

## 소수성 구리 표면에서의 액적 응축에 관한 액적 성장 및 열전달 특성 연구

이형주\* · 정찬호\* · 김대윤\* · 문주현\*\* · 이재빈\*\*\* · 이성혁†

### Investigation of Droplet Growth and Heat Transfer Characteristics during Dropwise Condensation on Hydrophobic Copper Surface

Hyung Ju Lee, Chan Ho Jeong, Dae Yun Kim, Joo Hyun Moon, Jae Bin Lee,  
and Seong Hyuk Lee

**Key Words:** Dropwise condensation(액적 응축), Droplet growth behavior(액적 성장 거동), Hydrophobic surface(소수성 표면), Condensation heat transfer(응축 열전달)

#### Abstract

The present study investigates the heat transfer characteristics of droplet growth during dropwise condensation on the hydrophobic copper surface. We use the copper specimen coated by the self-assembled layer and conduct the real-time measurement of droplet size and spatial distribution of condensates during condensation with the use of the K2 lens (long distance microscope lens) and CMOS camera. The temperatures are measured by three RTDs (resistance temperature detectors) that are located through the holes made in the specimen. The surface temperature is estimated by the measured temperatures with the use of the one-dimensional conduction equation. It is observed that the droplets on the surface are growing up and merging, causing larger droplets. The experimental results show that there are three distinct regimes; in the first regime, individual small droplets are created on the surface in the early stage of condensation, and they are getting larger owing to direct condensation and coalescence with other droplets. In the second and third regimes, the coalescence occurs mainly, and the droplets are detached from the surface. Also, the fall-off time becomes faster as the surface wettability decreases. In particular, the heat transfer coefficient increases substantially with the decrease in wettability because of faster removal of droplets on the surfaces for lower wettability.

#### 1. 서 론

응축(condensation)은 증기 온도가 포화온도 이하로 내려갈 때 기체 상태에서 액체 상태로의 상변화를 의미

(Received: 7 Sep 2018, Received in revised form: 19 Sep 2018, Accepted: 20 Sep 2018)

\*중앙대학교 기계공학과

\*\*University of Texas at Dallas

\*\*\*두산중공업 가스터빈 개발사업부

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail: shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

한다. 응축현상은 자연현상 및 산업현장 어디에나 존재하는 현상으로 많은 연구자들의 오랜 관심을 받아 왔다<sup>(1-7)</sup>. 응축은 금속 표면에 맺히는 응축액의 접촉각에 따라 액막 응축(filmwise condensation)과 액적 응축(dropwise condensation)으로 구분된다<sup>(8)</sup>. 일반적으로 금속 표면은 높은 젖음성을 갖고 있기 때문에 액막 응축이 일어난다. 액막 응축의 경우 응축액이 성장함에 따라 액막을 형성한다. 점차 성장하는 액막은 표면에 열저항 효과를 가져와 열전달 계수를 감소시킨다. 반면 액적 응축의 경우 응축액이 성장하게 되면 자중에 의해 굴러 떨어진다. 액적이 굴러 떨어진 경로를 따라 표면은 새로 노출되고

다시 응축 현상이 발생하여 열전달을 증가시킨다. 표면의 열전달 계수를 증가시킴으로써 열 교환 시스템의 성능을 높일 수 있다고 보고되었다<sup>(8)</sup>. 따라서 연구자들은 액적 응축 현상에 대하여 실험적으로 연구하고 있으며, 특히 응축액의 형성과 성장 거동에 대한 연구가 수행되고 있다<sup>(5, 6)</sup>. Castillo 등은 액적 응축 과정을 3 단계 - 초기 액적 생성, 액적의 성장, 굴러 떨어짐으로 구분하여 관찰하였지만, 액적 응축 과정을 3 단계로 구분할 수 있는 정량적인 기준을 제안하지 못했다<sup>(5)</sup>. 하지만 여전히 표면의 젖음성이 액적 성장 거동에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구는 부족한 상황이며, 특히 액적 성장 거동이 표면 열전달에 미치는 영향에 대한 연구가 미미하다. 따라서 본 연구에서는 소수성 표면에서 액적 응축현상을 촬영하여 성장 거동을 분석하였고, 더 나아가 표면의 젖음성이 열전달 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 결과로서, 액적 성장 거동 특성을 관찰하여 단일 액적 성장이 일어나는 영역과 액적들의 결합이 주로 일어나는 영역의 기준을 정량적으로 제안하였다. 또한 액적 성장 거동이 표면 응축 열전달에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 열전도율이 뛰어나고 열 교환 시스템에 널리 사용되는 순도 99.9%의 구리를 사용하였다. 구리 시편의 크기는 직경 25 mm, 높이 60 mm이다. 표면 젖음성에 따른 액적의 접촉 특성을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 연마된 구리 시편과 두 개의 소수성 표면을 제작하였다. 소수성의 구리 시편을 제작하기 위해 n-octadecyl mercaptan layer를 코팅하였다. 먼저 연마된 구리시편을 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액에 8 시간 동안 넣어 순수한 산화층을 형성시켰다. 순수한 산화층을 형성한 시편은 에탄올에 2.5 mM의 1-Octadecanethiol(C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>S)를 용해시킨 용액에 담가 n-octadecyl mercaptan layer를 코팅하였다. 용액에 담가 놓는 시간에 따라 달라지는 코팅 층의 두께와 형상은 액적의 접촉각에 영향을 미치게 된다<sup>(9)</sup>. 본 연구에서는 n-octadecyl mercaptan layer 코팅을 각각 10 분과 2시간 진행하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 연마된 구리 시편의 접촉각은 73±1°, 코팅된 표면의 접촉각은 각각 124±2° 및 148±1°이다. 코팅된 표면의 내구성을 확인하기 위해 코팅 표면의 거칠기를 측정하였다. 응축 실험 이전의 코팅 표면 거칠기는 약 2~2.5 μm로

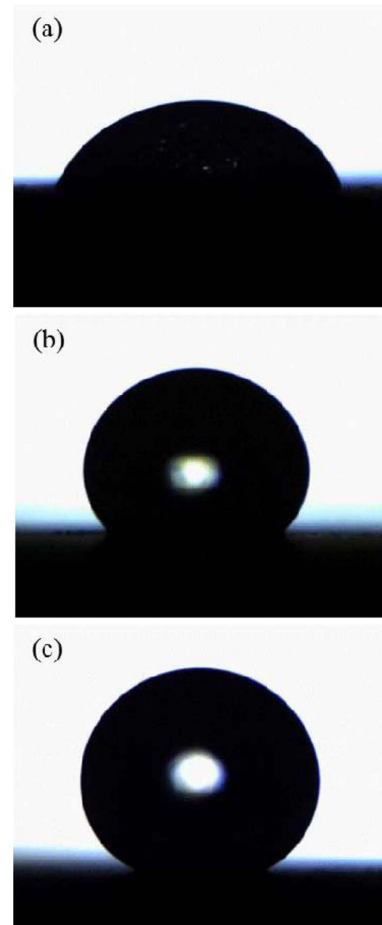


Fig. 1 (a) Polished copper surface, (b) Case 1: polymer coated copper surface (coating time: 10 min), (c) Case 2: polymer coated copper surface (coating time: 2 hr)

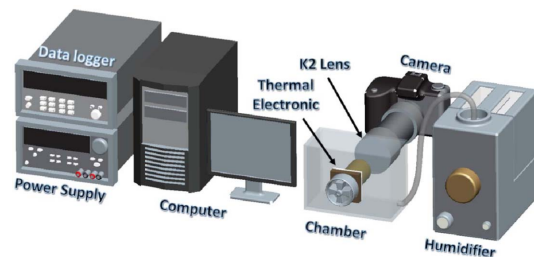


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

측정되었으며, 10번의 반복실험 이후에도 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 시간에 따른 응축 액적의 거동과 열전달을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 응축 가시화 및 온도

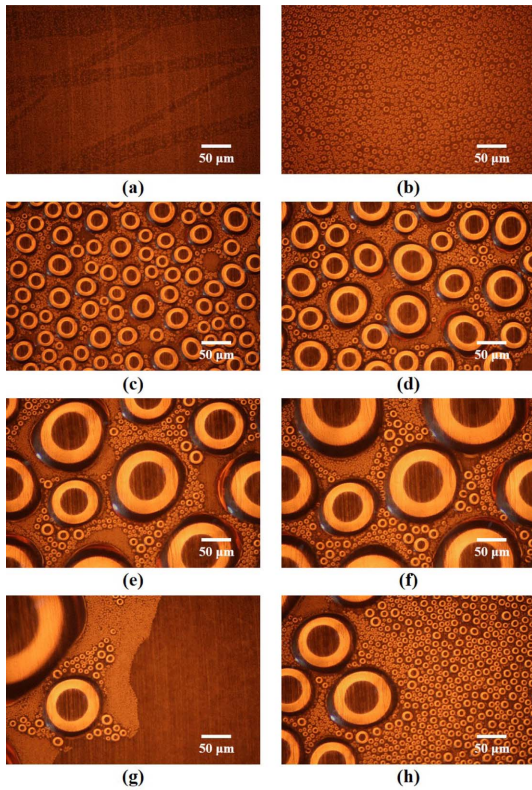


Fig. 3 Droplet growth behavior with respect to time on hydrophobic surface of case 1 (contact angle: 124°) (a) 1 min, (b) 7 min, (c) 25 min, (d) 50 min, (e) 100 min, (f) 130 min, (g) 160 min, and (h) 180 min

측정 장치를 구성하였다. 실험 장치는 크게 다음과 같이 습도 조절 챔버와 냉각 시스템, 온도 측정을 위한 데이터 수집 장치, 가시화 장치의 세 부분으로 나눌 수 있다. 구리 시편은 열전소자를 이용하여 냉각하였다. 초기의 구리시편 온도는 26±1°C이고, 냉각 시작 후 약 1000초 후에 구리표면의 온도는 2°C로 수렴하였다. 구리 시편은 냉각 표면이 지면에 수직하도록 습도 조절 챔버에 부착되며, 챔버의 내부 크기는 150 mm × 80 mm × 60 mm이다.

챔버 내부의 압력은 대기압 상태이며, 내부 온도는 26±1°C, 상대 습도는 80±2%로 유지되었다. 상대 습도는 습도 조절 챔버의 센서와 가습기를 사용하여 조절하였다. 구리 시편 내 열전달을 측정하기 위해 시편의 높이 방향으로 측은 저항체(resistance temperature detector, RTD)를 상단 표면으로부터 각각 1, 2, 그리고 3 mm 떨어진 위치에 홀을 뚫어 삽입하였다. 측은 저항체는 데이터 수집 장치(Agilent, 34970A)에 연결하였고, 실시간으로 온도를 측정하였다. 불확도 분석에는 ASME PTC

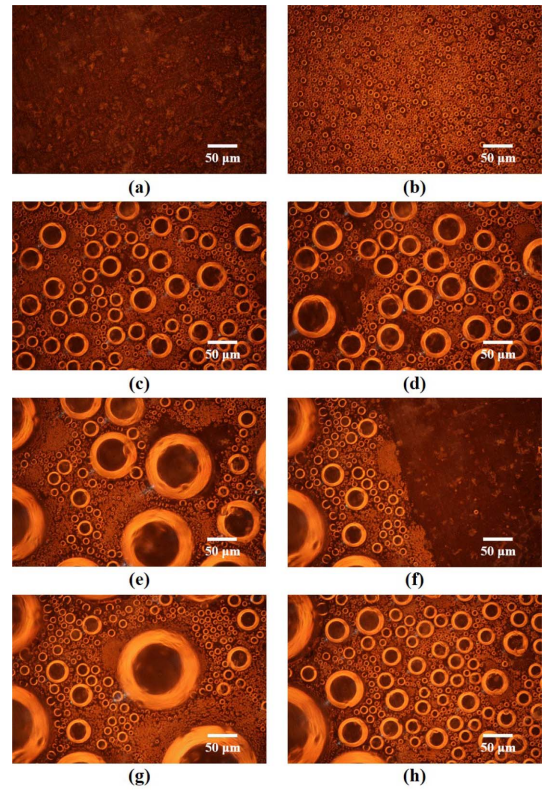


Fig. 4 Droplet growth behavior with respect to time on hydrophobic surface of case 2 (contact angle: 148°) (a) 1 min, (b) 7 min, (c) 25 min, (d) 50 min, (e) 100 min, (f) 130 min, (g) 160 min, and (h) 180 min

19.1 test uncertainty 방법을 사용하였으며, 본 실험의 온도 측정의 불확도는 1.036% 이다. 응축 과정은 고배율 렌즈(Infinity K2, Edmund)를 CMOS(Canon, EOS 7D) 카메라에 부착하여 실시간으로 촬영 하였으며, 광원으로는 할로겐 램프(Fiber-lite, MI-157)를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 소수성 표면에서 액적의 성장 거동

Figure 3과 4는 접촉각이 124°과 148°인 소수성 표면에서 시간에 따른 액적 성장 거동을 나타낸다. 응축 시작 7분 이후인 Fig. 3(b)와 4(b)에서 알 수 있듯이, 작은 액적 (약 20 μm) 이 균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 25분 이후에는 액적의 결합이 지배적으로 나타나게 되며 이로 인해 새로운 구리 표면이 드러나게 된다. 50분에 case 1과 2 구리 시편의 노출 면적이 현저

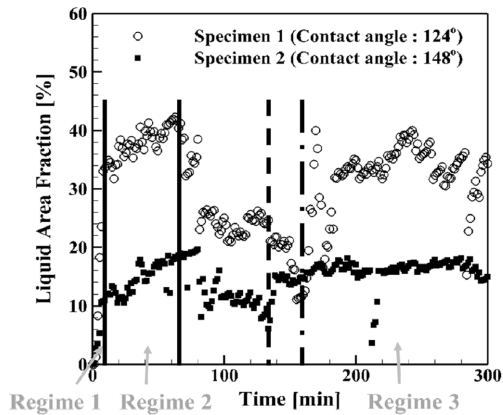


Fig. 5 The variation of the liquid area fraction with respect to time

하게 차이를 나타낸다. 응축이 시작되고 100분 이후, 상대적으로 큰 액적의 결합으로 인해 더 넓은 면적의 구리 표면이 노출되게 된다. Case 1과 2에서 처음으로 액적이 떨어지는 시간은 각각 160분과 130분이며 낮은 표면 에너지를 갖는 case 2에서 액적이 상대적으로 빠르게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 액적의 떨어짐으로 인해 발생하는 노출 표면에서 작은 액적들이 다시 성장하게 되고 앞서 발생한 과정들을 반복한다. 공기 중에 노출된 구리 표면 면적의 차이에 따라 응축 주기를 변화시키므로 열전달 성능에 많은 영향을 미치게 된다.

Figure 5는 접촉각이 124°와 148°인 표면에서 액적 응축이 일어날 때 구리 표면의 liquid area fraction의 변화를 비교한 그래프이다. Liquid area fraction은 구리 표면의 전체 영역에서 액적이 덮고 있는 면적의 비율을 의미한다. Liquid area fraction 계산을 위한 이미지 분석에는 open source 소프트웨어인 Image J 1.48V를 사용하였다. 원본 이미지를 8 bit 이미지로 변환한 후에 액적 경계선의 강도를 임계값으로 하여 액적 경계선을 얻어 내었다. 원형의 경계선 내부 면적을 계산하여 liquid area fraction을 구하였다.

시간에 따른 liquid area fraction을 기준으로 하여 액적의 성장 거동을 세가지 영역으로 나누었다. Regime 1에서는 작은 액적들이 성장하면서 인접한 액적들과 결합이 일어나 큰 액적으로 성장하게 된다. Regime 2에서는 상대적으로 완만하게 liquid area fraction이 증가한다. Regime 2에서는 작은 응축액들이 서로 결합하여 하나의 큰 액적으로 성장하게 되는데, 이 때 표면 젖음성에 따라 액적 결합시 액적의 이동 거리가 달라진다. Case 2의 표면 위에서 결합되는 액적의 이동거리가 상대적으

로 더 긴데, 이는 표면의 젖음성이 낮을 수록 모세관 힘이 작기 때문이다. 액적 결합 시 액적의 이동 거리가 상대적으로 더 긴 case 2의 표면에서 더 넓은 새로운 구리 표면이 공기 중에 노출된다. 따라서 regime 2에서 case 1과 2의 liquid area fraction 값에는 급격한 차이가 나타났다. Regime 3에서는 liquid area fraction의 감소가 나타난다. 이는 Fig. 3(e)와 Fig. 4(e)에서와 같이 상대적으로 큰 액적의 결합이 일어날 때 보다 넓은 구리 표면이 노출되기 때문이다. 이러한 성장 과정을 거친 후 특정한 크기로 성장한 액적들은 모세관 힘보다 중력이 커지게 되면서 구리 표면에서 굴러 떨어지게 된다. Fig. 5에서 dash-dot line과 dash line은 각각 case 1과 2의 액적이 처음으로 떨어지는 시간을 나타내며 case 2의 표면에서 상대적으로 빨리 떨어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 표면의 젖음성은 액적 성장 거동과 떨어짐에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

### 3.2 액적 응축의 열전달 특성

표면 젖음성에 따른 액적의 성장 거동이 열전달에 미치는 영향을 분석하기 위해 열전달 계수를 비교하였다. 열유속과 구리 표면의 온도는 시편의 온도 측정을 통해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q'' = \frac{1}{2} \left( k_{cu} \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} + k_{cu} \frac{T_2 - T_3}{\Delta x} \right) \quad (1)$$

$$T_w = T_1 + \frac{q''}{k_{cu}} d \quad (2)$$

여기서  $q''$ 는 열유속,  $k_{cu}$ 는 구리 시편의 열전도율,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ 은 구리 시편 내부의 각 지점에서 온도,  $T_w$ 는 구리 표면의 온도,  $d$ 는  $T_1$ 을 측정된 지점에서 구리 표면까지의 거리를 나타낸다. 또한, 열전달 계수는 다음과 같은 식을 통해 얻을 수 있다.

$$h = \frac{q''}{T_\infty - T_w} \quad (3)$$

여기서  $h$ 는 열전달 계수,  $T_\infty$ 는 대기 온도를 나타낸다.

Figure 6에 표면 젖음성에 따른 열전달 계수를 나타냈다. 응축이 시작되고 열전달 계수는 점차 감소하게 된다. 이는 응축액이 발생함에 따라 점차 열저항의 역할을 하기 때문이다. 하지만 약 50분 이후에는 열전달 계수 값의 감소가 거의 나타나지 않았다. 이는 응축 성장 거동이 regime 3으로 넘어가며 열저항 역할을 하던 응축액들이 제거되고 새로운 구리표면이 노출되기 때문이다. 또한 case 2의 열전달 계수는 case 1의 열전달 계수보다

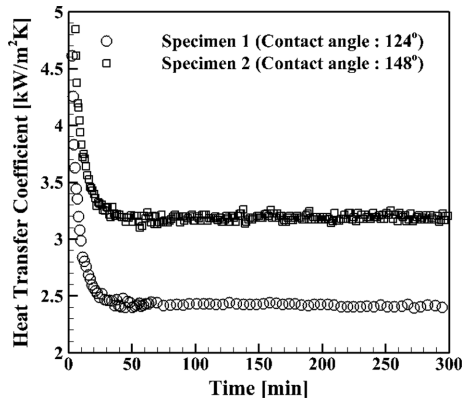


Fig. 6 Heat transfer coefficient of dropwise condensation with different contact angle of droplet

높게 나타나는데, 이는 상대적으로 case 2의 liquid area fraction 이 더 낮기 때문이다. 열저항 역할을 하는 응축액이 수월하게 제거됨에 따라 열전달이 더욱 활발하게 발생하는 것이다. 따라서, 표면 젖음성에 따른 응축 액적의 성장 거동은 전체 표면의 열전달 성능에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 화학적으로 텍스처 된 구리 표면의 액적 응축 시 액적 성장 거동을 관찰하고, 액적 성장 과정이 열전달에 미치는 영향을 분석하기 위하여 실험을 수행하였다. 소수성 표면에서 액적 성장 거동은 응축 표면의 liquid area fraction을 분석하여 세가지 영역으로 나눌 수 있다. Regime 1에서 직접적인 응축에 의해 액적은 균일 한 크기로 성장하고 가까운 작은 액적들과 결합하게 된다. Regime 2에서는 액적 응축 및 결합으로 인해 응축액의 지속적인 성장으로 열전달 계수가 크게 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. 대략 60분이 지난 후에 응축 과정은 regime 3으로 넘어가게 된다. 액적의 결합, 그리고 일정 직경 이상으로 성장한 응축액의 굴러 떨어짐 등이 새로운 구리표면을 노출시킨다. 이 때 상대적으로 더 작은 liquid area fraction 값을 갖는 case 2의 경우 열전달 계수가 더 큰 것으로 나타났다. 따라서, 액적의 성장 거동은 액적 응축 동안 전체 표면 열전달 성능에 상당한 영향을 미친다고 판단 할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 (No. 2017R1A2B2006943)의 지원을 받아 수행하였습니다

#### 참고문헌

- (1) J. Blaschke, T. Lapp, B. Hof, J. Vollmer, "Breath figures: nucleation, growth, coalescence, and the size distribution of droplets", *Physical Review Letters*, Vol. 109, 2012.
- (2) D. Beysens, "The formation of dew", *Atmospheric Research*, Vol. 39, 1995, pp. 215~237.
- (3) A. Steyer, P. Guenoun, D. Beysens, C. M. Knobler, "Growth of droplets on a substrate by diffusion and coalescence", *Physical Review A*, Vol. 44, 1991, pp. 8271~8277.
- (4) J. L. Viovy, D. Beysens, C. M. Knobler, "Scaling description for the growth of condensation patterns on surfaces", *Physical Review A*, Vol. 37, 1988, pp. 4965~4970.
- (5) J. E. Castillo, J. A. Weibel, S. V. Garimella, "The effect of relative humidity on dropwise condensation dynamics", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, 2015, pp. 759~766.
- (6) J. B. Lee, J. W. Lee, S. H. Lee, Y. T. Kang, C. K. Choi, "Dependency of condensation forms on wettability", *Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME*, Vol. 136, 2014.
- (7) X. M. Chen, J. Wu, R. Y. Ma, M. Hua, N. Koratkar, S. H. Yao, "Nanograssed micropyrarnidal architectures for continuous dropwise condensation", *Advanced Functional Materials*, Vol. 21, 2011, pp. 4617~4623.
- (8) J. W. Rose, "Dropwise condensation theory and experiment: A review", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy*, Vol. 216, 2002, pp. 115~128.
- (9) J. Park, B. Kim, S. Y. Kim, J. Hwang, "Prediction of drop-on-demand (DOD) pattern size in pulse voltage-applied electrohydrodynamic (EHD) jet printing of Ag colloid ink", *Applied Physics A*, Vol. 117, 2014, pp. 2225~2234.