, 20분간 인산에서 기공을 넓힌 양극산화피막을 활용한 표면은 크게 증가하여 3.31 W/m²로 측정 되었다. 40분과 60분간 기공을 넓히는 처리를 실시한 양극산화피막에 테플론 코팅과 윤활유 침지를 적용하면 응축 열전달량은 4.02와 4.01 W/m²로 크게 증가한다. 그러나 60분간 처리한 경우 오히려 응축 열전달량이 2.99 W/m²로 오히려 낮아진다.

Table 1. Summarized condensation heat transfer. Bare and AAO indicate the electropolished aluminum and as anodized surface, respectively. AAO-1, AAO-2, AAO-3, AAO-4 and AAO-5 indicate the oil-impregnated Teflon coated anodic aluminum oxide without, with 20 min, with 40 min, with 60 min and with 80 min pore-widening, respectively.

Sample	Bare	AAO	AAO-1	AAO-2	AAO-3	AAO-4	AAO-5
Condensation Heat Transfer	2.54	2.38	2.63	3.31	4.01	4.02	2.99
W/m ²							

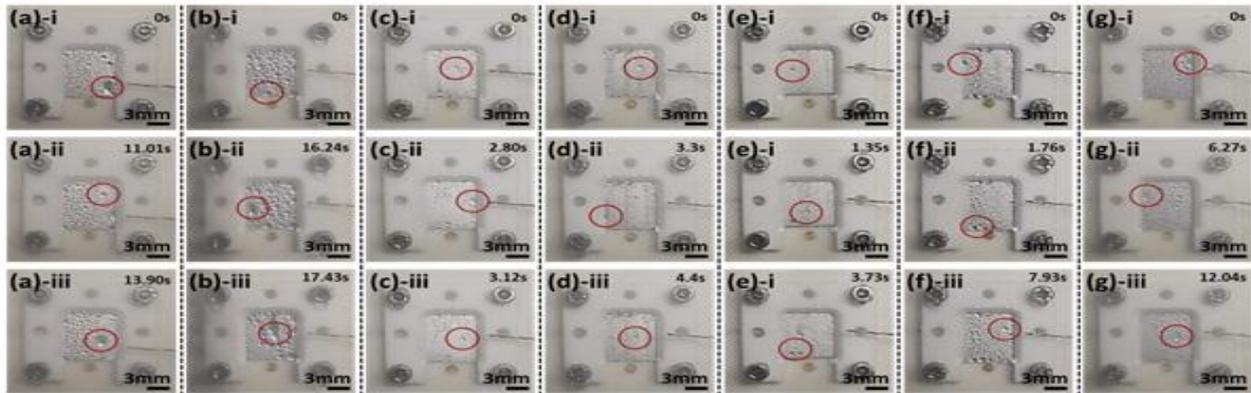


Fig 6. Optical image of surface condensation. (a) bare aluminum, (b) as anodized aluminum, (c) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide without pore-widening, (d) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 20 min of pore-widening, (e) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 40 min of pore-widening, (f) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 60 min of pore-widening, (g) oil-impregnated Teflon-coated anodic oxide with 80 min of pore-widening.

이러한 각 시편의 표면에 따른 응축 열전달의 차이의 원인을 확인하기 위하여 응축이 발생하는 각 샘플의 표면을 관찰했으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 또한, 중력에 의해 아래로 표면을 따라 이동하는 물방울을 붉은색 원으로 표기하였다. 친수성을 보이는 표면의 경우 막상응축(filmwise condensation)의 거동을 보여주는 반면, 소수성 처리가 된 표면의 경우 적상응축(dropwise condensation)을 보여준다. 응축 열전달이 높은 표면일수록 표면에서 응축된 물방울이 아래로 이동하는 빈도가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 특히, 테플론 코팅과 윤활유 침지 처리가 적용된 40분 60분간 기공을 넓힌 양극산화피막이 가장 높은 빈도로 물방울이 이동하여 주변의 물방울을 흡수 제거하였다. 이러한 표면은 매우 낮은 구름각과 접촉각 이력을 보여주었는데, 이는 물방울의 높은 이동성을 의미하고, 이로 인하여 표면에 응축된 물방울이 쉽게 중력에 의해 아래로 미끄러진다는 것을 확인할 수 있다 [19, 20]. 그 결과, 차가운 샘플 표면의 노출을 억제하는 물방울이 제거됨에 따라 열전달이 향상된다 [7, 21]. 소수성 처리, 윤활유 침지 및 표면의 나노 다공성 구조물 제작과 같이 소재 표면에 물방울의 이동성을 높여주는 처리는 응축 열전달을 향상시킬 수 있다. 향상된 물방울의 이동성에 의해 개선되는 응축열전달은 나노다공성 표면 구조에 윤활유가

채워져 있는 한 구현될 수 있으며, 장시간의 응축 환경 노출에도 윤활유의 고갈을 억제할 수 있는 표면 역시 개발이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

알루미늄 양극산화피막에 테플론 코팅과 윤활유 침지는 표면에 물에 대한 젖음성을 감소시키며, 물방울의 이동성을 향상시킬 수 있다. 이렇게 물방울의 이동성이 향상된 표면은 수증기로부터 응축이 발생할 경우 쉽게 응축된 위치에서 이동할 수 있다. 따라서, 응축되는 차가운 표면의 노출을 억제하는 응축된 물방울이 쉽게 제거되기 때문에 높은 응축 열전달 성능을 보여줄 수 있다. 본 연구에서는 이러한 물방울 이동성 향상을 위하여 다양한 형상의 알루미늄 양극산화피막을 제작하였는데, 기공률이 24.8 ~ 44.4 % 정도 되는 양극산화피막이 가장 높은 물방울의 이동성에 의한 응축 열전달 성능을 보여 주었다. 알루미늄 합금은 가공성이 뛰어나고, 높은 열전도도를 가지기 때문에 열을 관리하기 위한 다양한 분야에 적용됨에 따라 본 연구에서 개발한 기술을 적용한다면, 응축 열전달 분야에서도 적극적으로 활용 될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] X.-H. Ma, X.-D. Zhou, Z. Lan, L. Yi-Ming, Y. Zhang, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (2008) 1728-1737.
- [2] K.-C. Park, P. Kim, A. Grinthal, N. He, D. Fox, J.C. Weaver, J. Aizenberg, *Nature*, 531 (2016) 78-82.
- [3] Q. Baojin, Z. Li, X. Hong, S. Yan, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35 (2011) 211-218.
- [4] R. Enright, N. Miljkovic, J.L. Alvarado, K. Kim, J.W. Rose, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 18 (2014) 223-250.
- [5] K. Rykaczewski, A.T. Paxson, M. Staymates, M.L. Walker, X. Sun, S. Anand, S. Srinivasan, G.H. McKinley, J. Chinn, J.H.J. Scott, *Scientific Reports*, 4 (2014) 4158.
- [6] Q. Yi, M. Tian, W. Yan, X. Qu, X. Chen, *Applied Thermal Engineering*, 106 (2016) 13-21.
- [7] R. Wen, Q. Li, J. Wu, G. Wu, W. Wang, Y. Chen, X. Ma, D. Zhao, R. Yang, *Nano Energy*, 33 (2017) 177-183.
- [8] Y. Hou, M. Yu, X. Chen, Z. Wang, S. Yao, *ACS Nano*, 9 (2015) 71-81.
- [9] 이정훈, *한국표면공학회지*, 51 (2018) 11-20.
- [10] J. Lee, Y. Jiang, F. Hizal, G.-H. Ban, S. Jun, C.-H. Choi, *Journal of Colloid and Interface Science*, 553 (2019) 734-745.
- [11] J. Lee, S. Shin, Y. Jiang, C. Jeong, H.A. Stone, C.H. Choi, *Advanced Functional Materials*, 27 (2017) 1606040.
- [12] 정해창, 김왕렬, 정찬영, 이정훈, *한국표면공학회지*, 52 (2019) 37-42.
- [13] C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard, C.-H. Choi, *Langmuir*, 31 (2015) 11040-11050.
- [14] L. Zaraska, G.D. Sulka, M. Jaskuła, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 15 (2011) 2427-2436.
- [15] J.D. Smith, R. Dhiman, S. Anand, E. Reza-Garduno, R.E. Cohen, G.H. McKinley, K.K. Varanasi, *Soft Matter*, 9 (2013) 1772-1780.
- [16] T.-S. Wong, S.H. Kang, S.K. Tang, E.J. Smythe, B.D. Hatton, A. Grinthal, J. Aizenberg, *Nature*, 477 (2011) 443-447.
- [17] J. Lee, Y. Kim, U. Jung, W. Chung, *Materials Chemistry and Physics*, 141 (2013) 680-685.
- [18] J. Lee, D. Kim, C.-H. Choi, W. Chung, *Nano Energy*, 31 (2017) 504-513.
- [19] H. Tsuchiya, M. Tenjimbayashi, T. Moriya, R. Yoshikawa, K. Sasaki, R. Togasawa, T. Yamazaki, K. Manabe, S. Shiratori, *Langmuir*, 33 (2017) 8950-8960.
- [20] B. Peng, X. Ma, Z. Lan, W. Xu, R. Wen, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83 (2015) 27-38.
- [21] P.B. Weisensee, Y. Wang, H. Qian, D. Schultz, W.P. King, N. Miljkovic, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109 (2017) 187-199.