

히터 길이가 수조비등 임계열유속에 미치는 수력학적 영향

박수청^{1,*} · 김도연^{1,**} · 최선호^{1,**} · 이창훈^{1,*} · 임영훈^{2,***} · 이치영^{3,***} · 이연원^{1,***} · 유동인^{1,***,†}

Hydrodynamic effects of heater lengths on pool boiling critical heat flux

Su Cheong Park^{1,*}, Do Yeon Kim^{1,**}, Seon Ho Choi^{1,**}, Chang Hoon Lee^{1,*},
Younghun Lim^{2,***}, Chi Young Lee^{3,***}, Yeon Won Lee^{1,***} and Dong In Yu^{1,***,†}

Abstract In the study, pool boiling critical heat flux (CHF) was experimentally investigated depending on the length of heaters. A smooth silicon oxide surfaces are used as the boiling surfaces. As the results of pool boiling experiments based on distilled water in ambient pressure condition, the CHF decreased as the length of the heater increased. By the high speed imaging, it was shown that the number of vapor columns increased as the length of the heater increased. Comparing the number of vapor columns and the CHF according to the heater length, the change in the CHF according to the heater length was analyzed based on the hydrodynamic instability.

Key Words : Pool Boiling(수조비등), Critical Heat Flux(임계열유속), Vapor Column(증기기둥), Instability(불안정성)

기호설명

λ_c	임계 파장길이
λ_d	위험 파장길이
ρ_g	기체 밀도
σ	표면장력

A_{heater}	히터의 넓이
I_{heater}	히터의 인가전류
I_{ref}	표준저항의 인가전류
L	히터의 가로 길이
L'	히터의 무차원 길이
R_{heater}	히터의 저항
R_{ref}	표준저항의 저항
Q_{heater}	히터의 발열량
V_{heater}	히터 인가전압
V_{ref}	표준저항 인가전압
W	히터의 세로 길이
g	중력가속도
q''	열유속
q''_{CHF}	임계열유속
$q''_{CHF,Zuber}$	수력학적 불안정성 모델의 임계열유속

† Corresponding Author, Associate Professor
E-mail: diyu@pknu.ac.kr

¹ School of Mechanical Engineering,
Pukyong National University, Busan

² Future Automobiles Department, Korea
Polytechnics University (Busan campus), Busan

³ Department of Fire Protection Engineering,
Pukyong National University, Busan

* Post-doctoral researcher

** Master's degree candidate

*** Professor

1. 서론

비등현상은 액체상태로 존재하는 물질이 끓는 점 이상의 온도에서 기화하는 과정이다. 비등현상은 비등표면의 온도가 증가함에 따라, 자연대류(natural convection), 핵비등(nucleate boiling), 막비등(film boiling)으로 비등 기작을 구분할 수 있으며, 핵비등영역에서 막비등영역으로 천이되는 열유속을 임계열유속(critical heat flux)라 정의한다. 핵비등 열전달은 작동유체가 가열면과 맞닿아 있어 가열면의 온도가 작동유체의 포화온도보다 크게 상승하지 않으며, 핵비등으로 형성되는 기포의 생성·성장·이탈 기작에 의한 교반작용에 의해 높은 열전달 효율을 갖는다^[2]. 하지만, 막비등의 경우 가열면이 기체층에 덮혀 있어 증기의 높은 열저항에 의해 열전달 효율이 매우 낮다. 따라서, 임계열유속보다 높은 열유속이 작용하여 비등 기작이 핵비등에서 막비등으로 천이하면, 급격한 열전달 효율 감소로 인해 가열면의 온도가 급격히 증가하게 되고, 이는 시스템의 효율 감소 및 안정성 저하를 유발한다. 따라서, 핵비등이 적용된 시스템에서 안정적인 시스템 운영을 위해 핵비등 영역의 최대 한계치인 임계열유속 값을 예측하는 것은 매우 중요하다.

임계열유속을 예측하기 위해 이론적으로 접근한 모델 가운데 가장 범용적으로 참고되고 있는 모델은 Zuber의 수력학적 불안정성(hydrodynamic instability)에 기반한 모델이다^[3]. 이 모델은 Kutateladze의 무차원 해석^[4]을 통해 도출된 임계열유속 상관식을 Kelvin-Helmholtz 불안정성(instability)에 기반하여 설명한 모델로 수력학적 불안정성에 의한 무한히 긴 평판에서의 임계열유속 값은 아래와 같다.

$$q_{CHF, Zuber}'' = \frac{\pi}{24} \rho_g^{1/2} h_{fg} \left[\sigma g (\rho_l - \rho_g) \right]^{1/4} \quad (1)$$

Lienhard는 실린더 모양의 히터를 이용해 비등실험을 수행하여 히터 길이에 짧아짐에 따라 임계열유속이 증가하며, 아래와 같이 히터의 무차원 길이에 대한 상관식을 제시하였다^[5].

$$\frac{q_{CHF}''}{q_{CHF, Zuber}''} = f(L') \quad (2)$$

$$L' = L \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma}} \quad (3)$$

Mingfu는 사각 평판히터를 이용해 상압포화 조건인 순수물을 이용한 선행연구자들의 수조 비등 임계열유속 실험데이터를 수집하여 머신러닝을 (GRNN)을 이용해 히터길이에 따른 임계열유속 변화에 대해 연구를 수행하였다^[6]. 그 결과 히터의 길이가 Rayleigh-Taylor wavelength의 절반인 경우 최대 임계열유속을 갖으며, 히터 길이가 증가할수록 임계열유속이 감소하는 결과를 보고하였다.

상기 선행연구의 경우 히터의 길이와 임계열유속 값의 관계만을 보고할 뿐 비등에 의해 형성되는 증기기동에 대한 관찰 결과가 부재하다. 따라서, 본 연구는 대기압·포화상태 수조비등 조건에서 가열부의 길이에 따라 비등면에 발생하는 기포의 발생, 성장 및 이탈과정을 고속가시화 기법을 이용하여 관찰하고 수력학적 불안정성에 기반한 핵비등 임계열유속 발생 기작에 대한 이론을 기반으로 하여 가열부의 길이에 따른 수조비등 임계열유속 변화에 대해 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시편 제작

수조비등 실험시편은 실리콘 웨이퍼를 기관으로 미세전자기계시스템(Micro-Electro-Mechanical system: MEMS) 제작기법을 이용하여 제작하였다. 양면이 연마된 4인치 실리콘 웨이퍼를 전기적으로 절연하기 위해 실리콘 웨이퍼를 열적으로 산화시켜 5,000 Å의 산화실리콘막을 형성하였다. 실험부의 가열 및 온도 측정을 위한 박막히터를 형성하기 위해 포토-리소그래피 공정을 통해 박막히터의 형상을 실리콘 웨이퍼에 패터닝하였다. 박막히터의 모양은 히터부의 균일한 발

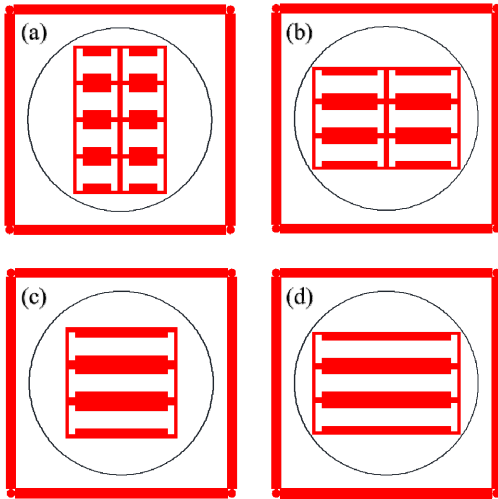


Fig. 1. Heater mask pattern for boiling samples: (a) 15×10 heater, (b) 30×10 heater, (c) 50×10 heater, and (d) 70×10 heater.

열을 구현하기 위해 ‘H’ 모양의 박막히터 형상을 채택하였고^[7], 가열부 길이에 따른 임계열유속 값의 변화를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 히터 가열부 세로 길이를 10mm로 고정하고 가로 길이가 각 15, 30, 50, 70mm인 박막히터의 형상을 패턴하였다. 박막히터를 제작하기 위해 패턴된 실리콘 면에 전자빔증착기(E-beam evaporator)를 이용하여 접합층으로 티타늄(Ti) 120 Å, 박막히터층으로 백금(Pt) 1,200 Å을 증착하였고 이를 다이싱 장비(Dicing Saw)를 이용하여 절단하여 비등시편을 제작하였다.

2.2 수조비등 실험장치

수조비등 실험장치는 Fig. 2와 같이 수조비등 현상을 구현할 비등수조, 열유속과 비등면의 온도를 측정하기 위한 계측부, 비등에 의해 형성되는 기포의 거동을 가시화하기 위한 가시화 실험장치로 구성하였다. 비등수조는 300×150×150 mm³의 알루미늄 수조이며 비등에 의한 기포의 거동을 관찰하기 위해 전면과 후면은 가시화창으로 구성되었다. 수조 내부의 작동유체를 포화상태로 유지하기 위해 두 개의 700W의 삽입 히

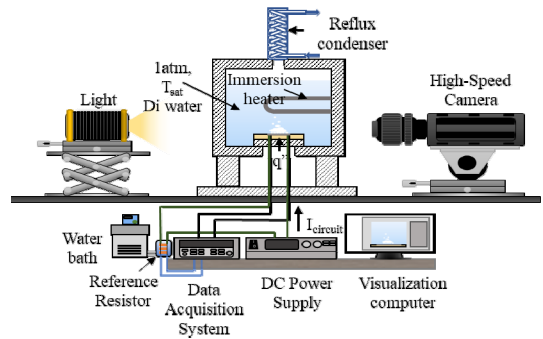


Fig. 2. Experimental apparatus

터를 설치하였으며, 수조 내부의 작동유체의 수위를 유지하기 위해 수조 상부에 환류냉각기를 설치하였다. 비등시편은 에폭시를 이용하여 수조하부에 설치하였다.

계측부는 시편에 전력을 공급하기 위한 전력공급기, 온도변화에 따른 저항 변화가 작은 표준저항, 표준저항의 온도를 일정하게 유지하기 위한 냉각기, 히터에 인가되는 전압과 표준저항에 인가되는 전압을 측정하기 위한 데이터수집기로 구성되어 있다.

가시화 실험장치는 비등으로 인해 형성되는 기포의 거동을 가시화하기 위한 초고속카메라와 조명장치로 구성하였다.

2.3 데이터 측정

비등 시편의 박막히터를 전기적으로 가열하여 비등 실험을 수행하였다. 이때 박막히터의 발열량은 Joule의 법칙을 통해 박막히터의 저항과 인가 전류의 관계로 나타낼 수 있다.

$$Q_{\text{heater}} = I_{\text{heater}}^2 R_{\text{heater}} \tag{4}$$

비등시편에 인가되는 전류는 비등 시편과 직렬 연결된 표준저항에 인가되는 전류와 같으며 실험전에 측정한 일정 온도로 유지되는 표준저항의 저항값과 표준저항에 인가되는 전압을 이용하여 계산한다.

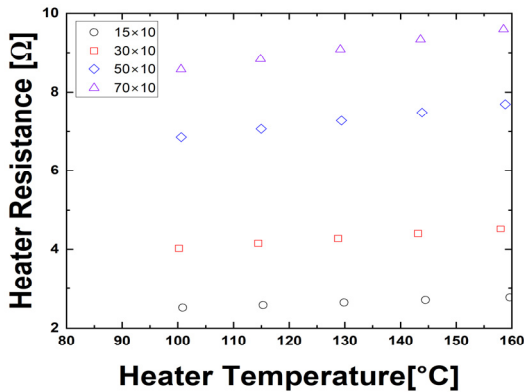


Fig. 3. Temperature-Resistance relationship of boiling samples

$$I_{\text{heater}} = I_{\text{Ref}} = \frac{V_{\text{Ref}}}{R_{\text{Ref}}} \quad (5)$$

비등 시편에 인가되는 열유속은 박막히터의 발열량에 박막히터의 면적을 나누어 계산할 수 있으며, 아래의 식을 통해 계측값을 이용하여 열유속을 계산한다.

$$q'' = \frac{Q_{\text{heater}}}{A_{\text{heater}}} = \frac{I_{\text{heater}}^2 R_{\text{heater}}}{WL} = \frac{V_{\text{heater}} V_{\text{Ref}}}{WLR_{\text{Ref}}} \quad (6)$$

비등 시편의 표면 온도는 Fig. 3과 같이 선형적인 백금의 온도-저항관계를 이용하여 비등 실험 수행 전 박막히터의 온도-저항 관계의 보정식을 획득한 뒤 비등 실험 시 박막히터의 저항변화를 통해 표면온도를 측정하였다.

24 실험 방법

수조 비등 실험을 수행하기 전 비등 시편의 온도-저항 보정을 수행한다. 비등 시편을 비등 수조에 장착하고 작동유체인 순수물을 비등 수조에 주입한 뒤, 이머전 히터를 이용하여 포화조건을 만든다. 작동유체 내의 비응축 기체를 제거하기 위해 포화조건에서 2시간을 추가적으로 가열한 뒤 비등실험을 수행하였다. 수조 비등 실험은 비등 시편에 인가되는 열유속을 조절

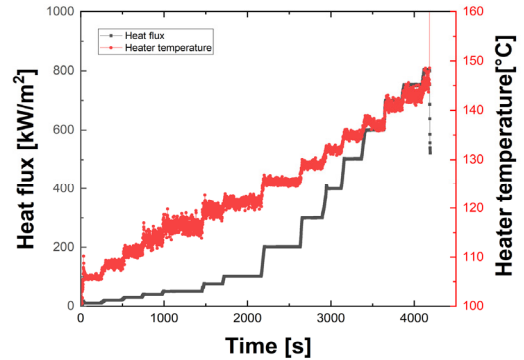


Fig. 4. Experimental procedure.

하여 진행하였으며, 각 비등 시편의 비등곡선을 도출하기 위하여 Fig. 4와 같이 100 kW/m^2 이하의 열유속에서는 각 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 kW/m^2 조건에서 100 kW/m^2 이상의 열유속에서는 100 kW/m^2 씩 증가시키며 해당 열유속에서의 데이터를 3분간 획득하여 각 시편에서의 비등곡선을 획득하였다. 임계열유속은 핵비등에서 막비등으로 천이하여 표면온도가 급상승하기 직전의 열유속으로 정의하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

히터의 길이에 따른 임계열유속 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 각 시편마다 3번의 수조비등실험을 수행하였다. Fig. 5에서 보듯이 각 시편에서 수조비등 실험 결과의 재현성을 확인하였다.

모든 시편에서의 평균 비등곡선을 Fig. 6에 도식화하였다.

모든 시편에서 자연대류 열전달 영역에서의 열전달 계수는 약 $4 \text{ kW/m}^2/\text{K}$ 로 열유속에 관계없이 일정한 열전달 계수를 가지며, 핵비등은 표면과열도가 약 15 K일 때 발생하는 것을 확인하였다. 각 시편에서의 평균 비등곡선은 500 kW/m^2 이하의 낮은 열유속 영역에서는 유사한 곡선을 가지며, 500 kW/m^2 이상의 열유속 영역에서는 히터의 길이가 증가할수록 비등열전달 계수가 감소하는 결과를 확인하였다. 임계열유속의 경우, 히터의 길이가 15, 30, 50, 70 mm로 증가할

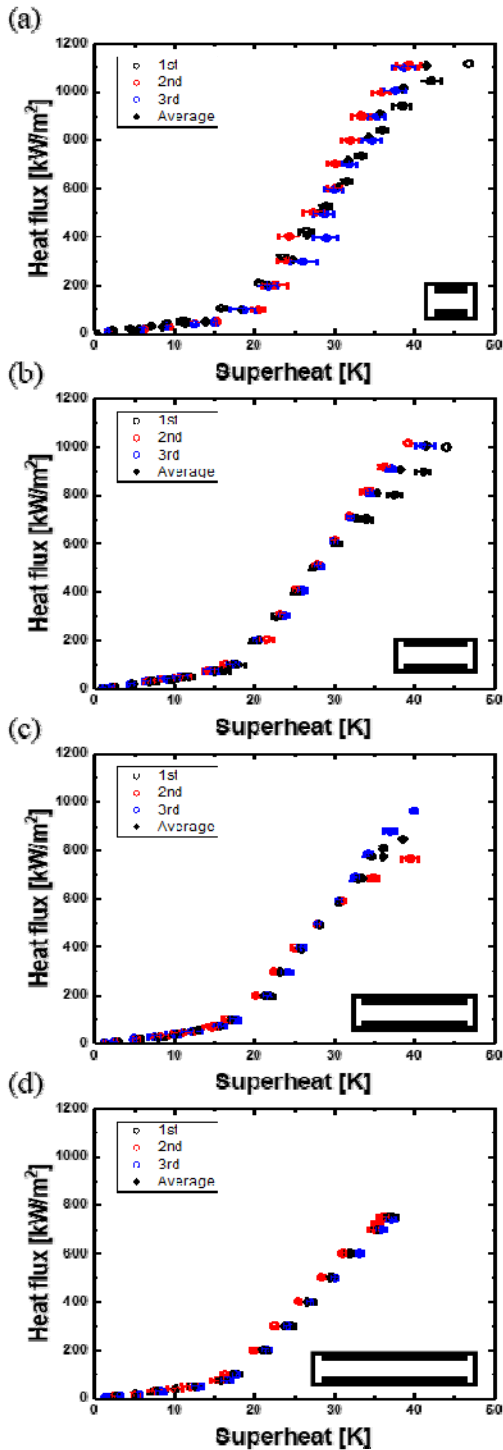


Fig. 5. Boiling curves for all test samples: (a) 15×10 heater, (b) 30×10 heater, (c) 50×10 heater, and (d) 70×10 heater.

수록 1110 ± 8 , 1007 ± 8 , 847 ± 8 , 748 ± 6 kW/m^2 로 감소하는 결과를 확인하였으며, 식 (3)을 통해 무차원화한 길이에 대한 임계열유속 변화를 Fig. 7에 도식화하였다.

Fig. 5는 열유속 700 kW/m^2 에서 길이가 다른 히터에서 기포 거동을 가시화한 결과이다. 고열유속의 핵비등 열전달 영역에서는 비등으로 형성된 기포가 주위의 기포와 상호작용하여 버섯모양의 증기기둥 형상을 형성하며 표면에서 이탈한다. 수력학적 불안정성에 기반한 임계열유속

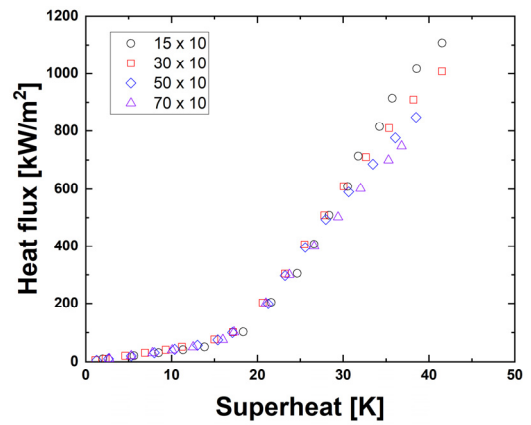


Fig. 6. Comparison with the averaged boiling curve of each test heater

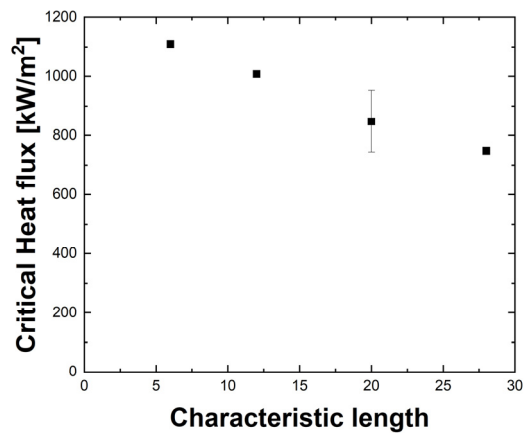


Fig. 7. Boiling curves for all test samples: (a) 15×10 heater, (b) 30×10 heater, (c) 50×10 heater, and (d) 70×10 heater.

발생 메커니즘은 상승하는 증기기둥과 중력에 의해 하강하는 액체간 상대속도 차이에 의해 계면이 불안정해지고, 액체-증기 계면이 깨지게 되면 임계열유속이 발생하는 것으로 정의한다. Zuber는 무한한 평판에 증기기둥이 사각 격자로 주기적으로 형성되어 있으며, 증기기둥 사이의 간격을 Rayleigh-Taylor 불안정성 임계 파장길이 (critical wavelength: $\lambda_c = 15 \text{ mm}$)로 정의하였다.

임계 파장거리를 간격으로 증기기둥이 형성된다면 15 mm 히터의 경우 1개($L = 1 \lambda_c$), 30 mm

히터의 경우 2개($L = 2 \lambda_c$), 50 mm 히터의 경우 3개($L = 3.3 \lambda_c$), 70 mm 히터의 경우 4-5 개($L = 4.7 \lambda_c$)의 증기기둥이 관찰되어야 한다. 하지만, 히터의 길이가 15, 30 mm인 히터에서 1개($L < 1.5 \lambda_d$), 50 mm인 히터에서 2개($1.5 \lambda_d < L < 2.5 \lambda_d$), 70 mm인 히터에서 3개($2.5 \lambda_d < L < 3.5 \lambda_d$)의 증기기둥이 관찰되었다. 실제 한정된 길이의 긴 히터에서 비등으로 인해 형성되는 증기기둥의 간격은 평균 26.8 mm로 위험 파장길이(most dangerous wavelength: $\lambda_d = 27.2 \text{ mm}$)와 유사하였고 이 결과는 Lienhard가 보고한 연구내용과 일치함을 확인하였다.

히터 길이에 따른 증기기둥의 개수와 임계열 유속값의 변화는 증기기둥이 1개인 경우 임계열 유속 1000 kW/m² 이상으로 높은 임계열 유속을 가지며, 증기기둥 개수가 2개 이상인 히터에서는 임계열 유속이 크게 감소하는 경향(약 800 kW/m²)을 확인하였다. 증기기둥 개수와 임계열 유속 변화의 원인을 액체-기체의 수력학적 불안정성에 기반하여 해석해 보았을 때, 증기기둥이 1개인 비등표면이 다수의 증기기둥이 형성되는 비등표면보다 임계열 유속이 높은 원인은 액체-증기간 상대속도가 낮기 때문으로 판단된다. 증기기둥이 1개인 비등표면에서는 증기기둥의 모든 방향에서 액체가 공급이 가능하다. 하지만, 다수의 증기기둥이 형성된 표면에서는 증기기둥 사이에서의 물 공급은 제한된다. 따라서, 증기기둥이 1개인 경우 상승하는 증기기둥으로 유입되는 액체의 속도가, 다수의 증기기둥 사이에서 유입되는 액체의 속도보다 작기 때문에 Kelvin-Helmholtz 불안정성의 임계 상대속도를 만족하기 위한 필요 열유속이 크기 때문에 증기기둥이 1개인 표면이 다수의 증기기둥이 형성되는 비등표면보다 높은 임계열 유속을 갖는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 설계 인자인 히터 길이와 핵비등 열전달 현상의 중요인자인 임계열 유속과 관계를 수조비등 실험 및 비등 가시화를 통해 분석

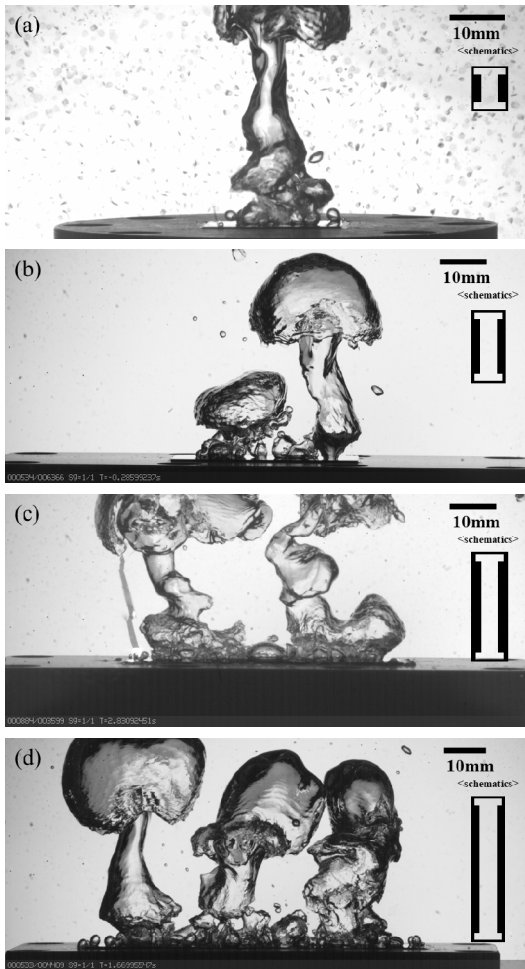


Fig. 8. Boiling structures for all test samples at 700 kW/m²: (a) 15×10 heater, (b) 30×10 heater, (c) 50×10 heater, and (d) 70×10 heater.

하였다. 실험결과 히터의 길이가 증가할수록 임계열유속은 감소하는 경향을 확인하였다. 가시화 실험을 통해 비등으로 형성되는 다수의 증기기둥의 간격은 Rayleigh-Taylor 위험 파장길이와 유사하며, 위험 파장길이의 1.5배보다 짧은 길이의 히터에서는 단일 증기기둥이 형성됨을 확인하였다. 또한 다수의 증기기둥이 형성되는 히터에서 임계열유속이 감소되는 것을 확인하였는데 이는 증기기둥 위치에서의 유체공급이 제한되어 액체의 유입속도가 증가해 액체-기체 상대속도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 이러한 히터의 길이 변화에 의한 임계열유속 변화 특성은 핵비등 열전달현상을 활용한 기기의 설계 및 안정성 향상에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 표면 특성 및 히터의 열적물성을 고려하여 추후 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2022년 부경대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었음. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2021M2D2A1A01048627).

REFERENCE

- 1) Nukiyama, S., "The Maximum and Minimum Values of the Heat transmitted from Metal to boiling Water under atmospheric Pressure," Journal Japan Society Mechanical Eng., Vol. 37, pp. 367, 1934 (in Japanese). Translation: Int. Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 9, pp. 1419-1433, 1966.
- 2) Jakob, M., "Heat Transfer," Vol. I, Chap 29, Wiley, 1949.
- 3) Zuber, N., "Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer," AEC Report No. AECU-4439, Physics and Mathematics, 1959.
- 4) Kutateladze, S. S., "On the transition to film boiling under natural convection," *Kotloturbostoenie*, No. 3, 1948, p 10.
- 5) Lienhard, J. H., "Hydrodynamic Prediction of Peak Pool-boiling Heat Fluxes from Finite Bodies," ASME. J. Heat Transfer, 95(2), 152-158, 1973.
- 6) He, M., "Revisiting heater size sensitive pool boiling critical heat flux using neural network modeling: Heater length of the half of the Rayleigh-Taylor Instability Wavelength maximizes CHF," Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 14, 100421, 2019.
- 7) Park, S. C., "Boiling characteristics on a serpentine-like geometry thin-film platinum heater under pool boiling," Vol. 95, p 214-223, 2016.