

초소수성 코팅 튜브에서의 비응축가스 영향에 대한 응축 열전달 연구

지대윤, 김대호, 이권영*
한동대학교 기계제어공학부

The effects of non-condensable gas on condensation heat transfer on a super-hydrophobic surface tube

Dae-Yun Ji, Daeho Kim, Kwon-Yeong Lee*

School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요약 본 연구의 목표는 수평 관의 초소수성 튜브에서 비응축가스(NCG)의 영향을 관찰하고, 이를 일반 알루미늄 튜브의 응축 현상과 비교하는 것이다. 초소수성 튜브 제작을 위해 Self-Assembled Monolayer(SAM) 코팅으로 알루미늄 튜브의 외부 표면을 개질 했다. 응축 성능을 나타내기 위해 총합 열전달계수를 사용하였고, 이 값으로 응축 성능을 비교 검토하였다. 본 연구의 주요 변수는 비응축가스 질량 분율로, 0.08에서 0.45의 범위에서 실험을 진행하였다. 응축 실험을 통해 비응축가스 질량 분율이 낮아질수록 응축 성능이 SAM 튜브와 일반 튜브에서 모두 향상되는 것을 확인했다. SAM 튜브에서 적응응축 열전달 성능은 일반 튜브 대비하여 평균 약 1.9배에서 2.5배 정도 큰 것을 관찰하였다. SAM 튜브에서 비응축가스 질량 분율이 낮아지면서 응축 성능 상승폭이 감소하게 되는데, 이는 Flooded 응축 현상이 발생되었기 때문이다. 응축이 더 활발하게 진행되면 SAM 튜브에서 막응축이 일어나는 것을 관찰하였고, 이 때 성능은 일반 알루미늄 튜브보다도 저하된 성능을 보였다. SAM 알루미늄 튜브에서 Flooded 응축과 막응축이 일어나는 원인으로 표면에서의 Pinning 효과를 이용하여 설명하였다. 결론적으로, SAM 튜브를 실제 응축기에 적용해 표면개질로 인한 응축 성능 개선 효과를 얻기 위해서는 적응응축 또는 Flooded 응축이 일어나는 조건으로 응축기 내 환경 조성을 해야 한다.

Abstract This purpose of this research is to observe the influence of non-condensable gas (NCG) on a horizontal super-hydrophobic aluminum tube and compare it with a bare aluminum tube. To achieve super-hydrophobic characteristics, an aluminum tube was coated with a Self-Assembled Monolayer (SAM). The overall heat transfer coefficient U was used to represent the condensation performance. The NCG mass fraction was the main variable, and its range was 0.08 to 0.45. The condensation performance of the SAM tube and bare tube increased with decreasing mass fraction of NCG. The SAM tube showed 1.9 to 2.5 times larger dropwise condensation performance than the bare tube. When the mass fraction of NCG decreased in the SAM tube, the rate of increase of the SAM tube was lower because flooded condensation occurred. In addition, filmwise condensation occurred in the SAM tube when more active condensation was generated, and its performance was lower than that of the bare aluminum tube. The flooded and filmwise condensation in the SAM tube is explained by the pinning effect. In conclusion, controlling the condition of the condenser is necessary to improve the condensation performance by surface modification a SAM.

Keywords : Condensation heat transfer, Super-hydrophobic surface, Dropwise condensation, Horizontal aluminum tubes, Non-condensable gas

본 논문은 한동대학교 교내연구지원사업 제20160073호의 연구과제와 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(no. NRF-2017R1C1B5017640).

*Corresponding Author : Kwon-Yeong Lee(Handong Global Univ.)

Tel: +82-54-260-1176 email: kylee@handong.edu

Received January 17, 2018

Revised (1st February 26, 2018, 2nd March 13, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

1. 서론

플랜트 내 복수기의 열전달 성능은 수평 관외 응축 열전달 연구에 의해 평가와 검증이 되어 왔다. Othmer[1]는 비응축가스(NCG)가 있는 상황에서 증기를 응축하는 연구를 처음 시도했다. 위 연구자는 구리 튜브를 수평으로 두고 그 안에 냉각수를 공급했다. 그 결과, 보일러 내의 공기의 부피율이 0.005일 때, 구리 튜브의 표면 열전달 효율이 약 50% 저하되는 것을 확인했다.

Kroger와 Rohsenow[2]는 비응축가스인 아르곤과 헬륨을 주입하고 응축을 일으켜 비응축가스가 응축에 미치는 영향을 확인하는 실험을 진행했다. 그 결과 응축에 미치는 분자확산의 영향이 지배적이라는 것과, 반대로 열확산의 영향은 미비하다는 것을 보였다. 따라서 비응축가스가 존재하는 응축 현상을 분석할 때의 지배 방정식은 분자확산 방정식이라고 서술했다.

Ren 외[3]는 실험적, 이론적으로 비응축가스의 분율과 냉각수의 Reynolds 수에 따라 증기/공기 혼합물의 수평관내 응축 실험을 진행했다. 이론 모델은 흡수효과와 거칠기를 포함한 Liao[4]의 수정된 확산층 이론을 통해서 세워졌고, 실험을 통해 검증되었다. 실험의 결과로 비응축가스의 질량분율이 낮고, 냉각수의 유량이 클수록 평균열전달 계수는 상승하는 결과를 보였다.

Tang 외[5]는 비응축가스가 존재하는 상황에서 수평관외 막응축(FWC) 현상을 연구하기 위하여 이중 경계층 모델을 개발했다. 위 모델을 바탕으로 유한요소법을 사용하여 수치적인 해를 풀었으며, 직접 실험한 결과와 비교해 타당성을 검증했다. 응축기에서의 비응축가스의 질량 분율이 낮더라도 평균 총합열전달 계수는 명백하게 저하되는 것을 이 모델을 통해 확인하였다.

적응축(DWC) 현상을 유도하기 위한 초소수성 표면 연구도 활발하게 진행되어 왔다. Lee 외[6]는 두 가지의 다른 Self-Assembled Monolayer(SAM) 코팅된 소수성 표면에서의 액적 성장 거동을 관찰하였다. 그 결과 액적의 성장, 유착과 표면에너지로 인한 액적 성장 및 거동 특성을 파악하였고, 이러한 결과는 적응축 열전달 제어에 유용할 것으로 보인다.

Hu와 Tang[7]은 수평 관외 적응축 현상을 이론적으로 모델링하여 해석하였다. 이들은 접촉각이 크고 증기압이 증가할수록 높은 열유속을 갖는다는 것을 이론적 해석을 통해 밝혀냈고, 실험 데이터와 비교해 검증을 완

료했다. 이를 통해 물방울의 접촉각이 작고 냉각수 입, 출구의 온도차이가 크지 않을 때에도 성공적으로 수평관외 적응축 열전달을 예측할 수 있게 되었다.

Miljkovic 외[8]는 초소수성 표면에서 응축 열전달이 일어날 때 생기는 표면과 액적의 상태를 관찰하였다. 그 결과, 점핑(Jumping), 액적(Dropwise)과 Flooded 응축 현상이 관찰되었고, 막응축 현상보다 각각 약 5배, 3.3배, 2배 가량 향상된 응축열전달 계수를 보였다. 또한, 막응축에서는 증기압이 증가할수록 응축열전달 계수가 감소한 반면, 위에 나열된 3가지 현상이 일어날 때에는 응축열전달 계수가 소폭 증가했다.

Ma 외[9]는 비응축가스가 있는 조건에서 SAM 코팅을 한 나노구조, 마이크로 구조가 형성된 구리 수직 평판에 적응축 열전달 실험을 진행하였다. 그 결과 적응축 열전달도 막응축 열전달처럼 비응축가스가 많아질수록 응축 열전달율이 저하되는 것을 확인하였다. 또한 비응축가스 물분율이 약 20% 이하일 땐 마이크로구조 표면에서의 열전달율이 나노구조 표면에서보다 크다가, 비응축가스 물분율 20%를 기점으로 이것이 역전되는 것을 확인하였다. 연구자는 표면 구조와 비응축가스의 물분율이 표면 젖음성에 영향을 주기 때문에 이 같은 결과가 나왔다고 해석하였다.

Narhe 와 Beysens[10]은 초소수성 표면에서 적응축이 활발하게 일어나면 Pinning 현상이 나타나 Wenzel type 액적이 맺히게 되고 접촉각이 작아지는 것을 밝혔다. Wenzel type은 초소수성 표면의 나노구조 사이에 응축액이 맺혀 표면으로부터 잘 떨어지지 않는 형태의 액적 응축이다.

본 연구는 적응축 열전달에 미치는 비응축가스의 영향을 관찰하고, 이를 막응축 열전달에 미치는 영향과 비교하기 위해 진행했다. 적응축 현상을 유도하기 위해 초소수성 SAM 코팅 표면개질을 한 알루미늄 튜브를 사용했고, 일반 알루미늄 튜브를 사용해 막응축 현상을 관찰했다. 두 알루미늄 튜브에서의 응축 열전달 성능은 총합 열전달계수 U 로 표현하였다. 본 연구를 통해, 비응축가스 질량 분율과 초소수성 표면을 가진 튜브에서의 열전달 성능의 상관성을 규명하였고 최종적으로 SAM 튜브, 일반 튜브에서 일어나는 응축 열전달에 미치는 비응축가스 영향을 분석하였다.

Table 1. Nomenclature for theoretical analysis

Nomenclature		
A	Area	[m ²]
P	Pressure	[bar]
T	Temperature	[K, °C]
U	Overall heat transfer coefficient	[kW/m ² ·K]
Δh_{fg}	Latent heat of vaporization	[J/kg]
Δh_{fg}^*	Modified latent heat of vaporization	[J/kg]
q_c	Condensation heat transfer rate	[kW]
$C_{p,l}$	Specific heat capacity	[J/kg·K]
\dot{m}	Mass flow rate	[kg/s]
Subscript		
a	Air	$surf$ Surface
o	Outer	v Water vapor
sat	Saturation	w Coolant water

2. 본론

2.1 이론적 해석

2.1.1 총합열전달계수 도출 과정

Table 1에 수식을 위한 명명법이 정리되어 있다. 총합 열전달계수 U 를 정의하기 위해서 응축수의 양을 측정해 열전달율 q_c 를 계산한다. q_c 를 계산할 때, Rohsenow[11]의 수정된 기화열 모델 식 (2)를 식 (1)에 적용한다. 식 (2)에서 물의 비열 $C_{p,l}$ 은 액막 온도($T_f = \frac{T_{sat} + T_{surf}}{2}$)에서의 값이고 응축에 필요한 엔탈피 Δh_{fg} 는 T_{sat} 의 값이다. 그리고 q_c 를 냉각수 입, 출구 대수 평균 온도차인 ΔT_{LMTD} 와 A_o 의 곱으로 나누어 식 (3)으로 U 를 도출한다. 이 과정으로 막응축, 적응축의 총합 열전달계수를 모두 계산하고 응축 성능을 비교한다.

$$q_c = \dot{m}_c \Delta h_{fg}^* \quad (1)$$

$$\Delta h_{fg}^* = \Delta h_{fg} + 0.68 C_{p,l} (T_{sat} - T_{surf}) \quad (2)$$

$$U = \frac{q_c}{\Delta T_{LMTD} \cdot A_o} \quad (3)$$

2.1.2 비응축가스의 질량 분율 도출 과정

비응축가스인 공기와 증기가 이상기체라고 가정하여 이상기체이론을 참조해 응축 챔버의 비응축가스 질량 분율 N 을 아래 식 (4)를 이용해 계산한다.

$$N = \frac{P_a m_a}{P_v m_v + P_a m_a} \quad (4)$$

2.2 실험 장치 구성

2.2.1 튜브의 사양

본 연구의 응축 열교환기 튜브로 알루미늄 튜브가 사용된다. 알루미늄의 열전도율은 237 W/m·K이다. 튜브의 길이는 440 mm이고, 외경은 25 mm, 두께는 2 mm이다. 막응축 현상을 관찰하기 위해서 일반 알루미늄 튜브가 사용되었으며, 적응축 현상을 관찰하기 위해서 Kwak과 Hwang[12]의 방법으로 SAM 코팅된 알루미늄 튜브가 사용되었다. 사용된 알루미늄 튜브들은 Fig. 1에 나타나 있다. 대략적으로 측정된 일반 알루미늄 튜브의 접촉각은 57°였고, SAM 튜브의 접촉각은 138°였다.

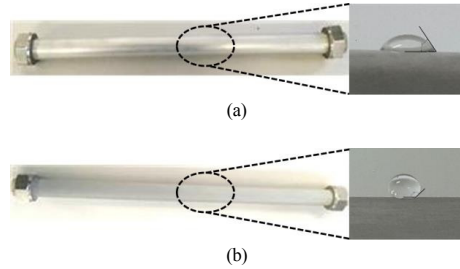


Fig. 1. Condenser tubes
(a) Bare aluminum tube (FWC), contact angle : 57°
(b) SAM coated aluminum tube (DWC), contact angle : 138°

2.2.2 실험 장치 설계 및 제작

수평 관의 응축실험장치의 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다. 냉각기에서 나오는 냉각수가 흐르는 방향과 증기 발생기에서 나오는 증기가 반대로 흐르게 설계했다. 실험장치는 증기발생기에서 배출된 증기가 응축 챔버에서 응축되고 응축수는 하단의 보조 탱크에 저장되는 닫힌 시스템으로 설계되었다. 실험장치의 주요 튜브들의 구경은 1 inch이고 스테인레스 재질이다. 증기발생기에서 나오는 호스는 1/2 inch이고 스테인레스 재질이다. 위 사항을 고려해 제작한 실험장치의 사진은 Fig. 3에 나타나 있다. 실험장치를 구성하는 주요 요소들은 응축 챔버, 증기발생기, 냉각기이다.

응축 챔버는 스테인레스 재질로 직육면체 형상으로 제작되었으며, 크기는 W 1200 x L 500 x H 500 mm이

다. 내부 압력이 0.02 bar인 상황에서 외압을 견딜 수 있도록 두께를 10 mm으로 설계하였다. 튜브에서 응축된 응축수는 응축수 수집관을 통해 수위 게이지로 흘러 들어간 후 응축 챔버 하단의 보조탱크에 저장된다. 수위 게이지로 응축수의 유량을 측정할 수 있다. 응축 챔버 하단 중앙에는 응축 챔버 내부에서 튜브 외에서 발생한 열손실 응축수의 유량을 측정할 수 있는 수위 게이지가 있고, 열손실 응축수도 하단의 보조탱크에 흘러 들어간다. 각각의 수위 게이지를 통해 응축 열량과 열손실 열량을 도출할 수 있다. 하단 보조탱크의 용량은 60 L로 최대 증기유량에서 4시간까지 응축실험을 진행할 수 있도록 설계했다. 보조탱크 최하단에는 응축수를 배출하기 위한 드레인 밸브가 설치되어 있다.

응축 챔버 내부에는 튜브를 2개 연결할 수 있도록 설계되었는데, 이는 같은 조건에서 각 튜브의 응축 열전달 성능을 수월하게 비교 평가하기 위함이다. 응축 챔버 양 옆에 아크릴로 가시화창을 설치했고 조명을 비춰서 내부의 응축 현상을 관찰 할 수 있다. 응축 챔버와 하단 보조탱크는 진공펌프에 연결되어 있다. 진공펌프는 응축 챔버 내 압력을 0.02 bar로 설정할 수 있는 성능을 가지고 있다. 진공펌프는 증기를 주입하기 전 응축 챔버 내의 비응축가스를 제거하는데 사용한다.

증기발생기는 최대 15 kg/hr의 증기를 생산할 수 있으며, 증기 생산을 위해 지속적으로 수돗물이 공급된다. 차가운 수돗물은 증기 생산을 방해하기 때문에 히터를 사용해 증기발생기 보조 물탱크 속 수돗물을 가열하여 실험의 안정성을 확보한다. 증기발생기 후단에는 기액분리기를 설치해 액적을 걸러서 응축 챔버에 건도 1의 증기를 공급하였다. 응축 챔버에 공급되는 증기의 유량은 니들 밸브로 조절할 수 있다. 실험 중에 기액분리기의 하단 밸브를 간헐적으로 열어 쌓인 응축액을 배출한다.

냉각기는 최대 16.2 kW까지 냉각시킬 수 있는 능력을 가지고 있으며, 이는 증기발생기의 최대열량인 10 kW를 냉각시키기 충분한 용량이다. 냉각기의 작동유체는 수돗물이고, 냉각수의 온도를 5 ~ 35 °C의 범위에서 일정하게 유지할 수 있다. 본 실험에서는 냉각수의 온도를 20 ± 0.1 °C로 설정했다. 냉각기 내부의 토출 펌프는 최대 83 LPM의 유량으로 냉각수를 내보낼 수 있고, 후단의 유량 조절용 니들밸브를 사용해 유량을 조절할 수 있다.

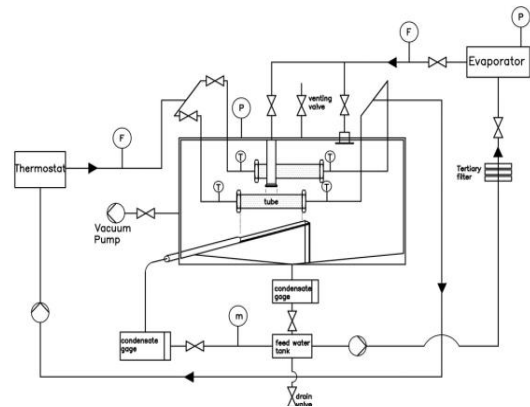


Fig. 2. Schematic diagram of experimental facility

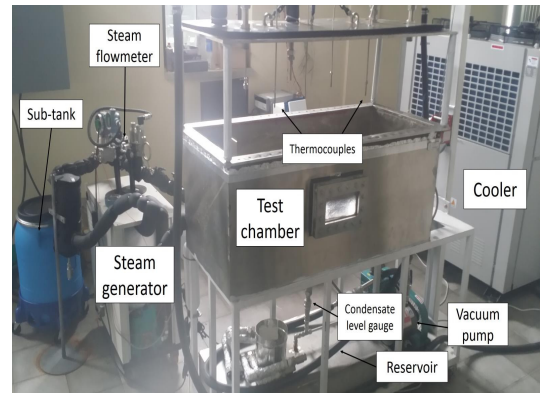


Fig. 3. Condensation experimental facility

Table 2. Sensor list

		Quantity	Range	Accuracy
K type Thermocouple		5	-270 ~ 1372 °C	±0.15 °C
Pressure Transducer		1	0 ~ 2.1 bar	±0.25 %
Flowmeter	Turbine	1	10 ~ 110 LPM	±1 %
	Steam	1	4 ~ 20 kg/hr	±1 %
Level gauge		2	73, 98 ml	-

설치된 계측기들은 Table 2에 정리된 것과 같다. 데이터를 수집하기 위해 K타입 열전대, 압력계, 터빈 유량계, 차압식 증기 유량계를 사용했다. K 타입 열전대는 ±0.15 °C 정확도를 갖도록 교정되었으며 총 5개를 두 개의 튜브 입, 출구에 각각 1개씩, 응축 챔버 내부 온도 측정을 위해 응축 챔버의 중앙에 1개 설치하였다. 압력계는 응축 챔버 내 압력을 측정하기 위하여 설치되었으며, 절대

압 0 ~ 2.1 bar 범위에서 ± 0.25 %의 측정 오차를 갖는다. 터빈유량계는 작동유체의 유량을 측정하기 위하여 설치되었으며 10 ~ 110 LPM의 범위를 측정할 수 있고, 이 범위에서 ± 1 %의 오차를 갖는다. 증기 유량계는 기액분리기 후단에서 순수 증기의 유량을 측정하기 위해 설치했으며, 4 ~ 20 kg/hr의 범위에서 ± 1 %의 오차를 갖는다.

2.3 실험

2.3.1 실험 절차

주요 변수는 비응축가스의 질량 분율 N 이다. 초기 응축 챔버 내 압력을 진공펌프로 조절해 비응축가스인 공기의 양을 설정하고, 주입하는 증기량을 조절해 N 을 조정한다. 실험 시 초기 응축 챔버 내 압력 P_a 을 0.038, 0.067 bar로 설정했고, 증기를 주입하면서 응축 챔버 내 압력을 0.2 bar부터 0.6 bar 사이 값으로 설정했다. P_a 가 일정한 상황에서 증기 유입으로 P_v 가 증가하여 챔버 내 전체 압력이 높아지는 것이기 때문에, 증기 유입에 따라 식(4)로부터 N 은 약 0.45부터 0.08 사이의 값을 갖으며 감소한다. 또한, N 이 작을수록 챔버 내 증기 압력이 높으므로 포화온도가 상승해 증기의 온도가 증가한다. 냉각수의 Reynolds 수는 10000, 온도는 20 °C로 고정한다. 응축수 유량을 측정해 q_c 와 U 를 계산하고, U 를 통해 SAM 튜브와 일반 튜브의 열전달 성능을 비교한다.

2.3.2 실험 결과 및 분석

첫 번째 실험의 P_a 조건은 0.038 bar 이며, 이 조건에서 비응축가스 질량 분율의 범위는 0.08 부터 0.27이다. 실험 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 일반적으로 비응축가스 질량 분율이 낮아질수록 SAM 튜브와 일반 튜브의 U 는 모두 상승하고 있다. 이는 비응축가스가 응축성능에 미치는 영향이 상대적으로 줄어들고 있음을 의미한다. 그리고 대체적으로 U_{SAM} 이 U_{Bare} 보다 높지만, 비응축가스 질량 분율이 0.09 이하인 구간에서는 더 작아진다. 이처럼 SAM 코팅에서의 응축 열전달 성능이 일반 튜브보다 낮아지게 되면 SAM 코팅이 기능을 상실한 것으로 간주한다. 첫 번째 실험에서 SAM 코팅이 기능을 유지하여 적응축이 일어나는 비응축가스 질량 분율 구간에서 U_{SAM} 은 U_{Bare} 보다 최대 약 2.21 배, 최소 약 1.41 배 크며, 최대값과 최소값을 제외한 평균값은 약 1.9 배 크다. 다음 실험에서의 P_a 조건은 0.067 bar 이며, 이 조건

에서 비응축가스 질량 분율의 범위는 0.14 부터 0.45 이다. 두 번째 실험 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 이 또한 첫 번째 실험 결과와 마찬가지로 일반적으로 비응축가스 질량 분율이 감소할수록 SAM 튜브와 일반 튜브의 U 가 증가한다. 이를 통해 비응축가스 영향이 감소한다는 것을 재확인할 수 있다. Fig. 5에서 U_{SAM} 이 대체적으로 U_{Bare} 보다 높으나, 비응축가스 질량 분율이 0.14일 때는 낮은 것으로 보면, 이때 SAM 코팅 기능을 상실했다. 두 번째 실험에서 SAM 코팅이 기능을 유지하여 적응축이 일어나는 비응축가스 질량 분율 구간에서 U_{SAM} 이 U_{Bare} 보다 최대 3.07 배, 최소 1.54 배 크고, 최대값과 최소값을 제외한 평균값은 약 2.49 배 크다.

초기 응축 챔버 내 압력 0.067 bar 일 때 U 의 수치가 같은 비응축가스 질량 분율에서 첫 번째 실험의 U 보다 더 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 비응축가스 절대량과 증기량 때문이다. 두 번째 실험에서의 비응축가스 절대량이 첫 번째 실험보다 약 0.029 bar 더 많기 때문에, 같은 비응축가스 질량 분율임에도 첫 번째 실험보다 두 번째 실험에서의 증기량이 더 많아 ΔT_{LMTD} 가 커져 전반적인 응축 열전달 성능이 더 높은 것이다.

두 실험 결과 모두에서 비응축가스 질량 분율이 감소할수록 U_{Bare} 가 증가하는 폭이 커진다. 즉, U_{Bare} 의 기울기가 커진다고 말할 수 있다. 이런 현상은 일반적인 응축 열전달과 비응축가스 질량 분율 사이의 관계이다. 하지만, SAM 튜브의 응축 열전달 성능인 U_{SAM} 은 다른 경향을 가지고 있다. U_{SAM} 이 첫 번째 실험(Fig. 4)에서는 약 1.6 kW/m²K 인 지점, 두 번째 실험(Fig. 5)에서는 약 2.0 kW/m²K 인 지점을 기준으로, 비응축가스 질량 분율 감소에 따른 U_{SAM} 이 증가하는 비율, 즉 기울기가 감소하는 경향을 보였다. 언급한 두 지점에서의 응축 형태를 관찰해보니 Flooded 응축이 관찰되었고, 이 때의 사진은 Fig. 6에 나타나 있다. Milijovic 외[8]를 참조해 Flooded 응축을 간단히 설명하자면, 적응축과 막응축의 중간 현상이라고 말할 수 있다. 응축 성능은 막응축 현상인 때 보다는 높지만 완전한 적응축일 때 보다는 낮으며, 응축 형태도 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 완전한 막응축이나 적응축이라고 할 수 없는 중간 과정을 띠고 있다. 이런 점으로 보아 U_{SAM} 의 기울기가 감소한 것은 SAM 튜브에서 Flooded 응축이 일어났기 때문이다. 그리고 실험 결과를 간략히 서술할 때 언급했던 것처럼 U_{SAM} 의 값이 U_{Bare} 보다 작은 구간이 두 실험에서 모두 발견되었는데,

이때 Fig. 7과 같이 SAM 튜브에서 막응축이 일어나게 된다. Fig. 4와 5에 SAM 튜브에서 적응축, Flooded 응축, 막응축이 일어나는 구간을 표시했다.

SAM 튜브에서 Flooded 응축과 막응축이 일어나는 원인을 밝히기 위해서는 실험 시 응축 챔버 내부의 환경을 살펴보아야 한다. 실험 절차에서 설명했듯이, 비응축 가스 질량 분율이 낮아질수록 증기량이 증가해 포화온도가 상승하며 챔버 내 압력과 온도 또한 상승한다. 그리고 비응축가스 질량 분율이 낮아질수록 SAM 튜브의 응축 성능이 높아졌으며 동시에 Flooded 응축이 발현되었다. Narhe와 Baysens[10]의 연구가 밝힌 것처럼 응축이 활발하게 일어나면 Pinning 현상이 발생하여 액적이 표면에서 떨어지지 않게 되고, 그 결과 적응축이 일어나던 초소수성 표면에서 Flooded 응축과 막응축이 일어나게 된다. 본 연구에서도 비응축가스 질량 분율이 낮아지면서 내부 증기의 압력과 온도가 높아져, 응축이 활발하게 일어나게 되어 표면에서의 Pinning 현상으로 인해 적응축에서 Flooded 응축과 막응축으로 전이된 것이다.

SAM 튜브에서 막응축이 일어날 때 U_{SAM} 의 값이 U_{Bare} 보다 작은 이유도 Pinning 때문이다. SAM 튜브, 일반 튜브 모두에서 막응축이 일어나는데 SAM 튜브에서는 Pinning 때문에 응축액이 표면에 부착되어 일반 튜브의 응축액보다도 잘 떨어지지 않게 된다. 부착된 응축액은 액막을 두껍게 형성해 열전달 저항을 상승시키는 요인이 되므로, SAM 튜브의 응축 성능이 일반 튜브보다 저하된다. 두 번째 실험의 SAM 튜브가 첫 번째 실험보다 더 높은 비응축가스 질량 분율에서 기능을 상실하는데, 이는 두 번째 실험의 비응축가스 양이 더 많아 비응축가스 질량 분율이 커도 챔버 내의 증기량이 더 많으므로, 더 높은 질량 분율에서 ΔT_{LMTD} 가 커지고 Pinning 현상도 발현되기 때문이다.

SAM 튜브에서는 완전한 적응축, Flooded 응축 현상과 막응축 현상, 총 세 가지 응축 현상이 모두 일어날 수 있다. 이는 SAM 초소수성 표면의 나노구조로 인해 발생하는 Pinning 현상 때문이다. 적응축이나 Flooded 응축 현상이 일어날 때는 일반 알루미늄 튜브보다 응축 성능이 높기 때문에 튜브의 표면개질 효과를 얻을 수 있다. 반면에, SAM 튜브에서 응축이 더욱 활발하게 일어남에 따라 막응축이 일어나고, Pinning된 막응축은 일반 튜브보다 성능이 더 저하되어 표면개질로 인한 효과가 없어진다. 따라서 표면개질로 인한 응축 성능 향상 효과를 얻

기 위해 실제 응축기에 SAM 튜브를 적용할 때에는 SAM 코팅 기능이 상실하지 않도록 응축기 내부 조건을 유지시켜야 한다.

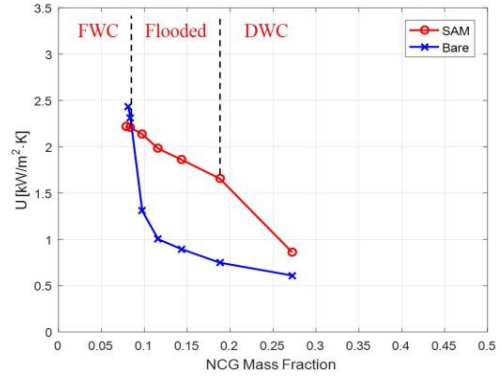


Fig. 4. U graph in condition of $P_a = 0.038$ bar

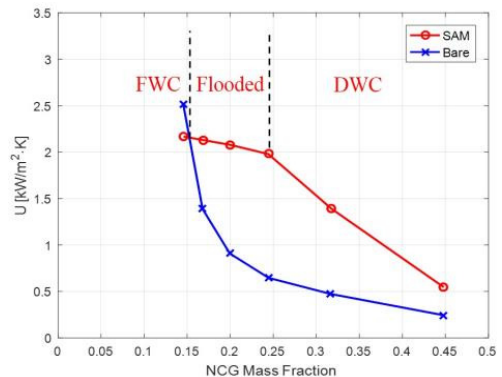


Fig. 5. U graph in condition of $P_a = 0.067$ bar

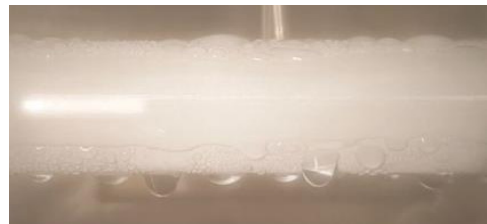


Fig. 6. Flooded condensation on SAM coated tube



Fig. 7. FWC on SAM coated tube

3. 결론

본 연구는 수평 관외에서 비응축가스 질량 분율과 SAM 코팅을 통해 초소수성 표면을 갖는 알루미늄 튜브에서의 응축 성능과의 상관성을 규명하고, 이를 일반 알루미늄 튜브에서의 응축 성능과 비교하여 어떤 차이가 있는지 확인하기 위해 진행되었다. SAM 코팅은 적응축 현상을 유도하기 위해 알루미늄 튜브 표면을 초소수성으로 개질하는 방법이다. 이론적 해석을 통해 응축 성능을 나타내기 위한 총합 열전달계수를 도출했다. 응축 챔버는 내부 압력을 0.02 bar로 설정해도 변형 및 파손이 없도록 설계하였고, 진공도 유지가 가능하도록 제작하였다. 튜브 내에 흐르는 냉각수의 온도는 20 °C, *Reynolds* 수는 10000으로 고정했다. 초기 비응축가스 압력 P_a 는 0.038 bar, 0.067 bar 두 개의 값으로 설정했다. 본 연구의 주요 변수는 비응축가스 질량 분율이며, 0.08부터 0.45까지의 범위에서 실험을 진행하였다. 응축 실험을 통해 다음 4가지의 결과를 도출했다.

- 1) 일반적으로, 비응축가스 질량 분율이 낮아질수록 SAM 튜브와 일반 튜브의 U 는 모두 증가한다. 이는 비응축가스가 응축에 미치는 부정적인 영향이 감소하기 때문이다.
- 2) 비응축가스 질량 분율에 따른 SAM 튜브에서의 응축 성능 변화는 일반 튜브에서와는 다르다. 비응축가스 질량 분율이 감소하면서 한 점을 기점으로 U_{SAM} 증가폭, 즉 기울기가 감소한다. 그 이유는 Flooded 응축 현상이 발생되기 때문이다. SAM 튜브에서 막응축과 Flooded 응축이 발생하는 이유는 Pinning 현상 때문이다.
- 3) 전반적으로 U_{SAM} 이 U_{Bare} 보다 높다. 하지만, SAM 튜브가 기능을 상실하면 SAM 튜브에서도 막응축 현상이 발생되며, SAM 튜브의 응축 성능이 튜브가 일반 튜브보다 저하되어 U_{SAM} 이 U_{Bare} 보다 작아진다.
- 4) SAM 튜브를 실제 응축기에 적용해 표면개질로 인한 응축 성능 개선 효과를 얻기 위해서는 적응축 또는 Flooded 응축이 일어나는 조건으로 응축기 내 환경 조성을 해주어야 한다.

References

- [1] D. F. Othmer, "The condensation of steam", *Indus. Eng. Chem.*, vol. 21, no. 6 pp. 577-583, June, 1929. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50234a018>
- [2] D. G. Kroger, W. M. Rohsenow, "Condensation heat transfer in the presence of a non-condensable gas", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 11, no. 1 pp. 15-26, March, 1968.
- [3] Bin Ren, L. Zhang, J. Cao, H. Xu, Z. Tao, "Experimental and theoretical investigation on condensation inside a horizontal tube with noncondensable gas", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 82, pp. 588-603, March, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.041>
- [4] Y. Liao, K. Vierow, "A generalized diffusion layer model for condensation of vapor with noncondensable gases", *J. Heat Transfer-Trans. ASME*, vol. 129, no. 8 pp. 988-994, September, 2007.
- [5] G. H. Tang, H. W. Hu, Z. N. Zhuang, W. Q. Tao, "Film condensation heat transfer on a horizontal tube in presence of a noncondensable gas", *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, pp. 414-425, April, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.058>
- [6] J. B. Lee, H. M. Joo, M. H. Cho, S. H. Lee, C. K. Choi, "Characteristics of Droplet Growth Behavior on Hydrophobic Micro-textured Surfaces", *Journal of Heat Transfer*, vol. 137, no. 8 pp. 080906, August, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4030453>
- [7] H. W. Hu, G. H. Tang, "Theoretical investigation of stable dropwise condensation heat transfer on a horizontal tube", *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, no. 2 pp. 671-679, January, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.022>
- [8] N. Miljkovic, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack, E. N. Wang, "Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces", *Nano Letters*, vol. 13, no. 1, pp. 179-187, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl303835d>
- [9] X. Ma, S. Wang, Z. Lan, A. Wang, B. Peng, "Dropwise condensation transfer on superhydrophobic surface in the presence of non-condensable gas", *International Heat Transfer Conference*, pp. 71-79, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1115/IHTC14-22248>
- [10] R. D. Narhe, D. A. Beysens, "Water condensation on a super-hydrophobic spike surface", *Europhys. Lett.*, vol. 75, no. 1, pp. 98-104, May, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1209/epl/i2006-10069-9>
- [11] W. M. Rohsenow, "Heat transfer and temperature distribution in laminar film condensation," *Trans. ASME*, vol. 78, pp. 1645-1648, 1956.
- [12] W. Kwak, W. Hwang, "Facile method for preparing superoleophobic surfaces with hierarchical microcubic/nanowire structures", *Nanotechnology*, vol. 27, no. 5, pp. 055301, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/5/055301>

지 대 윤(Dae-Yun Ji)

[준회원]



- 2010년 3월 ~ 2017년 2월 : 한동대학교 기계제어공학부(공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한동대학교 일반대학원 기계제어공학과

<관심분야>
기계공학, 열유체

김 대 호(Daeho Kim)

[준회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

<관심분야>
기계공학, 전자제어공학, 열유체

이 권 영(Kwon-Yeong Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 포항공과대학교 기계공학(공학사)
- 2008년 2월 : 포항공과대학원 기계공학(공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2010년 6월 : 삼성엔지니어링 과장
- 2010년 7월 ~ 2015년 2월 : 한국원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 교수

<관심분야>
기계공학, 원자력공학, 열유체