

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.6.465>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

수직 벽면에서 과냉 핵비등 시 열유속 분배에 관한 실험적 연구

송준규* · 박준석* · 정셋별* · 김형대*
* 경희대학교 원자력공학과

Experimental Study on Heat Flux Partitioning in Subcooled Nucleate Boiling on Vertical Wall

Junkyu Song*, Junseok Park*, Satbyoul Jung* and Hyungdae Kim**
* Dept. of Nuclear Engineering, Kyung Hee Univ.

(Received December 1, 2013 ; Revised March 4, 2014 ; Accepted March 5, 2014)

Key Words: Heat Flux Partitioning(열유속 분배), Infrared Thermometry(적외선 열화상), Nucleate Boiling(핵비등), Total Reflection(전반사)

초록: 본 연구에서는 비등 열유속 분배 모델의 예측 정확성을 검증하기 위하여 수직평판 자연대류 과냉 비등에서 기화, 급랭, 및 단상대류 열전달 기구에 대한 열유속 분배 특성을 실험적으로 조사하였다. 비등 열유속의 분배를 위해 적외선 열화상 기법과 전반사 가시화 기법을 동기화하여 비등 표면의 열유속 분포와 액상-기상 분포를 동시에 측정하여 분석하는 실험을 수행하였다. 실험은 대기압 조건에서 과냉도 10 °C를 가지는 물을 이용하여 수행하였으며, 벽면과열도 12 °C 및 평균 열유속 283 kW/m² 조건에 대한 실험 결과를 분석에 활용하였다. 실험을 통해 획득된 열유속 분배 결과는 상관식을 이용한 예측 결과와 큰 차이를 보였으며, 기포이탈직경과 기포이탈 시 주변의 과열액체층이 함께 뜯겨져 나가는 효과를 고려한 기포영향인자가 차이를 만드는 주요 원인으로 파악되었다.

Abstract: To validate the accuracy of the boiling heat flux partitioning model, an experiment was performed to investigate how the wall heat flux is divided into the three heat transfer modes of evaporation, quenching, and single-phase convection during subcooled nucleate boiling on a vertical wall. For the experimental partitioning of the wall heat flux, the wall heat flux and liquid-vapor distributions were simultaneously obtained using synchronized infrared thermometry and the total reflection technique. Boiling experiments of water with subcooling of 10 °C were conducted under atmospheric pressure, and the results obtained at the wall superheat of 12 °C and average heat flux of 283 kW/m² were analyzed. There was a large difference in the heat flux partitioning results between the experiment and correlation, and the bubble departure diameter and bubble influence factor, which account for a portion of the surrounding superheated liquid layer detached by the departure of a bubble, were found to be important fundamental boiling parameters.

- 기호설명 -

q'' : 열유속 [kW/m²]
A : 표면적 [mm²]
T : 온도 [°C]
 N'' : 기포 생성 밀도 [#/mm²]

f : 기포 이탈 빈도 [1/sec]
 D : 기포 이탈 지름 [mm]
 t_w : 기포 대기 시간 [sec]
 h : 대류 열전달 계수 [W/m²K]
 ϕ : 상 (Phase)

† Corresponding Author, hdkims@khu.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자
w : 벽면

- e : 기화
- q : 급랭
- c : 대류
- d : 이탈 직경
- 1f : 단상
- 2f : 2상

1. 서론

과냉 비등 열전달은 액체가 기체로 변화하는 상변화 과정에 수반되는 열전달 현상으로 매우 높은 열전달 효율을 나타내어 고출력 전자장비의 냉각이나 원자력 발전소 핵연료의 냉각 및 안전 계통 설계에 다양하게 활용되고 있다. 최근에는 전산수치해석 기술의 비약적인 발전을 토대로 비등 열전달 현상을 전산해석코드를 활용하여 해석하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 원자력 분야에서는 원자력 발전소 내에서 발생하는 비등 열전달 현상을 전산해석코드를 이용하여 고정밀도를 가지면서 해석하기 위한 2상유동 해석용 고정밀 전산해석코드의 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.⁽¹⁻³⁾

2상유동 고정밀 전산해석코드 개발을 위해 가장 대표적으로 활용되고 있는 벽면 비등 열전달 모델은 Kurul and Podowski⁽⁴⁾에 의해 제안된 열유속 분배 모델이다. Fig. 1은 열유속 분배 모델의 개념을 도식적으로 보여주며, 기화, 급랭, 단상 대류의 세 가지 열전달 기구를 통해 벽면으로부터 유체로 열전달이 발생한다. 열유속 분배 모델은 전체 열유속 q''_w 를 다음과 같이 분배한다.

$$q''_w = q''_e + q''_q + q''_c \tag{1}$$

q''_e 는 벽면에 기포가 발생하여 벽면에서 제거되는 열전달을 나타내며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$q''_e = N'' f \left(\frac{\pi}{6} D_d^3 \right) \rho_g h_{fg} \tag{2}$$

여기서 N'' 은 기포생성밀도, f 는 기포이탈빈도, D_d 는 기포이탈직경, ρ_g 는 기체의 밀도, h_{fg} 는 증발 잠열이다. q''_q 는 기포가 벽면으로부터 이탈할 때 주변의 과열액체층(thermal boundary layer)을 일부 떼어내면서 이탈하고, 이에 의해 비게 된 공간을 주변의 과열되지 않은 액체가 채우면서 다

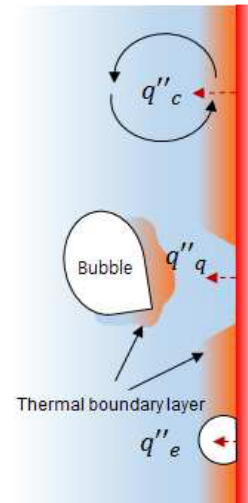


Fig. 1 Conceptual descriptions of heat flux partitioning model proposed by Kurul and Podowski⁽⁴⁾

음과 같은 과도열전도에 의한 열전달을 일으킨다.

$$q''_q = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t_w k_l \rho_l C_{pl} f} \right) A_{2f} (T_w - T_l) \tag{3}$$

t_w 는 기포대기시간, k_l 은 액체열전도도, ρ_l 은 액체의 밀도, C_{pl} 은 액체의 비열, A_{2f} 는 비등 기포 열전달 면적 비율, T_w 와 T_l 은 각각 벽면과 액체 온도이다.

q''_c 는 비등 기포가 발생하지 않는 영역에서 발생하는 자연대류에 의한 열전달을 나타낸다.

$$q''_c = h_c A_{1f} (T_w - T_l) \tag{4}$$

여기서 h_c 는 대류 열전달계수, A_c 는 대류 열전달 면적 비율이다.

Table 1은 열유속 분배 모델을 구성하는 식 (2), (3), (4)의 계산을 위해 사용되어야 하는 세부 인자들을 정리하여 보여준다. 열거된 인자들은 모두 벽면과열도의 함수로 정의되어 있으므로, 벽면과열도가 정해지면 열유속 분배 계산이 가능하다.

벽면과열도를 12 °C로 가정하여 상관식을 이용하여 열유속 분배 계산을 수행하여 보면 기화, 급랭, 단상 대류에 의한 열유속의 비율이 각각 4%, 95%, 1%로 분배되는 결과를 얻는다. 즉, 과열도 12 °C를 가지는 벽면에서 비등 열전달이 발생할 때 비등 기포의 이탈 이후에 발생하는 급랭 효과에 의해 대부분의 열전달이 발생한다는 결과를 나타낸다. 본 결과는 비등 열전달이 과열된

Table 1 Correlations of mechanistic factors in heat flux partitioning model

Factor	Symbol	Unit	Correlation ⁽⁵⁾⁽⁶⁾
Bubble nucleate site density	N''	#/m ²	$N_w = C^n (T_w - T_{sat})^n$ [$C=210$, $n=1.805$]
Bubble departure frequency	f	1/sec	$f = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)}{3D_d \rho_l}}$
Bubble departure diameter	D_d	mm	$D_d = \min\left(0.0014, 0.0006e^{-\frac{\Delta T_w}{45.0}}\right)$
Bubble wait time	t_w	ms	$t_w = 1/f$
Convection heat transfer coefficient	h_c	W/m ² K	$h_c = St \times \rho_c \times C_{pc} \times u_r$
Single phase area ratio	A_{1f}	-	$A_{1f} = 1 - A_{2f}$
Two phase area ratio	A_{2f}	-	$A_{2f} = \min\left[1, \left(\frac{N'' \pi D_d^2}{4} K\right)\right]$
Bubble influence factor	K	-	$K = 4.8e^{\left(-\frac{Ja_{sub}}{80}\right)}$
Jacob number	Ja	-	$Ja_{sub} = \frac{\rho_l C_{pl} \Delta T_{sub}}{\rho_v h_{fv}}$

벽면과 접한 액체가 기체로 상변화 하는 과정에서 수반되는 잠열을 활용하기 때문에 효율이 매우 우수하다는 일반적인 개념과는 차이가 있으며, 본 열유속 분배 모델이 비등 열전달 현상의 물리적 메커니즘을 적절하게 모델링하고 있는지에 대한 실험적 검증의 필요성을 제기한다.

열유속 분배 모델을 검증하기 위해 기존의 몇몇 연구들은 비등에 의한 벽면 열유속을 측정하여 상관식의 q''_w 값과 비교하였으나 총 열유속 예측의 정확도는 검증이 가능하나 열유속의 분배 특성을 검증할 수는 없었다. 다른 연구들에서는 비등 열전달 시 액체 내의 기공률을 측정하여 열유속 분배 모델 내 기화 열유속에 의한 기포 생성량과 비교하여 간접적으로 기화 열유속 예측의 정확성을 검증하려 하였다. 하지만 위와 같은 검증 방법은 열유속 분배 모델을 구성하는 각각의 열유속을 측정하여 개별적으로 검증하지 못하고 열유속의 총합 혹은 일부만을 측정하는 한계를 가지고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 비등 시 열유속 및 액상-기상 분포를 공간 및 시간적으로 동기화하여 획득하여 비등 벽면의 열유속을 기화, 급랭, 단상대류로 분배하는 고정밀 실험을 수행하였다. 벽면 과열도 12 °C를 가지는 비등 열전달 표면 조건에 대해서 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 얻어진 열유속 분배 결과와 열유속 분배 상관식들에 의한 예측 결과를 상호 비교하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치 및 측정 방법

2.1.1 비등 실험 장치 및 시편

Fig. 2는 수직 평판 비등 실험장치의 개략도를 나타낸다. 수조는 알루미늄으로 제작하였으며, 시편이 설치되는 측면은 고온용 단열재인 PEEK 물질로 제작하였다. 수조 내에 immersion 히터와 열전대를 설치하여 액체의 과냉도를 10 °C로 유지하였으며, 압력은 대기압 조건을 유지하였다.

비등 표면의 액상-기상 및 온도 분포를 동기화하여 측정하기 위해서 적외선 열화상 기법과 전반사 가시화 기법을 활용하였으며 두 가지 측정 기법을 동시에 측정하기 위해 Fig. 3과 같은 방법을 사용하였다. 각 측정 방법들에 대한 자세한 설명은 이어지는 절에 추가하였다.

실험에 사용된 시편은 적외선과 가시광선에 대한 투과성이 우수한 사파이어 기판을 사용하였다. 기판 위에 적외선은 차단하지만 가시광선은 투과시키는 Indium-Tin-Oxide(ITO)를 8×15 mm² 크기의 박막 형태로 증착하여 ITO 양단에 전압을 인가하여 비등 실험이 가능하도록 하였다.

2.1.2 벽면 액상-기상 분포 측정

비등 표면의 액-기상 유동 분포는 빛이 입사할 때 만나는 매질의 굴절률에 따라서 임계각보다

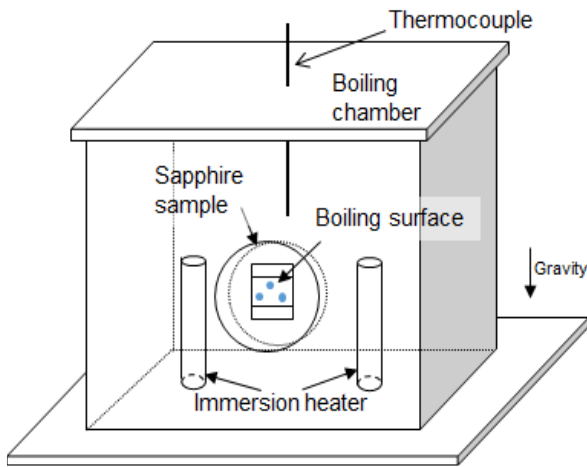


Fig. 2 Schematic of the experimental facility for pool boiling heat transfer test on a vertical wall

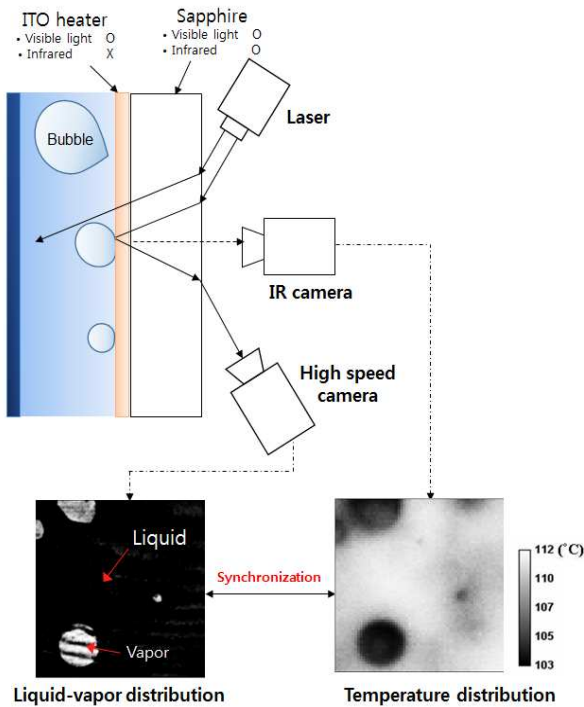


Fig. 3 Overview of experimental method. Optical setups for total reflection and infrared thermometry and synchronization of liquid-vapor phase distribution; temperature distribution

클 경우에 빛이 전반사 되는 성질을 이용하여 가시화 하였다. 액체와 기체는 임계각이 서로 다르며 비등 표면으로 입사시키는 빛의 입사각을 액체와 기체의 임계각 사이 입사각으로 입사시키면 기체가 존재하는 표면에서는 전반사가 발생하고 액체가 존재하는 표면에서는 전반사가 일어나지 않는

다.⁽¹¹⁾ 위와 같은 성질을 이용한 전반사 가시화 기법을 이용하면 Fig. 3의 액상-기상 분포 그림과 같이 액상은 전반사가 발생하지 않아 어둡게 기상은 전반사가 발생하여 밝게 나타난다. 사파이어 시편의 두께는 적외선 카메라의 투과도 및 전반사 기법 적용 가능성을 고려하여 10 mm를 사용하였다.

2.1.3 벽면 온도 분포 측정

비등 표면의 온도 분포는 적외선을 투과시키는 사파이어를 통해 700 nm의 ITO의 뒷면 방향에서 온도분포를 가시화 하였다.^(12,13) ITO는 일정 두께 이상일 경우 적외선을 차폐하기 때문에 적외선 카메라로 ITO의 온도를 측정하면 카메라와 마주보고 있는 방향의 ITO 표면의 온도를 측정 할 수 있다. 따라서 ITO 박막에서 비등이 발생하면 ITO 및 벽면의 온도분포가 변화하게 되고 온도분포의 변화는 적외선 신호로 ITO 뒷면 방향으로 사파이어를 통해 밖으로 발산한다. 이렇게 발산된 적외선 신호는 ITO 뒷면 방향에 위치한 적외선 카메라를 이용하여 Fig. 3의 온도 분포와 같은 결과를 얻을 수 있다.

2.1.4 시간 및 공간 동기화 방법

적외선 열화상 기법을 이용한 온도 분포 가시화와 전반사 가시화 기법을 이용한 2상 분포 가시화 기법은 2 mm 직경의 원형 패턴을 제작하고 가열 표면을 통해 동일한 원형 패턴을 촬영하여 가시화한 패턴을 기준으로 공간적으로 동기화 하였으며, 적외선 카메라와 전반사용 고속카메라를 함수발생기와 연결하여 비등현상을 동시에 촬영하여 시간적으로 동기화 하였다. 동기화된 가시화 정보는 80 μm의 공간 분해능과 1.3 ms의 시간 분해능을 가진다.

2.2 벽면 열유속 분배 방법

2.2.1 열유속 분포 계산

적외선 열화상 기법을 이용하여 얻어지는 비등면의 시간에 따른 온도 분포를 경계조건으로 활용하여 고체 사파이어 기관에 대해 3차원 비정상 열전도 계산을 수행하여 기관 전체의 온도장을 구하고, 이로부터 기관의 윗면인 비등면의 열유속 분포를 계산한다.

Fig. 4는 계산에 사용된 사파이어 기관의 기하학적 구조 및 각 면의 경계조건을 보여준다. 다음은 계산에 사용된 지배방정식과 초기조건 및 경계조건을 나타낸다.

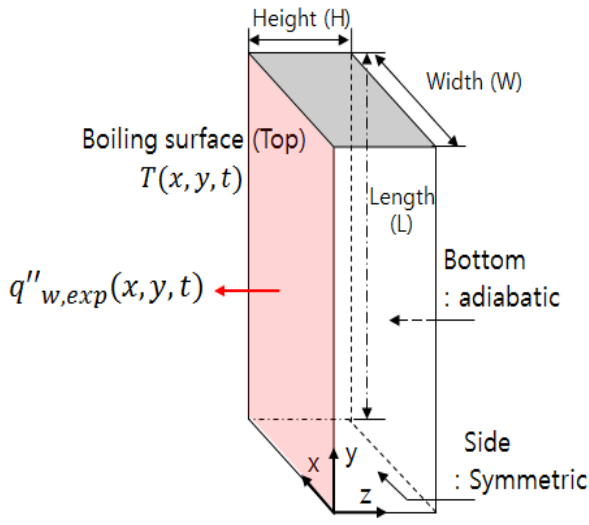


Fig. 4 Geometry and boundary conditions of the solid substrate for transient heat conduction calculation of solid

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

• 초기조건 (t=0) $T(x, y, z) = T_i$ (6)

• 경계조건
 윗면 (z=0) $T(x, y, t) = T_{exp}(x, y, t)$ (7)

밑면 (z=H) $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ (8)

측면 (x=0; x=W) $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (9)

(y=0; y=L) $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (10)

사파이어 기관의 초기 온도 T_i 의 변화가 계산 결과에 영향을 주지 않는 충분히 긴 시간 간격을 계산하여 초기 조건에 의한 결과의 영향이 존재하지 않는 구간에서 결과를 획득하였다.

비등 표면인 사파이어 기관 윗면의 경계조건은 실험에서 측정하는 온도 분포를 적용하였으며, 시간에 따라 국소적으로 발생하는 비등 현상에 의해 빠르게 변화한다. 기관의 밑면은 공기에 의한 자연대류 열손실이 발생하나 비등 열전달에 비해 열전달 계수가 매우 작으므로 단열 경계조건으로 가정하였다. 기관의 측면은 본 실험이 전체 히터 영역 중 중앙 일부분을 측정하였으므로 수평 방향에 대해 대칭조건을 가정하였다.

위 계산 결과로부터 각 시간별 고체 기관 내부의 3차원 온도 분포를 얻을 수 있으며, 비등 표면(z=0)에서의 수직방향 온도구배를 이용하여 벽면 열유속을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q''_{w,exp}(x, y, t) = -k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial z} \quad (11)$$

Fig. 5는 실험으로부터 측정된 비등 표면의 온도 분포와 이를 이용하여 계산된 열유속 분포 결과를 시간에 따라 보여준다.

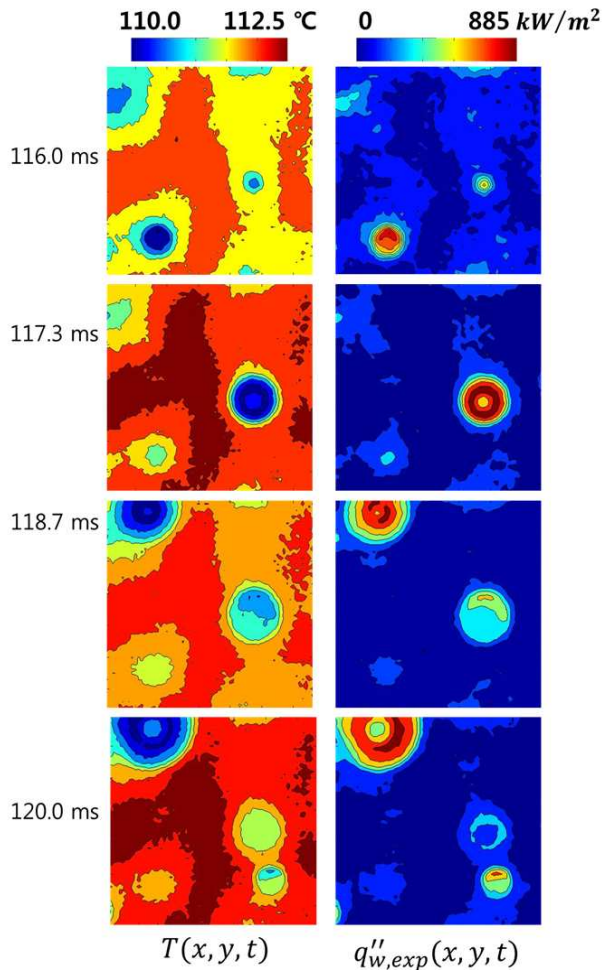


Fig. 5 Measured temperature and calculated heat flux distributions on the boiling surface

2.2.2 열전달 기구별 영역 분배

비등 열전달 표면에서는 기화, 급랭 및 단상 대류 열전달이 서로 다른 위치에서 동시에 다발적으로 발생한다. 뿐만 아니라 기포가 발생하는 지점에서 시간에 따라 기포가 성장하는 시기에는 기화 열전달이 나타나고 기포가 이탈한 이후에는

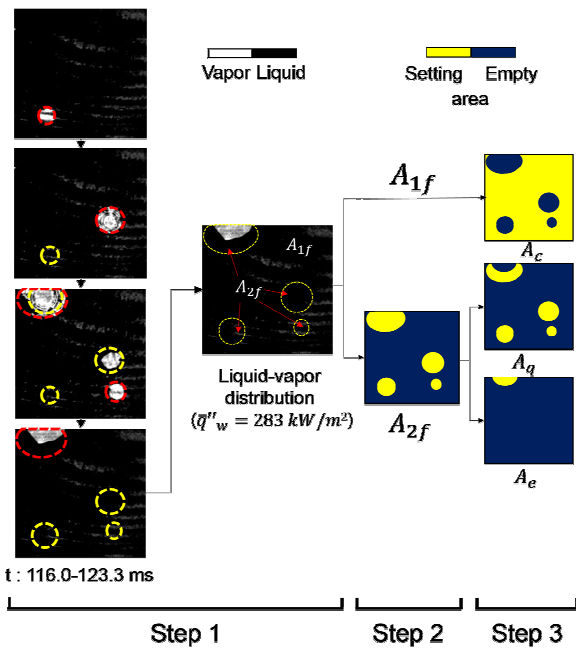


Fig. 6 Heat transfer area partitioning procedures with respect to the three heat transfer modes (evaporation, quenching, single-phase convection)

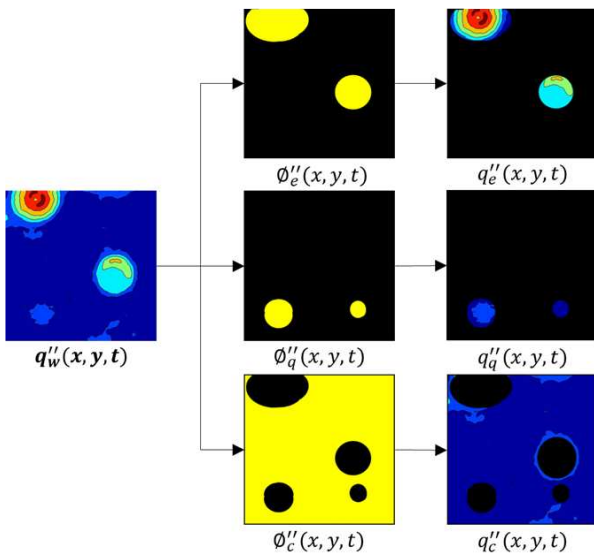


Fig. 7 Wall heat flux partitioning procedures using the area partitioning results with respect to the three heat transfer modes (evaporation, quenching, single-phase convection)

소실된 과열액체층을 회복하기 위하여 벽면으로부터 액체층으로의 비정상 열전도가 발생한다. 따라서 실험에서 측정된 총 벽면 열유속을 세가지 열전달 기구별로 분배하기 위해서 다음의 두

단계 과정에 의해 열전달 영역을 구분한다.

- 공간적으로 비등 표면을 기포가 발생하는 2상 영역과 단상 영역으로 구분한다.
- 시간적으로 2상 영역을 기포가 성장하는 기화 열전달 주기와 기포 이탈 후 급랭 열전달 주기로 구분한다.

Fig. 6은 기화, 급랭 및 대류의 열전달 기구별 영역을 분배하는 과정을 보여준다. 전반사 가시화 결과로부터 얻은 액상-기상 분포를 이용하여 각 열전달 기구별로 해당되는 영역을 정의할 수 있다. A_{2f} 는 2상 영역, A_{1f} 는 단상 영역, A_c 는 대류 열전달 영역, A_q 는 급랭 열전달 영역과 A_e 는 기화 열전달 영역을 나타낸다.

Fig. 6의 step 1은 116.0-123.3 ms 시간 간격 동안 기상영역이 나타난 영역들을 누적하여 2상 영역을 정의하는 과정을 보여주며, 본 과정을 통해 Fig. 6의 step 2에서와 같이 2상 영역(A_{2f})와 단상 영역(A_{1f})을 구분할 수 있다. 최종적으로 Fig. 6의 step 3에서 단상 영역은 대류 열전달 영역(A_c)으로 설정하며, 분석 시간 기준으로 2상 영역 내에 기상이 존재할 경우 기화 열전달 영역(A_e)으로 설정하며 액상이 존재할 경우 급랭 열전달 영역(A_q)으로 설정한다. 본 연구에서는 기포가 나타난 2상 영역 정의 시 타원 형태로 단순화하여 설정하였다.

2.2.3 열유속 분배

Fig. 5의 118.7 ms의 열유속 분포와 Fig. 6의 116.0-123.3 ms 동안의 열전달 기구별 영역 분배를 Fig. 7과 같은 방법으로 적용시키면 결과적으로 기화 열유속 분포, 급랭 열유속 분포 및 대류 열유속 분포로 세분화 할 수 있다. 세분화 된 열유속 결과를 보면 노란색으로 표시된 열전달 기구별 영역에만 열유속이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 본 기법을 활용하여 비등과 관련된 인자들을 개별적으로 측정할 수 있으므로 가열조건 변화뿐만 아니라 다양한 비등실험조건(유속, 과냉도, 표면각)의 영향에 대한 분석이 가능하다.

2.3 불확실도 분석

적외선 열화상 기법을 이용하여 비등표면의 온도를 측정하기 위하여 일정한 온도 조건에서 ITO 표면으로부터 방출되는 적외선의 강도에 대한 보정 곡선을 획득하였다. 보정 실험 시 샘플의 주

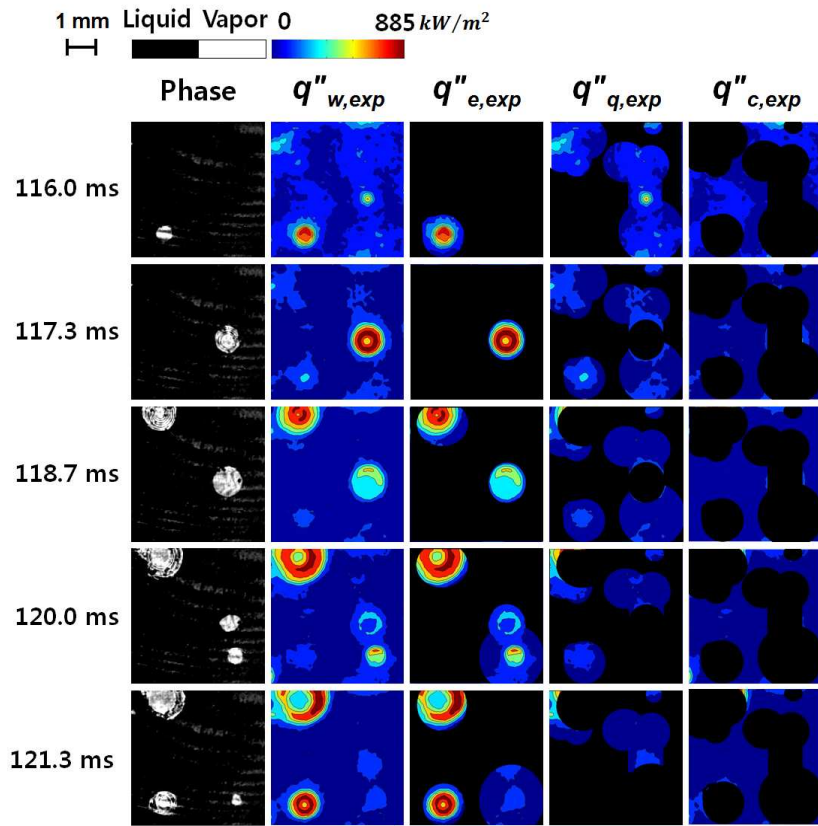


Fig. 8 Experimental results of wall heat flux partitioning at $\bar{q}''_w = 283 \text{ kW/m}^2$

위 온도 측정에 사용된 T형 열전대는 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 오차를 가진 반면, 적외선 카메라 센서의 온도 변화에 대한 민감도는 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 매우 높아 무시할만한 오차를 보였다. 따라서 적외선 열화상을 이용한 표면 온도 측정은 최대 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 오차를 가진다. 온도 측정의 오차로부터 발생하는 표면 열유속 계산의 오차는 최대 약 8%로 나타났다.

3. 결과 및 분석

본 장의 결과는 유동이 없는 풀 상황에서 벽면 과열도 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 및 평균 열유속 283 kW/m^2 에 대한 수직 벽면에서의 순수물의 핵비등 열전달 실험 결과를 분석한 것이다.

3.1 열유속 분배 실험 결과

Fig. 8은 실험에서 획득한 열전달 기구별 열유속 영역 및 분포의 분배 결과를 보여준다. 시간이 지남에 따라 서로 다른 위치에서 기포들이 발생하여 기화 열유속이 나타난다. 또한 각 위치에서 기포가 이탈한 후에 해당 영역은 급랭 열전달

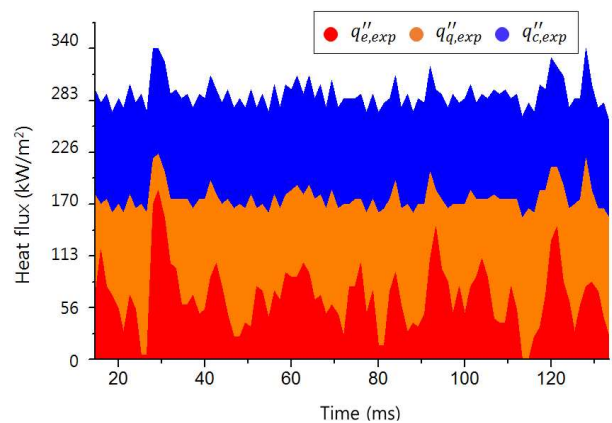


Fig. 9 Instantaneous heat flux partitioning results ($\frac{q''_{e,exp}}{q''_{w,exp}} = 24\%$, $\frac{q''_{q,exp}}{q''_{w,exp}} = 39\%$, $\frac{q''_{c,exp}}{q''_{w,exp}} = 37\%$)

영역으로 구분되면서 급랭 열유속이 나타난다. 기포의 생성 및 성장과 연관된 기화 열유속은 급랭 열유속과 비교하여 매우 높은 열유속 값을 가진다. 나머지 대류 열유속 영역은 시간에 무관하게 일정한 면적을 가지면서 급랭 열유속과 비슷한 수준의 낮은 열유속을 일정하게 유지한다.

Table 2 Comparison of mechanistic factor values from experiment and correlation

Factor	Experimental	Correlation
q_e'' (kW/m ²)	68	19
q_q'' (kW/m ²)	112	460
q_c'' (kW/m ²)	105	5
q_w'' (kW/m ²)	285	482
N'' (#/cm ²)	99	145
f (1/sec)	89	193
D_d (mm)	1.23	0.46
t_w (ms)	8.0	5.2
h_c (kW/m ²)	4.7	0.35
A_{1f}	0.55	0.22
A_{2f}	0.45	0.78
K	0.25	3.29

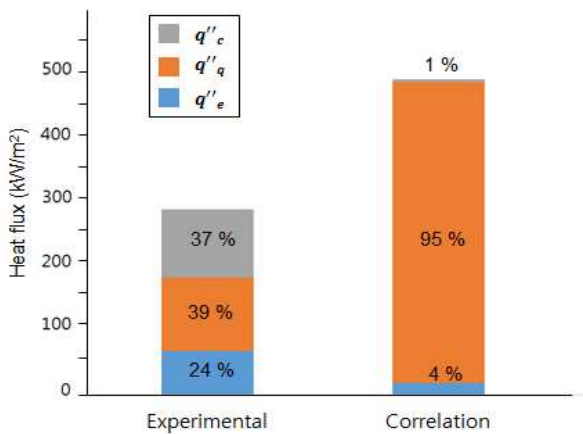
**Fig. 10** Comparison of heat flux partitioning results between experiment and prediction by correlations ($T_w - T_{sat} = 12$ °C, $\bar{q}''_w = 283$ kW/m²)

Fig. 9는 0-132 ms 동안 시간에 따른 총 열유속의 변화 및 열전달 모드별 분배 비율의 변화를 나타낸 것으로, 해당 시간은 평균 12회의 기포가 발생하는 시간 간격으로 비등 현상의 일반적 특성을 분석하기에 충분하다. Fig. 9의 결과에서 총 열유속 값은 시간에 따라 변동을 가지나 평균값은 가해준 283 kW/m²와 오차 범위 내에서 일치하는 결과를 나타낸다. 본 실험 조건에서 실험을 통해 측정된 기화, 급랭, 단상 대류 열유속의 평균 분배 비율은 각각 24%, 36%, 40%를 가지는 것으로 나타났다.

3.2 열유속 분배 상관식과 비교

Fig. 10은 실험으로부터 얻은 열유속 분배와 예측 상관식을 이용하여 얻은 열유속 분배 결과를 비교하여 보여준다. 기화, 급랭, 단상 대류 열유속의 분배에 대해 실험의 경우 24%, 36%, 40%의 비율을 보인 반면, 예측 상관식을 이용한 계산 결과는 4%, 95%, 1%의 비율을 보여 큰 차이를 나타내었다. 특히 예측 상관식은 급랭 열유속이 실험 측정 결과와 비교하여 매우 높은 비율을 차지하는 특징을 가진다.

q''_e 의 경우 실험값이 상관식 값보다 더 크게 나타났다. 이러한 결과의 원인은 기화 열전달 상관식인 식 (2)의 기화 열유속과 관련된 물리 인자를 통해 분석해 볼 수 있다.

기화 열유속에 주로 영향을 미치는 인자는 기포 생성밀도, 기포 이탈 빈도 및 기포이탈 직경이다. Table 2에서 보면 기포생성밀도와 기포이탈빈도는 실험에서 99 #/cm²와 89 sec⁻¹인 반면 상관식 예측 값은 144 #/cm²와 193 sec⁻¹이었다. 기포생성밀도와 기포이탈빈도는 기화 열유속에 정비례하기 때문에 상관식의 기화 열유속이 더 크게 나타나야 하지만 열유속 결과는 반대로 나타났다. 그 이유는 예측 상관식에서 세제곱으로 계산하게 되는 기포이탈직경의 영향을 이용하여 해석할 수 있다. 기포이탈

직경이 실험에서는 1.23 mm인 반면 상관식 예측값은 0.46 mm로 나타나 기포생성밀도와 기포이탈 빈도가 상관식 계산이 더 크게 예측함에도 불구하고 결과적으로 상관식의 열유속 예측값이 실험값보다 낮게 나타난 것으로 판단된다. 실험에서 기포이탈직경은 기화 열전달 영역을 정의하는데 있고 따라서 기화열유속과 밀접한 관계를 가지므로 기포이탈직경이 높게 나타난 실험에서 기화 열유속이 크게 나타났다고 해석할 수 있다.

q''_q 의 경우 식 (3)에서 확인할 수 있듯이 2상 영역의 비율에 큰 영향을 받는다. Table 2의 실험값과 상관식 값을 비교하면 실험 측정값을 통한 2상 분포 영역(A_{2f})의 비율은 45%인 반면, 상관식 계산을 통한 2상 분포 영역의 비율은 75%를 나타냈다. 이러한 영역 비율의 큰 차이는 Fig. 1에서 나타낸 급랭 열전달 영역의 정의와 연관되며 급랭 영역은 기포가 비등 표면을 이탈할 때 주변의 온도경계층을 추가적으로 끌고 올라가는 현상을 포함하도록 모델링한다. 현재의 비등 열유속 분배 상관식은 이를 기포이탈직경의 함수로 표현하며 기포 영향 인자(bubble influence factor) K 로 나타낸다. K 가 4인 경우 기포 이탈 직경의 2배에 해당하는 영역을 급랭 영역으로 설정한다는 의미이며, 본 연구의 상관식에서는 Table 2에서 보여주는 바와 같이 과냉도의 영향에 의해 4보다는 작은 3.29의 값을 가지는 것으로 나타났다. 반면, 실험 결과로부터 K 값을 도출하기 위하여 비등 기포의 이탈 시 벽면 열유속이 영향을 받는 영역을 살펴보면, Fig. 11에서 나타나듯 기포 밀면이 비등 표면과 직접 접하는 기상 영역의 크기가 높은 열유속이 나타나는 영역의 크기와 거의 유사함을 확인할 수 있다. 높은 열유속 영역과 기포 이탈 직경을 비교하여 보면 0.5의 비율을 가지고, 이때 K 값은 0.25를 가진다.

추가적으로 Fig. 11에서 붉은색 점선은 K 를 3.29로 적용하였을 경우에 포함되는 영역을 표시한 것으로, 비등에 의한 열유속 변화가 매우 미미한 영역까지 급랭 영역에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 상관식을 이용한 계산에서 급랭 열유속 영역에 대한 정의가 실험 결과보다 과대하게 설정되어 2상 분포 영역의 비율(A_{2f})이 실제 물리적 상황보다 크게 설정되어 결과적으로 급랭 열유속 값의 비율이 매우 커지게 된 것으로 이해된다. 따라서 물리적 상황을 적절히 반영시킬 수 있는 K 값의 설정을 위한 체계적인 실험 연구가 추후 수행

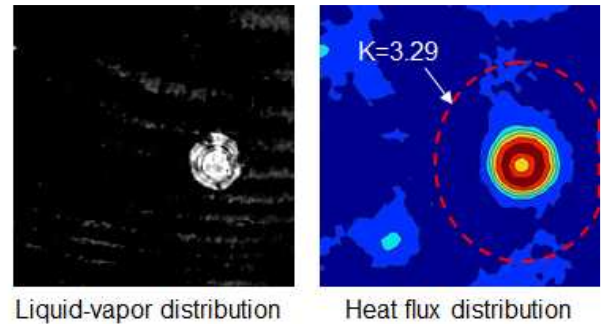


Fig. 11 Liquid-vapor phase and heat flux distribution underneath a growing boiling bubble. The dotted line indicates the equivalent bubble base area predicted with bubble influence factor $K = 3.29$

되어야 하겠다.

q''_c 는 식 (4)를 보면 단상대류 열전달 계수(h_c)와 벽면과 유체의 온도차의 곱에 비례하며, 또한 전체 열전달 면적에서 단상대류 열전달 영역이 차지하는 비율에 비례한다. 실험에서 측정된 단상대류 열전달계수는 $4.7 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 인 반면 상관식에 의한 계산 결과는 $0.35 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 로 실험과 비교하여 매우 작게 나타났다. 또한, 실험에서 단상 열전달 영역의 비율은 55%인 반면 상관식은 22%로 더 작게 예측하였다. 이것은 상관식이 급랭 영역의 비율을 과도하게 예측하였기 때문에 상대적으로 단상 열전달 영역이 작아지는 효과가 나타난 것으로 이해된다. 결과적으로 단상대류 열전달계수 및 단상 영역비율을 모두 작게 예측하여 대류 열유속의 분배 비율이 작게 나타나게 되었다고 해석된다.

4. 결 론

본 연구는 전반사 가시화 기법과 적외선 열화상 기법을 이용하여 비등 표면의 액상-기상 분포와 온도 분포를 동기화하여 측정하는 기법을 이용하여, 수직평판 자연대류 과냉비등에서 기화, 급랭, 및 단상대류 열전달 기구에 대한 열유속 분배 특성을 실험적으로 조사하였다. 실험은 대기압 상황에서 과냉도 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 가지는 물을 이용하여 수행하였으며, 본 연구에 사용된 결과의 획득 조건은 벽면과열도 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 및 평균 열유속 283 kW/m^2 이다. 비등 열유속 분배에 대한 실험에 의한 측정값과 상관식에 의한 계산값을 비교하고 차이가 나는 원인을 분석하였다. 본 연구의 실험의 조건에서 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 열유속 분배 모델의 예측 상관식은 실험과 비교하여 기포의 생성밀도와 이탈빈도를 높게 예측하였는데도 불구하고 기포이탈직경을 매우 낮게 예측하여 최종적으로 기화 열유속을 낮게 예측하는 결과를 나타낸다.

(2) 기포의 이탈 직경을 기준으로 기포의 거동이 벽면 열전달에 영향을 미치는 영역을 정의하는 기포영향인자 K 가 실험 결과와 비교하여 열유속 분배 모델에서 크게 설정되어 있어서 급랭 열전달 영역의 비율을 과도하게 증가시키며 결과적으로 급랭 열전달이 매우 높게 나타나는 결과를 초래한다. 향후 기포 발생 시 표면 열유속 분포를 체계적으로 분석하여 물리 현상을 제대로 반영할 수 있는 기포영향인자 K 가 결정되어야 한다.

후 기

이 논문은 2013년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2013M2B2A9A03051378)

참고문헌 (References)

- (1) In, W. K., Shin, C. H., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2004, "Numerical Analysis of the Subcooled Boiling Flow in a Heated Rod Bundle," *The Third National Congress on Fluids Engineering*, August 26-28, Jeju, Korea.
- (2) Jo, J. C., Kim, H. J., Kim, W. S., Yu, S. O. and Lee, Y. K., 2004, "Numerical Analysis of Boiling-induced Multiphase Flow in a Helical Steam Generator Coiled Tube," *The Third National Congress on Fluid Engineering*, August 26-28, Jeju, Korea.
- (3) Son, G., 2001, "Numerical Simulation of Bubble Motion During Nucleate Boiling," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 25, No. 3, pp. 389~396.
- (4) Kurul, N. and Podowski, M. Z., 1990, "Multidimensional Effects in Forced Convection Subcooled Boiling," *Proceedings of the 9th Int. Heat Transfer Conference*, Vol 2, pp. 19~24.
- (5) ANSYS Inc., 2010, ANSYS Fluent Theory 13.0 Guide Manual, USA.
- (6) AEA Technology, 1997, CFX-4 Solver Manual, Harwell, UK.
- (7) Bjorg, R. W., Hall, G. R. and Rohsenow, W. M., 1982, "Correlation of Forced Convection Boiling Heat Transfer Data," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 6, pp. 753~757.
- (8) Kandlikar, S. G., 1998, "Heat Transfer Characteristics in Partial Boiling, Fully Developed Boiling, and Significant Void Flow Regions of Subcooled Flow Boiling," *J. Heat Transfer*, Vol. 120, No. 2, pp. 395~401.
- (9) Lahey, R. T., 1978, "A Mechanistic Subcooled Boiling Model," *Proceedings of the 6th Int. Heat Transfer Conference*, Vol. 1, pp. 293~297.
- (10) Basu, N., Warriar, G. R. and Dhir, V. K., 2005, "Wall Heat Flux Partitioning During Subcooled Flow Boiling: Part II – Model Validation," *J. Heat Transfer*, Vol 127, pp. 141~148.
- (11) Nishio, S., Gotoh, T. and Nagai, N., 1998, "Observation of Boiling Structures in High Heat-flux Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 21, pp. 3191~3201.
- (12) Gerardi, C. D., 2009, "Investigation of the Pool Boiling Heat Transfer Enhancement of Nano Engineered Fluids by Means of High-speed Infrared Thermography," Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- (13) Chung, H. J. and No, H. C., 2003, "Simultaneous Visualization of Dry Spots and Bubbles for Pool Boiling of R-113 on a Horizontal Heater," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 12, pp. 2239~2251.