

주입 위치에 따른 기포와 상변화물질의 유동 상호 작용에 관한 연구

김민혁* · 지윤영** · 손동기*** · 고한서†

Study on Flow Interaction between Bubble and Phase Change Material according to Injection Location

Min Hyeok Kim*, Yun Young Ji**, Dong Kee Sohn***, Han Seo Ko†

Abstract In this study, we conducted analysis of bubble dynamics and flow of liquid phase change material(PCM) using shadowgraphy and particle image velocimetry(PIV). Characteristics of internal flow varied depending on locations of injection when solid PCM was liquefied from heated vertical wall. When bubbles rose immediately, they exhibited elliptical shape and zigzag trajectory. In contrast, when bubbles rose after merging at the bottom of solid PCM, with equivalent diameter for the inter-wall distance of 0.64 or greater, they showed a jellyfish shape and strong rocking behavior. It was observed by the PIV that the small ellipse bubbles made most strong flow inside the liquid PCM. Furthermore, the flow velocity was highest in the case of front injection, as the directions of temperature gradients and bubble-driven flow were aligned. The results underscore the significant influence of injection location on various characteristics, including bubble size, shape, rising path of bubbles, and internal flow.

Key Words : Flow Visualization(유동가시화), Phase Change Material(상변화물질), Bubble Tracking(기포 추적), Bubble Size(기포 크기), Bubble Shape(기포 형상)

기호설명

ρ_p : 입자의 밀도

d_p : 입자의 지름

u_0 : 액체 상변화물질 유속

μ_{pcm} : 액체 상변화물질의 동점도

l_0 : 특성 길이

d_{eq} : 기포의 등가 지름

d_{maj} : 기포의 장축

d_{min} : 기포의 단축

† School of Mechanical Engineering and Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University
E-mail: hanseoko@skku.edu

* School of Mechanical Engineering,
Sungkyunkwan University, Undergraduate student

** Department of Smart Fab. Technology,
Sungkyunkwan University, Graduate student

*** School of Mechanical Engineering,
Sungkyunkwan University, Research Professor

1. 서론

기포의 역학적 특성은 2상 유동 분야에서 언제나 주목받는 연구 분야이다. 일반적인 기포역

학에 대한 연구는 기포의 형상, 속도, 궤적에 초점을 두며 상승하는 단일 기포의 움직임 분석한다.⁽¹⁻⁴⁾ 기포의 역학적 특성에 대한 연구는 대부분 물을 작동 유체로 설정하여 진행된다.⁽⁵⁻⁶⁾

물이 아닌 다른 물질인 작동 유체에서 기포의 유동은 물과는 다른 결과를 보인다. Huang⁽⁷⁾은 물 뿐만 아니라 kerosene, ethanol 등과 같은 다양한 작동 유체 내부에서 기포의 상승 궤적과 형상이 달라짐을 분석했다. Liu⁽⁸⁾는 점도가 높은 글리세롤 수용액에서 기포의 형상과 물 내부의 기포 유동을 비교하였다. 점도가 높은 유체 내부에서 기포가 상승하게 되면 같은 유량을 주입하더라도 기포의 표면이 안정되고 진동이 적게 발생한다. 따라서, 작동 유체의 점도에 따라 내부에서 이동하는 기포가 다른 특성을 보이므로 물보다 점도가 높은 작동 유체 내부의 기포 유동에 관한 연구가 이루어져야 한다.

물 외의 물질을 작동 유체로 설정한 연구 중, 상변화물질을 이용한 연구가 있다. Organic 상변화물질은 물보다 약 4~10배 높은 점도를 가진다.⁽⁹⁾ Choi⁽¹⁰⁾는 기포 구동을 통해 상변화물질 내부에 대류를 발생시켰다. 기포 구동으로 인한 대류 특성은 기포 주변의 후류에 의해 결정된다.⁽¹¹⁻¹²⁾ 후류는 벽면의 존재와 기포간 거리에 영향을 받는다. Yan⁽¹³⁾은 기포가 상승할 때, 벽면이 후류에 미치는 영향을 분석하였다. Maeng⁽⁵⁾은 벽면과 기포간 거리에 따라 후류의 유동이 달라짐을 분석하였다. 상변화물질은 특정 온도 이상에서 고상에서 액상으로 변화하는 성질을 가지는 물질로, 발열벽 근처의 고체 상변화물질이 액화하며 기포의 유동 가능 영역이 점차 확장된다. 이는 마치 시간에 따라 벽면이 이동하는 것과 같은 현상을 보인다. 상변화물질에 기포를 주입할 경우 기포와 벽면간 거리에 따른 유동 분석이 필요하다.

본 실험은 Choi⁽¹⁰⁾의 실험 구성을 참고하여 진행하였다. 해당 연구는 상변화물질 내 기포를 주입하여 열전달 효율만을 검증하였다. 하지만 열전달을 향상시키기 위해서는 2상 유동 특성에 대한 분석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 기포 주입 위치 별 시간에 따른 기포의 크기,

형상, 상승 경로 그리고 액체 상변화물질의 내부 유동장 분석을 통해 상변화물질과 기포의 유동 상호 작용에 대해 연구하였다. 섀도우그래피(Shadowgraphy)와 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry)를 통해 유동을 가시화하여 상변화물질의 액화 현상과 기포 유동 그리고 액체 상변화물질의 유동장을 분석하였다. 또한 기포와 벽면 간 거리가 기포와 상변화물질 내부 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위해 기포 주입 위치를 바꿔가며 가시화 실험을 통해 결과를 도출하였다. 본 연구 결과는 기포와 벽면 간 거리가 기포 유동과 내부 유동장에 미치는 영향과 고점도 유체 내부의 기포역학적 특성에 관한 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 목업의 형상 및 기포 주입 위치를 보여준다. 목업 하단 면적의 규격은 44×44mm이며, 친수성 물질과 상변화물질을 각각 15mm, 130mm 높이로 담을 수 있도록 제작했다. 목업 하단에는 기포가 일정한 크기로 주입되도록 지름 2mm의 구멍을 뚫었다. 그리고 가열된 벽면으로부터 8, 22, 36mm의 거리로 기포 주입구를 만들었으며 이는 각각 Fig. 1의 ①(Front), ②(Center), ③(Back)에 상응한다. 또한 실험 진행 중, 상변화물질이 벽면에서 이

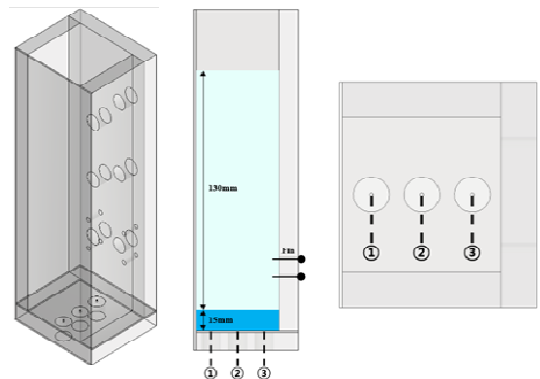


Fig. 1. Structure of mockup for bubble injection

탈되는 것을 방지하기 위해 가열된 벽 반대에 고정 핀을 설치하였다.

2.2 작동 유체

실험에 사용된 상변화물질은 녹는점이 28°C 인 n-octadecane(분자식: C₁₈H₃₈)이며, 44 × 44 × 130mm (= 251.68ml)만큼의 용량을 사용하였다.

원활한 기포 주입을 위해 고체 상변화물질이 기포 주입구를 막지 않도록 목업 하단에 친수성 물질층을 두었다. 본 실험의 재연성을 위해서는 설정된 위치에서 기포가 즉시 상승하는 것이 중요하다. 물로 친수성 물질층을 구성할 시, 표면장력이 높아 상변화물질과의 경계층이 곡면으로 형성되어 기포 주입 위치를 바꿔도 기포가 중심으로 모여 상승하는 문제가 있다. 따라서 표면장력이 낮으며 n-octadecane에 용해되지 않는 액체인 에탄올을 사용했다. 40wt% 에탄올 수용액의 표면장력은 29.63mN/이다.⁽¹⁴⁾ 이는 n-octadecane의 표면장력27.9±3mN/m의 범위 안의 값이다. Table 1은 에탄올 농도에 따른 n-octadecane의 용해도를 나타낸다. 30°C에서 40wt%의 에탄올은 n-octadecane에 약 6.45 × 10⁻³wt%의 낮은 용해도를 보임을 알 수 있다. 따라서 40wt% 에탄올 수용액은 본 실험에 기포 주입 위치 변경을 위한 친수성 물질층으로 사용하기에 적합하다.

Table 1. Solubility of n-octadecane in ethanol/water system⁽¹⁵⁾

| [C ₂ H ₅ OH] wt% | [n- C ₁₈ H ₃₈], wt% | |
|---|--|------------------------|
| | 10°C (Solid) | 30°C |
| 10 | 1.5 × 10 ⁻⁴ | 1.5 × 10 ⁻⁵ |
| 30 | - | 1.9 × 10 ⁻³ |
| 50 | 1.9 × 10 ⁻³ | 0.011 |

2.3 기포 주입 실험 세팅

Fig. 2는 본 실험 세팅에 대한 도식도이다. 벽면에 균일한 열을 가하기 위해 구리판에 구리 히터(Rubber heater)를 부착하였다. 구리 히터는 전원 장치(DC supply)에 연결하여 10W의 전력을 주었다. 히터로 인해 제공되는 열원의 온도를 파

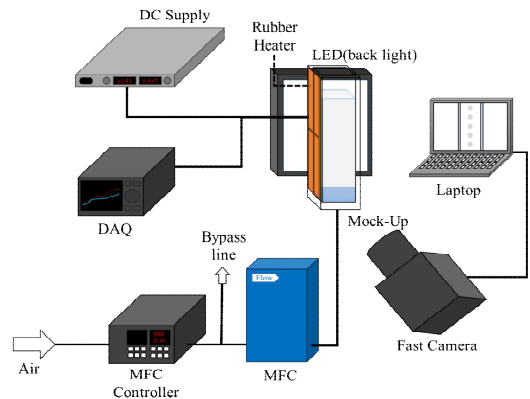


Fig. 2. Experimental setup for bubble injection

악하기 위해서 내부에 열전대(TC, Thermocouple)를 설치하였고, 데이터 기록기(GL840)를 이용해 30초 간격으로 열원벽의 온도를 기록하였다. 기포 주입을 위해 목업에 체크밸브를 연결하여 작동 유체가 기포 주입구를 통해 흘러나오는 것을 방지하였다. 그리고 MFC 조절기를 통해 기포가 일정한 크기로 주입되도록 유량을 51sccm으로 설정하였다. 주입된 기체는 공기이며 상온과 동일한 25°C로 제공하였다. 공기는 실험 시작 20분부터 상변화물질이 모두 용융될 때까지 계속적으로 주입하였다.

2.4 가시화 실험 세팅

기포 주입에 따른 상변화물질의 액화 현상과 기포의 유동 특성을 관찰하기 위해 가시화 기법 중 입자영상유속계와 웨도우그래피를 사용하였다.

Fig. 3은 입자영상유속계와 웨도우그래피를 위한 실험 도식도이다. 먼저 입자영상유속계를 위해 레이저와 파워 컨트롤러를 설치하였고, 레이저에서 조사된 빛이 렌즈를 통과하여 레이저 시트의 형태가 되도록 하였다. 이때 레이저 시트가 기포의 상승 경로를 포함하도록 조사하여 기포 및 기포 상승으로 기인된 상변화물질의 유동을 촬영하였다. 초고속카메라를 이용해 10분 간격으로 촬영하였으며, 프레임은 기포의 유동을 자세히 관측할 수 있도록 500fps으로 설정하였다. 주입부터 자유수면 도달까지를 하나의 기포 상승으로 기준을 잡고 촬영하였다.

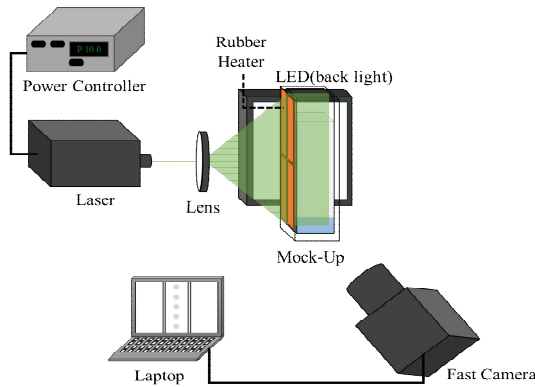


Fig. 3. Experimental setup for visualization

입자영상유속계는 유동을 따라 이동하는 입자를 이미지화 하여 유동의 벡터장을 추정하는 방법이다. 유동을 추적하기 위해 입자를 투입하였다. 입자영상유속계를 위한 추적입자의 적합성은 입자의 밀도와 스톡스 수로 판단하였다. 입자의 밀도는 1.1g/cm^3 이며, 스톡스 수는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Stk} = (\rho_p d_p^2 u_0) / (18\mu_{\text{pcm}} l_0) \quad (1)$$

본 연구에서는 532nm 파장의 녹색 연속파로 조명되는 Rhodamine-B(FF1015-05, FLUOSTAR) 형광 입자를 사용하였다. 계산된 스톡스 수는 2.87×10^{-8} (<1)으로 유선을 따라가기에 매우 충분하다고 할 수 있다. 입자 수는 상변화물질이 완전히 액화한 후, 30particles/mm^3 이 되도록 투입하였다.

연속적으로 얻은 상변화물질의 내부 유동 이미지는 상호상관법을 통해 분석하였다. 연속적으로 얻은 이미지는 여러 개의 영역으로 나누어 분석하였다. 분석 영역은 $32 \times 32\text{pixel}^2$ 에서 $16 \times 16\text{pixel}^2$ 로 축소하였고, 각 영역이 50% 교차되도록 설정하여 오류를 최소화하였다.

쉐도우그래피는 상변화물질의 액화 정도와 기포의 상승 현상을 측정하는데 사용하였다. LED 빛은 투명한 액상의 상변화물질을 통과하는 반면, 불투명한 고상의 상변화물질을 통과하지 못하고 차단되어 명암을 통해 상변화과정의 명확한 감지가 가능하다. 또한 조사된 빛은 기

포와 작동 유체의 경계면에서 굴절되기 때문에 기포 형상과 유동의 관찰 또한 가능하다. 쉐도우그래피를 위한 LED는 목업 뒷면에 카메라를 마주하도록 설치하였다.

기포 형상과 이동 경로는 촬영한 이미지를 다음과 같은 알고리즘을 이용해 MATLAB으로 분석하였다. 촬영된 이미지에서 고상과 액상의 상변화물질을 구분하고, 기포를 분리하기 위해서 임계값(Threshold)을 0.5로 지정하여 이보다 낮은 값은 0으로, 큰 값은 1로 변환하는 이미지 이진화 작업을 진행했다. 실험 중 기포에서 이탈된 친수성 혼합물과 부유하고 있는 미세 기포를 제거하였다. 기포의 픽셀 수를 고려하여 연결된 픽셀이 100개 이하면 노이즈(Noise)로 판단해 제거하였다. 기포의 형상을 더욱 자세히 관찰하기 위해 고체 상변화물질을 제거하였는데 perimeter 속성을 이용해 기포를 제외하고 인접해 있는 픽셀을 제거함으로써 수행되었다. 기포의 이동 경로는 기포를 이루는 픽셀의 연결성을 이용해 추적하였다. 이진화 이미지에서 기포와 상변화물질간 밀도차로 인해 기포 테두리가 검은색으로 표현된다. 이때 픽셀에서 연결된 컴포넌트를 찾아 centroid 속성을 사용해 객체의 질량 중심 좌표를 추출하였다. 이때 기포가 원형으로 연결되지 않으면 기포 중심의 정밀한 추출이 어려우므로 이를 확인하는 작업이 필요하다. 마지막으로 추출한 중심 좌표를 데이터화 함으로써 기포의 상승 경로를 출력하였다.

3. 실험 결과

Fig. 4는 상변화물질의 액화 과정을 나타낸다. 흰색으로 표시된 영역은 액체 상변화물질이며, 검은색으로 표시된 영역은 고체 상변화물질이다. 목업의 왼쪽에는 가열벽이 위치하며, 오른쪽은 단열재로 단열하였다. 고체 상변화물질의 액화는 가열된 벽에 의해 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 액체 상변화물질 영역이 충분히 넓어지지 않으면 상승하는 기포가 고체의 상변화물질에 가려져 기포의 관찰이 어렵다. 따라서 기포 유동이 충분히

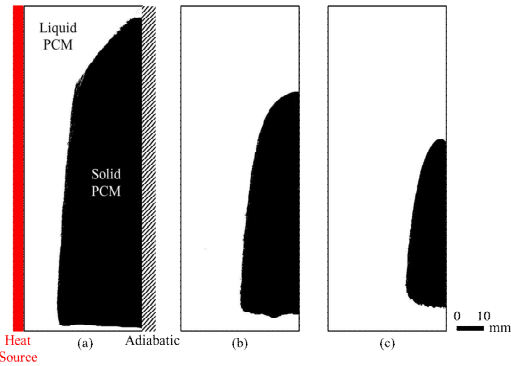


Fig. 4. Melting procedure of PCM by shadowgraphy: (a) 90min, (b) 110min and (c) 130min

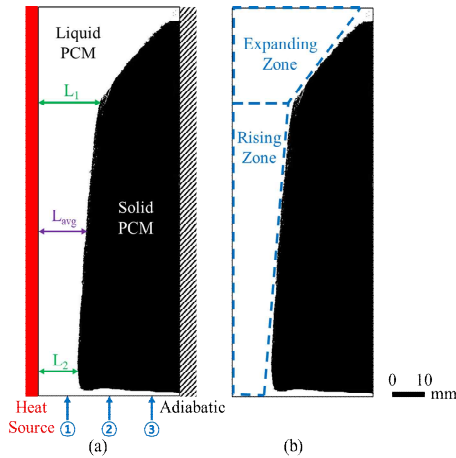


Fig. 5. Shadowgraphy result of PCM: (a) L_{avg} and (b) Zone division

관찰되도록 60분 이후의 데이터를 분석하였다.

Fig. 5(a)는 가열된 벽과 고체 상변화물질 사이의 거리를 명명한 것이다. 기포 주입 위치는 ①, ②, ③이며, 가열된 벽면으로부터 각각 8, 22, 36mm 떨어져 있다. 기포 주입 위치 별 기포 크기와 고체 상변화물질의 액화 정도를 알아보기 위해 상변화물질의 고상과 액상 경계면과 가열된 벽 사이의 거리, 즉 기포의 상승 가능 폭을 측정하였다. 상변화물질이 액화할 때, 열층화 현상과 기포의 상승 유동으로 인해 Fig. 4와 같은 형태로 액화가 진행된다. 이때 벽면에서 고체 상변화물질까지 거리가 높ی마다 다르므로 벽면 거리를 지정할 필요가 있다. 위쪽에서 고체 상변화물질 곡면이 크게 바뀌는 점에서부터

벽면까지의 거리를 L_1 이라 하고, 고체 상변화물질 벽면과 가장 가까운 거리를 L_2 라 하여 L_1 과 L_2 의 평균값인 $L_{avg}=(L_1+L_2)/2$ 로 벽면간 거리를 지정하였다. Table 2는 60분 이후에 가열된 벽으로부터 고체 상변화물질까지의 평균 거리 (L_{avg})를 측정한 것이다. 즉, L_{avg} 는 기포의 상승 가능 폭을 의미한다. 액체 상변화물질의 가로 폭은 고체 상변화물질의 액화 정도를 보여주므로 같은 시간대에서 L_{avg} 가 클수록 액화 속도가 빠름을 알 수 있다. 따라서 80분까지는 ②의 액화 속도가 다른 주입구에 비해 빠르고, 이후로는 ②와 ③의 액화 속도가 ①에 비해 빠르다는 것을 알 수 있다.

Table 2. L_{avg} at each injection point

| Time (min) | Front | Center | Back |
|------------|-------|--------|-------|
| 60 | 9.17 | 12.55 | 9.31 |
| 80 | 14.10 | 16.92 | 14.28 |
| 100 | 19.02 | 21.86 | 21.52 |
| 120 | 24.91 | 26.38 | 27.72 |
| 140 | 32.57 | 33.57 | 33.93 |
| 160 | 44.00 | 44.00 | 44.00 |

L_{avg} 가 벽면부터 기포 주입 위치까지의 거리보다 작으면 기포가 하단에서 멎치고, 더 크면 기포가 즉시 상승하는 현상이 나타난다. Fig. 5(a)와 같이 L_{avg} 가 ①까지의 거리보다 작을 경우, ①에서 주입된 기포는 고체 상변화물질에 막히지 않아 즉시 상승하는 것이 가능하지만, ②와 ③에서 주입된 기포는 고체 상변화물질의 하단에서 멎치게 되므로 상승하는 기포의 크기는 더욱 커진다. 이처럼 상변화 정도에 따라 기포 주입 위치 별 기포의 즉시 상승 가능 시간대는 차이를 보인다. 따라서 기포 주입 위치와 시간에 따라 기포의 크기가 변화함을 알 수 있다.

이를 알아보기 위해 주입 위치 별 시간에 따른 기포의 크기를 계산해보았다. 기포의 등가 지름(d_{eq})은 Eq. (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$d_{eq} = (d_{maj}^2 \times d_{min})^{1/3} \quad (2)$$

Table 3은 기포 주입 위치 별 시간에 따른 기포의 등가 지름(d_{eq})을 측정된 것이다. MFC를 이용해 51sccm의 일정한 유량으로 기포를 주입했기 때문에 즉시 상승한 기포의 크기는 모두 비슷하므로 즉시 상승한 기포는 d_{eq} 의 평균값을 사용하였다. 그 결과 즉시 상승한 기포의 등가 지름은 ①, ②, ③에서 각각 3.08mm, 2.87mm, 3.05mm로 측정되었다. 그리고 고체 상변화물질의 하단에서 뭉친 후 상승한 기포의 등가 지름은 즉시 상승한 기포에 비해 약 2~3.8배 크게 측정되었다.

Table 3. d_{eq} of rising bubble

[Units : mm]

| Time (min) | Front | Center | Back |
|------------|-------|--------|-------|
| 60 | 3.08 | 8.03 | - |
| 80 | | | 11.16 |
| 100 | | 11.63 | |
| 120 | | 9.78 | |
| 140 | | 3.05 | |
| 160 | | | |

Fig. 6은 쉐도우그래피 기법을 이용해 대표적인 기포 크기에서의 기포의 형상과 상승 형태를 나타낸 것이다. 기포의 형상을 구별하기 위해서 무차원수인 에트뵈스 수(Eötvös number, Eo)를 계산하였다. Eo 수는 부력과 표면장력의 상대적 크기를 나타내며, We 수는 관성력과 표면장력의 상대적 크기를 나타낸 무차원 수이다. 두 식은 다음과 같이 정의된다.

$$Eo = g(\rho_f - \rho_g) d_{eq}^2 / \sigma \tag{3}$$

$$We = \rho_f u_0^2 d_{eq} / \sigma \tag{4}$$

여기서 g 는 중력가속도, ρ_f 와 ρ_g 는 유체와 기체의 밀도, σ 는 표면장력이다. Fig. 6(a)는 즉시 상승한 기포로 작은 타원(Small ellipse)의 형태를 보인다. 이때, Eo 수는 2.2~2.6이며, We 수는 4~5.5의 범위를 갖는다. 외력보다 표면장력이 지배적이기 때문에 타원형의 기포 형상을 유

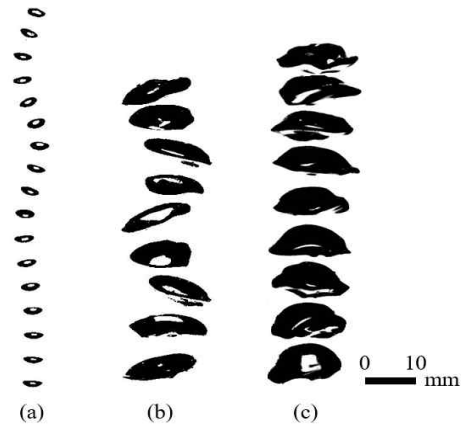


Fig. 6. Shape of rising bubble by shadowgraphy: (a) Small ellipse, (b) Large ellipse, and (c) Jellyfish shape

치한 채 상승한다. 반면 Fig. 6(b)는 하단에서 뭉친 후 상승한 기포로 (a)의 기포보다 등가 지름이 약 3배 크고 장축이 약 3~4배 긴 타원형(Large ellipse)이다. 이때, Eo 수는 17~36이고, We 수는 8~15이다. Fig. 6(b)는 작은 타원형보다 부력의 영향이 커져 불안정하게 타원형을 유지하며, 기포의 중심이 위아래로 진동하는 락킹(Rocking) 현상이 관찰된다. Fig. 6(b)와 유사 범위의 Eo 수와 We 수를 갖는 (c)에서는 부력이 매우 크게 작용하여 기포의 형태가 타원형을 유지할 수 없었다. 따라서 기포는 해파리와 비슷한 형상(Jellyfish shape)을 보이며 락킹 현상이 가장 두드러지게 관찰된다. 이처럼 Eo 수와 We 수가 큰 경우에는 표면 장력에 비해 기포에 작용하는 외력의 영향이 지배적이다. 즉, 큰 타원형과 해파리 형상의 경우, 기포가 상승함에 따라 형상이 변형되는 모습을 보인다.

Eo 수와 We 수가 큰 경우에 2개의 다른 형태를 갖는 기포가 형성된다. 이를 구별하기 위해서 벽면 거리에 대한 기포의 등가 지름 비(d_{eq} / L_{avg})를 Table 4에 정리하였다. ②의 60분과 ③의 80분에서 d_{eq} / L_{avg} 는 0.64 이상의 값을 나타냈다. 이때, 기포는 해파리 형상으로 상승한다. 반면, d_{eq} / L_{avg} 가 0.64보다 작은 경우에는 큰 타원형 또는 작은 타원형의 기포가 관찰되었다. 이를 통해 기포의 형태는 Eo 수와 We 수뿐만

아니라 기포 크기와 벽간 거리의 비율 또한 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Table 4. d_{eq} / L_{avg} for each injection point

| | Front | Center | Back |
|-----|-------|--------|------|
| 60 | 0.34 | 0.64 | - |
| 80 | 0.22 | 0.17 | 0.78 |
| 100 | 0.16 | 0.13 | 0.54 |
| 120 | 0.12 | 0.11 | 0.35 |
| 140 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| 160 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |

기포의 형태에 따른 기포의 상승 경로를 분석하였다. 기포의 경로를 2개의 영역으로 나누었다. 이를 Fig. 5(b)에서 나타냈으며, 고체 상변화물질의 곡면이 크게 변하는 구간을 기점으로 위를 확장영역(Expanding zone), 아래를 상승영역(Rising zone)이라고 명명하였다. Fig. 7(a), (b), (c) 각각 ①, ②, ③에서 기포를 주입했을 때, 기포 주입 위치 별 측정 시간에 따른 기포의 상승 경로를 나타낸다. 그리고 기포 주입구의 위치를 $x=0$ 으로 정했다. 기포 형상이 고체 상변화물질에 의해 가려져 하단 영역에서 관찰이 어려운 관계로 추적이 가능한 시간대부터 나타내었다. Fig. 7(b)의 60분, (c)의 60~100분을 보면, 해당 구간에서 기포는 오른쪽으로 치우친 경로로 상승한다. 면밀히 살펴보면, 상승영역에서 열원벽부터 고체 상변화물질까지의 거리 폭이 위로 갈

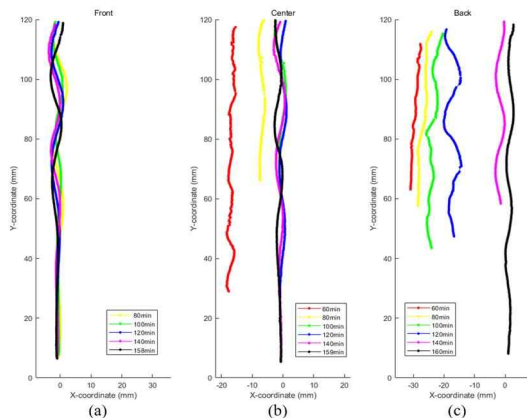


Fig. 7. Bubble trajectory for each injection point: (a) Front, (b) Center, and (c) Back

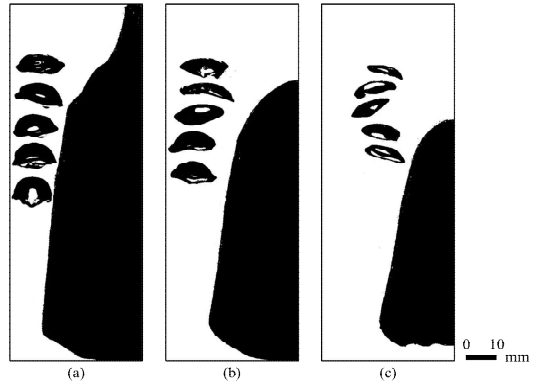


Fig. 8. Bubble shape of back case by shadowgraphy: (a) 80min, (b) 100min, and (c) 120min

수록 조금씩 넓어짐에 따라 기포는 고체 상변화물질 벽면을 따라 상승한다. 그리고 기포가 확장영역에 진입하여 벽간 거리 폭이 크게 증가함에 따라 유동 저항이 낮아져 오른쪽으로 치우치는 현상은 더욱 명확하게 관측된다. 그 외의 시간대에서 기포는 주기성을 보이며 지그재그 경로로 상승하는 것이 관찰된다.

Fig. 8은 기포 주입 위치가 ③인 경우, 80~120분까지의 기포와 고체 상변화물질 이미지를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 Fig. 6(c)와 같이 해파리 형태로 기포가 상승하는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 8(c)의 경우 Fig. 6(b)와 같이 기포의 크기가 큰 타원형을 띠며 상승하는 것이 관찰된다. Fig. 8(b)에서는 기포의 형상이 해파리형태에서 11mm로 비슷하지만, 앞서 언급한 Table 4의 d_{eq} / L_{avg} 에 의해 두 기포의 형상이 결정된다. Fig. 8(a)와 (b)의 경우와 달리, (c)에서는 기포의 크기에 비해 매우 넓은 공간이 확보되어 있다. 따라서 기포가 벽면의 영향을 받지 않고, 타원형을 띠며 지그재그 경로로 상승하는 것을 관찰할 수 있다.

Table 5는 기포 형상에 따른 액체 상변화물질과 기포의 평균 속도를 나타낸다. All은 전체 액체 상변화물질, Near는 기포의 상승 경로에 위치한 액체 상변화물질, Bubble은 기포의 평균 속도를 의미한다. 액체 상변화물질과 기포의 평균 속도 모두 작은 타원형이 가장 높은 것을 알 수 있다. 그리고 작은 타원형, 큰 타원형 그리고

해파리 형태에서 기포 속도에 대한 기포 근처 액체 상변화물질의 유속의 비율을 구하면 각각 7.01%, 2.99%, 2.95%로 작은 타원형이 액체 상변화물질의 유속에 미치는 영향이 더 지배적임을 알 수 있다. 그리고 해파리 형태가 큰 타원형에 비해 기포의 상승 속도가 상대적으로 느려 기포 상승 경로에 위치한 액체 상변화물질의 유속도 느려짐에도 불구하고, 전체 상변화물질의 유속은 빨라진다. 이를 통해 해파리 형태의 기포가 락킹 현상으로 진동함에 따라 상승 경로 이외의 전체 상변화물질에 강한 움직임이 전달됨을 유추할 수 있다.

Table 5. Mean velocity according to bubble shape

[Units : m/s]

| | Small ellipse | Large ellipse | Jellyfish shape |
|--------|---------------|---------------|-----------------|
| All | 0.0062 | 0.0049 | 0.0053 |
| Near | 0.0170 | 0.0063 | 0.0060 |
| Bubble | 0.2425 | 0.2105 | 0.2037 |

Fig. 9는 기포 주입 위치에 따른 액체 상변화물질의 평균 속도장을 나타낸다. Table 6은 기포 주입 위치에 따른 액체 상변화물질과 기포의 평균 속도를 보여준다. 상변화물질 내부에 투입한 입자를 추적하여 프레임 간 시간과 위치 차이로 벡터를 계산하였다. 주입 위치에 따라 영역별 벡터를 통해 평균 속도장을 구하였다. 먼저 (a)~(c)의 경우 모두 왼쪽 벽에서 열을 가하고 있기 때문에 가열된 벽에 가까운 상변화물질은 상대적으로 고온으로 됨에 따라 내부 온도구배로 인해 시계 방향으로 자연대류가 발생한다. 온도구배로 인한 자연대류가 발생한 상태에서 (a)의 경우 기포주입으로 인한 대류가 온도구배로 인한 대류와 유동 방향이 일치하여 시계 방향으로 큰 순환 셀이 형성되며, 상승하는 기포와 유속 모두 가장 빠른 속도를 보인다. (b)의 경우 중심에서 기포가 상승하여 양쪽으로 두 개의 순환 셀이 형성된다. 왼쪽은 온도구배로 인한 대류와 반대 방향으로 형성되어 순환 셀이 약하게 나타난다. 오른쪽은 온도 구배 대류의 방향과 일치하여 더 빠른 유속의 순환 셀이 형성된다. (c)의 경우 기포주입으로 인한 대류와 온도구배로 인

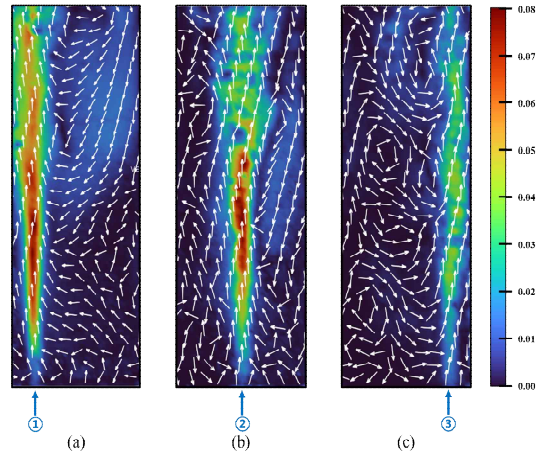


Fig. 9. Velocity field of liquid PCM according to injection location by PIV: (a) Front, (b) Center, and (c) Back

Table 6. Mean velocity according to injection location

[Units : m/s]

| | Front | Center | Back |
|--------|--------|--------|--------|
| All | 0.0128 | 0.0114 | 0.0062 |
| Near | 0.0257 | 0.0255 | 0.0170 |
| Bubble | 0.2472 | 0.2420 | 0.2264 |

한 대류 방향이 서로 반대이다. 따라서, 기포가 상승하는 속도와 유동 모두 온도구배에 의한 대류에 영향을 받아 세가지 경우 중 가장 낮은 유속을 보이며, (a)보다 작은 순환 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

기포 주입 위치에 따른 상변화물질과 기포의 유동 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 웨도우그래피와 입자영상유속계를 통해 가시화 실험을 진행하였으며, 기포 주입구의 위치를 ①(Front)/②(Center)/③(Back)으로 바꿔가며 기포 주입 위치 별 시간에 따른 가열된 벽과 고체 상변화물질 사이의 거리, 기포의 등가 지름, 상승 경로, 형상을 분석하였다. ①에서는 기포가 친수성 물질층 계면에서 즉시 상승하였으며, 지그재그 경로로 상승하였다. 반면 ②와 ③의 경우, 기포가 고체 상변화물질로 인해 하단에서 뭉친

후 상승하였고, 액화가 더 진행된 후에는 기포가 즉시 상승할 수 있었다. 상승 과정에서 벽과 고체 상변화물질 간 거리에 대한 등가 지름 비율(d_{eq} / L_{avg})이 0.64 이상인 경우, 해파리 형상의 기포가 강한 락킹 현상을 보이며 오른쪽 대각선 방향으로 상승하였다. 상변화물질의 액화가 더 진행되면, 기포가 상승할 수 있는 공간이 충분히 확보되어 등가 지름이 크거나 작은 타원형 형태로 락킹 현상과 함께 지그재그 경로로 상승하는 유동을 보였다. 기포의 형상 별 유동장을 본 결과 작은 타원형의 기포가 상승 속도가 가장 빨랐으며 주변 유동장의 속도 또한 가장 빠른 모습을 보였다. 그리고 해파리 형태가 큰 타원형보다 기포의 상승 속도가 느림에도 전체 상변화물질에 강한 움직임 전달을 발생시켰다. 마지막으로 ①에서 기포를 주입하면 온도구배로 인한 자연대류와 유동 방향이 일치해 가장 빠른 유속을 보였으며, ③의 경우 온도구배와 기포 구동으로 인한 유동 방향이 달라 유동장의 속도가 가장 느린 결과를 보였다. 본 연구 결과를 바탕으로 기포에 작용하는 힘에 대한 연구를 추가적으로 진행한다면 벽면과 기포 간 거리에 따른 상호작용 분석과 기포 주입을 통한 상변화물질 냉각 시스템 성능 향상에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021R1A2C1006166)(NRF-2019R1A2C2003176).

REFERENCE

- Zenit, R. and Magnaudet, J., 2008, "Path instability of rising spheroidal air bubbles: a shape-controlled process," *Physics of Fluids*, Vol. 20(6), pp.061702
- Saffman, P. G., 1956, "On the rise of small air bubbles in water," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 1(3), pp.249~275
- Ellingsen, K. and Risso, F., 2001, "On the rise of an ellipsoidal bubble in water: oscillatory paths and liquid-induced velocity," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 440, pp.235~268.
- Kim, S., Chung, J. H., Lee, J. W., Sohn, D. K., and Ko, H. S., 2019, "Study on optimum structure of air-lift bio-reactor using numerical analysis of two-phase flow," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 17(3), pp.24~31.
- Maeng, H. and Park, H., 2021, "An experimental study on the heat transfer by a single bubble wake rising near a vertical heated wall," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 165, pp.120590.
- Moon, E., and Kim, D., 2022, "Interaction between a rising toroidal bubble and a free surface," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 20(2), pp.55~62.
- Huang, S. F., 2023, "Mechanism study of bubble dynamics under the buoyancy effects," *Nuclear Analysis*, Vol. 2(1), pp.100060.
- Liu, L., Hongjie, Y. and Guojian, Z., 2015, "Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 62, pp.109~121.
- Baled, H. O., Xing, D., Katz, H., Tapriyal, D., Gamwo, I. K., Soong, Y., Bamgbade, B. A., Wu, Y., Liu, K. McHugh, M. A. and Enick, R. M., 2014, "Viscosity of n-hexadecane, n-octadecane and n-eicosane at pressures up to 243 MPa and temperatures up to 534 K," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 72, pp.108~116.
- Choi, S. H., Sohn, D. K. and Ko, H. S., 2021, "Performance enhancement of latent heat thermal energy storage by bubble-driven flow," *Applied Energy*, Vol. 302, pp.117520.
- De Vries, A.W.G., Biesheuvel, A. and Van

- Wijngaarden, L., 2002, "Notes on the path and wake of a gas bubble rising in pure water," *International journal of multiphase flow*, Vol. 28(11), pp.1823~1835.
- 12) Celata, G. P., Cumo, M., D'Annibale, F. and Tomiyama, A. 2004, "The wake effect on bubble rising velocity in one-component systems," *International journal of multiphase flow* Vol. 30(7~8), pp.939~961.
- 13) Yan, H. J., Zhang, H. Y., Zhang, H. M., Liao, Y. X. and Liu, L. 2023. "Three-dimensional dynamics of a single bubble rising near a vertical wall: Paths and wakes," *Petroleum Science*. Vol. 20, pp.1874~1884.
- 14) Phan, C. M., 2021, "The surface tension and interfacial composition of water/ethanol mixture," *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 342, pp.117505.
- 15) Chang, S. S., Maurey, J. R. and Pummer, W. J., 1983, "Solubilities of two n-alkanes in various solvents," *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 28(2), pp.187~189.