

## 연성회로기판 기반 수평전열관 표면의 비등기포거동 가시화 실험 연구

김재순\* · 김유나\* · 박군철\* · 조형규<sup>†</sup>

### Visualization Experiment for Nucleate Boiling Bubble Motion on a Horizontal Tube Heater Fabricated with Flexible Circuit Board

Jae Soon Kim\*, Yu-Na Kim\*, Goon-Cherl Park\* and Hyoung Kyu Cho<sup>†</sup>

**Abstract** The Passive Auxiliary Feedwater System(PAFS) is one of the advanced safety concepts adopted in the Advanced Power Reactor Plus(APR+). To validate the operational performance of the PAFS, detailed understanding of a boiling heat transfer on horizontal tube outside is of great importance. Especially, in the mechanistic boiling heat transfer model, it is important to visualize the phenomena but there are some limitations with conventional experimental approaches. In the present study, we devised a heater based on the Flexible Printed Circuit Board (FPCB) for a more comprehensive visualization and subsequently, a digital image processing technique for the bubble motion measurement was established. Using the measurement technique, important parameters of the nucleate boiling are analyzed.

**Key Words** : Nucleate Boiling(핵비등), Flexible Heater(연성전열관), Image Processing(영상처리), Heat Partitioning(열분배모델)

#### 1. 서론

국내에서 새롭게 개발된 가압경수로 APR+(Advanced Power Reactor Plus)는 다양한 피동 안전계통을 통해 안전성을 증진하였다. 피동보조급수계통(PAFS: Passive Auxiliary Feedwater System)은 APR+ 원자로의 피동안전계통 중 하나로, 증기발

생기 2차 측에 연결된 수평 열교환기가 대형 수조 속에 잠겨있는 구조이다. 이를 통해 사고 발생 시에도 기기의 능동적인 가동 없이 자연대류에 의해서 원자로 노심에서 발생한 잔열을 제거한다<sup>(1)</sup>. 따라서 이러한 PAFS의 열제거 성능을 검증하는 것은 원자로의 안전성 평가에 중요한 인자이며, 이에 PAFS의 수평관 열교환기에서 일어나는 기구학적 비등열전달에 대한 정확한 이해가 원자로 안전해석에 중요하다<sup>(2)</sup>.

최근의 비등열전달 예측에는 RPI 모델<sup>(3)</sup>로 불리는 기구학적 비등열전달 모델이 주로 사용되고 있으며, 이러한 기구학적 모델에서는 기포의 거동을 직접적으로 반영하고 있어 다양한 기하학적 구조

---

<sup>†</sup> Department of Nuclear Engineering, Seoul National University

E-mail: chohk@snu.ac.kr

\* Department of Nuclear Engineering, Seoul National University

---

및 유동 조건에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 기구학적 열전달 모델은 현상에 기반한 열전달 모델로, 예측 성능에 기포관련 변수가 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 기포와 기포 주변 유동 현상을 정확히 이해하는 것은 정확한 열전달량 예측과 직접적으로 연관된다. 그러나 기존의 일반 전열관을 이용한 비등연구에서는 열속이 증가함에 따라서 전열관 표면에서 생성되는 다수의 기포로 인해 관과 평행한 방향에서의 관측이 방해되는 한계가 존재하였다. 따라서 본 연구에서는 정확한 기포 거동 관측을 위하여 연성회로기판 (FPCB, Flexible Printed Circuit Board) 기반의 특수 전열관을 제작하였다. 이 전열관은 얇은 가열폭을 가진 형태로, 기포에 대한 관 평행 방향에서의 관측을 방해하지 않도록 제작하였다. 제작한 히터 표면에서 발생한 기포를 전열관과 평행 및 수직인 두 방향에서 90도 각도로 동시에 촬영한 후, 디지털 영상처리를 통해 3차원으로 재구성하여, 기포 부피, 기포 주기, 이탈직경, 부상직경 등 비등열전달의 주요 변수를 도출하였다. 본 논문에서는 실험장치, 디지털영상처리를 통한 상분리 기법, 3차원 기포 재구성 기법 및 주요 변수 측정 결과를 소개한다.

## 2. 수평관 표면 비등거동 가시화 실험

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 실험 루프

본 연구에서는 다양한 열수력 조건에서 기포거동을 관측하기 위해 입구 압력, 입구 온도, 유속 제어 가능한 실험 루프를 설계 및 제작하였다. 본 실험의 원형은 APR+가 채택하고 있는 피동보조급수계통의 열교환기로서, 열교환기 부근에서의 압력은 1~2기압, 열교환기 주변온도는 상온에서 약 2기압에 해당하는 포화온도를 포함한다<sup>(1)</sup>. 피동보조급수계통이 작동하면 자연대류가 시작되며, 본 연구에서는 이와 같은 원형의 유동조건을 재현할 수 있게 실험장치를 설계하였다. 그림 1은 실험루프의 전경이다.

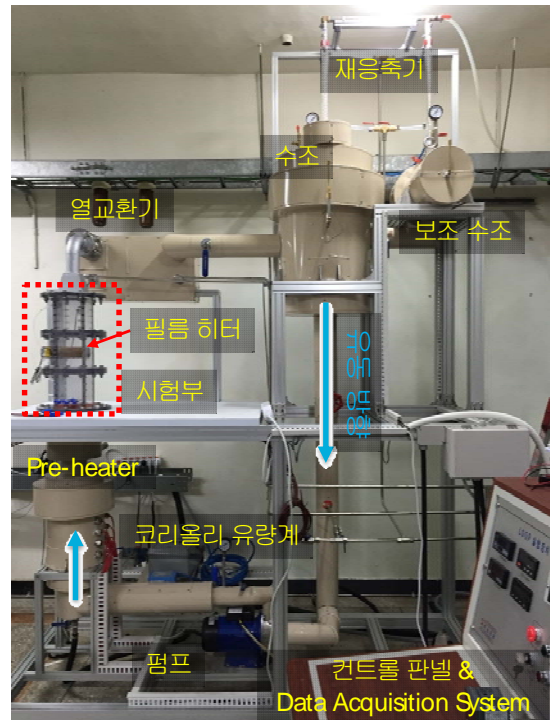


Figure 1. 실험 루프 전경 및 구성

#### 2.1.2 국부가열 전열관

기존의 전열관은 열속이 증가함에 따라 가열면 표면의 기포가 지나치게 많아지면서 측면 촬영(측방향) 시 기포가 중첩되어 촬영되는 문제가 존재하였다(그림2). 따라서 본 연구에서는 수평관 표면 비등기포 연구에 필요한 단일 기포 생성을 위하여 FPCB 기반의 국부가열 특수 필름 히터를 제작하였다(그림3). 이 히터는 얇은 가열면을 가진 구조로, 히터 축 방향으로 추가적인 기포가 생성되지 않도록 하여 기포로 인한 가시화의 간섭을 배제하였다. 그림 4는 제작된 히터를 통해 축/수직 방향에서 관측한 비등 현상으로 축방향에서의 관찰이 용이해짐을 확인하였다(그림4).

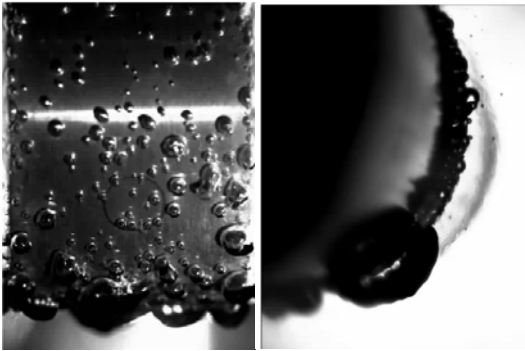


Figure 2. 일반 전열관의 수직/축방향 촬영 결과

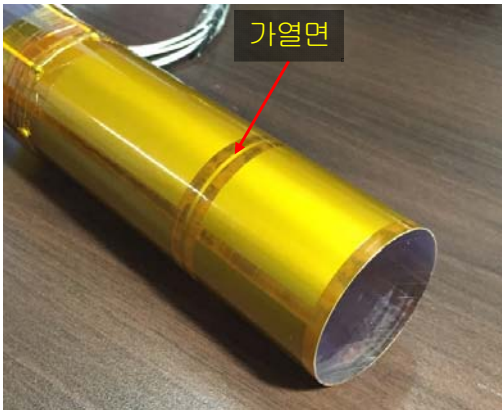


Figure 3. 연성회로기관 기반 특수 필름히터

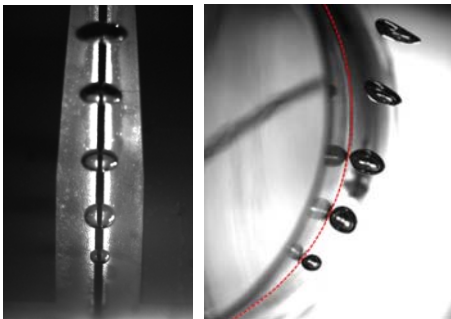


Figure 4. 연성회로기관 기반 전열관의 수직/축방향 촬영 결과

## 2.2 측정 기기

본 실험에서는 기포 거동 영상 촬영과 더불어 루프 내 온도, 시험부 압력, 시험부 전/후단 간 차압, 루프 내 유량을 취득하였다. 기포 거동 영상은

두 대의 고속카메라 (Phantom 社 V711-16G-M with fast option, Motionpro 社 Y4)를 통해 동기화하여 촬영하였다.

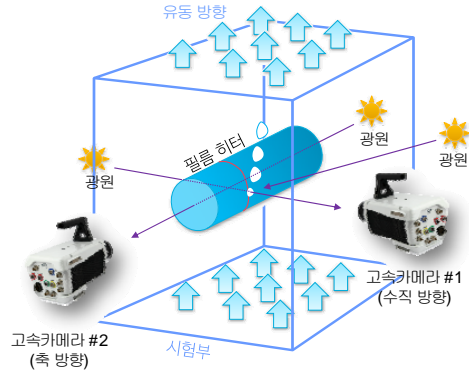


Figure 5. 카메라 배치도

## 3. 상분리 기법

실험에서 촬영된 영상을 shadowgraphy 기법을 기반으로 비등 기포의 상분리를 진행하였다(그림 6,7).

축방향 영상의 경우, 기포의 축방향 방향 형상 뿐만 아니라 전열관 표면과 기포의 접촉 여부를 판단 할 수 있기 때문에, 이를 이용해 기포 이탈 직경, 부상 직경, 활주 길이 등과 같은 다양한 변수의 도출이 가능하다.

수직 영상의 경우, 후방 조명이 전열관을 관통해 입사 되어야 하기 때문에 조명 조건이 상대적으로 좋지 않고, 기포의 위치에 따른 원근감 차이가 존재하여 분석할 수 있는 정보에 한계가 있다. 또한 띠 형태의 히터 디자인으로 인해 배경이미지가 복잡하고, 측면 조명으로 인해 기포 그림자나 반사광이 영역에 따라 다르게 관찰되는 등의 특징이 있다. 따라서 수직 영상 분석 시, 영상의 대비 조정, 가열면 기준의 영역 분리, 각 영역에 서로 다른 상분리 기준 적용 등의 방법을 이용하여 상분리의 정확도를 높였다. 상분리 과정은 아래와 같다.

- (1) 원본 촬영 이미지
- (2) 영상을 반전하고 배경 제거

- (3) 이진화
- (4) 형상 내부의 빈 부분 채움
- (5) Convex hull
- (6) 원본 이미지와의 비교 검증

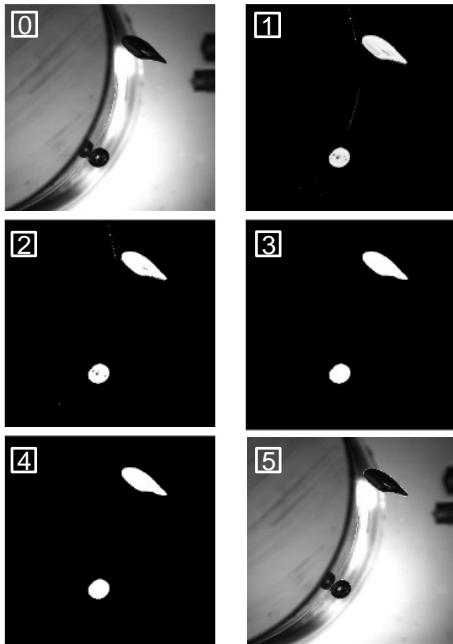


Figure 6. 측방향 영상 상분리

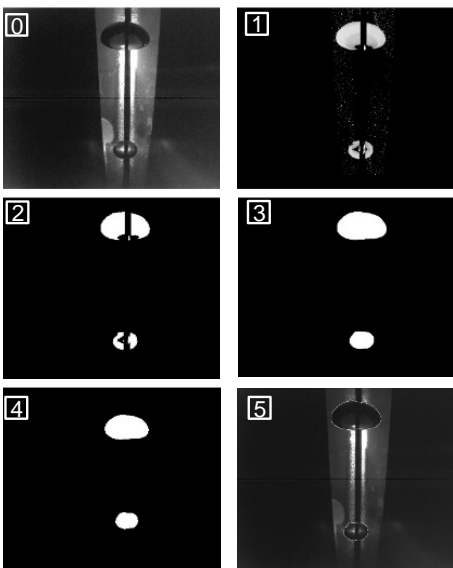


Figure 7. 수직 영상 상분리

### 4. 3차원 재구성 기법

상분리 영상을 이용하여 정확한 부피 측정과 기포 거동을 이해하기 위해서 기포 형상의 3차원 재구성을 실시하였다. 본 연구에서는 두 방향에서 관찰한 영상 정보를 동시에 활용하여 기포의 높이별 단면을 결정하고 그에 해당하는 높이방향 추출 단면을 축적하여 3차원 입체 형상을 구성하였다.

#### 4.1 기포 단면 결정법

본 연구에서는 그림 8과 같은 방법으로 단면을 결정하였다. 수직 영상의 기포 형상은 원근감 문제가 존재하여 축방향 형상 정보를 기준으로 동일한 높이를 갖도록 형상의 크기를 보정하였다. 보정을 통해 두 영상에서의 기포 높이가 같으며, 양 영상에서 각각 동일한 최대 및 최소점을 갖는다. 이 최대/최소점을 대각선으로 이어 이 선을 기준으로 각 높이 방향 픽셀에 대해서 각기 다른 4개 타원장, 단축을 도출한다. 그 후, 각 사분면마다 장, 단축 정보를 이용하여 서로 다른 타원을 그려 해당 높이의 단면이 완성된다. 이렇게 결정된 단면을 가지는 입체 추출 과정을 모든 높이에 대하여 반복하면 그림 9와 같은 3차원 기포 형상이 완성된다. 이러한 단면 결정 방법은 사분면마다 단면의 곡률을 달리 결정할 수 있어 비등방형의 기포 형상도 재구성 하여 정확한 기포 거동 측정이 가능하다는 장점이 있다.

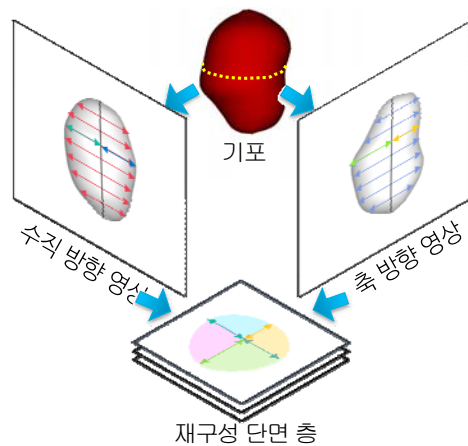


Figure 8. 기포 단면 및 축 구성

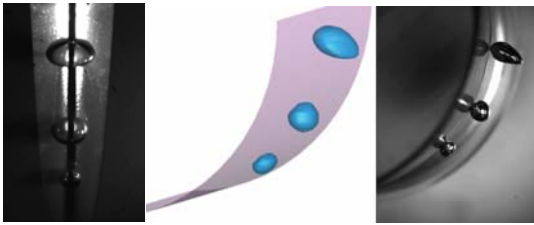


Figure 9. 3차원 기포 재구성 결과

### 4.2 재구성 기법 검증

수평관 위를 활주하는 기포의 축방향, 수직 방향 형상은 서로 큰 차이가 있다. 이를 단일 방향에서의 촬영 결과로 해석하는 경우, 기포가 등방 형상을 가진다고 가정하고 그 단면을 원으로 결정해야 한다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 임의의 형상을 이용하여 단방향 측정 (mono-scopic visualization)과 양방향 측정 (stereoscopic visualization)을 비교하고 본 연구가 제시하는 3차원 재구성 기법의 정확도를 검증하였다. 그림 10은 단일 형상 정보를 활용하여 측정한 기포의 부피와 양방향의 정보를 활용한 입체의 부피를 실제 임의의 형상(phantom)의 부피와 비교한 결과이다. 이를 통해 본 연구의 재구성 기법이 단일 방향 측정에 비해 크게 개선된 정확도를 보임을 확인할 수 있다. 단방향 측정의 경우 최대 81.2%의 오차를 나타냈으며, 양방향 측정의 경우 최대 18%의 오차를 나타내었다. 본 연구에서는 기포의 장축과 단축 방향에 카메라를 위치시켰으므로, 이 방향에서 관측한 임의의 현상 재구성 결과는 1% 이하의 오차를 나타내었다.

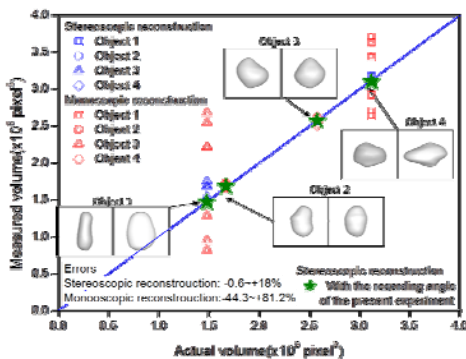


Figure 10. 오차 검증

## 5. 실험 결과

### 5.1 기포 거동 관측 결과

단일 기포의 거동은 기포에 작용하는 힘들의 합력에 따라 결정된다(그림11, 12)<sup>(4)</sup>. 기포의 주기는 생성부터 이탈까지 (1) 발생 및 성장, (2) 이탈 및 활주, (3) 기포 부상의 세 가지 구간으로 나눌 수 있다<sup>(5)</sup>. 기포가 활주와 더불어 지속적으로 성장함에 따라, 기포에 작용하는 합력으로 인해 표면에서 떨어져 나오게 되며 이때의 기포 지름을 기포부상 직경(lift-off diameter)이라 한다. 본 연구에서는 기포의 이탈 직후 표면에서 잠시 떨어져 나오는 1차 부상과 표면에 재부착된 뒤 일정 거리를 활주한 후 떨어져 나오는 2차 부상이 모든 경우에서 관찰되었다(그림 13). 1차 부상 현상은 Okawa<sup>(6)</sup>의 실험 등 다른 연구에서도 보고된 바 있으며, 이러한 현상이 발생하는 원인으로 정압력 (constant pressure force)과 표면장력(surface tension force)이 큰 영향을 미치는 것으로 추측된다. 증발에 의해 기포 내부의 압력이 증가하면 주변의 액체를 밀어내며 기포 성장이 진행된다. 이때 벽면과 접촉하고 있는 부분은 고정되어 있기에, 벽면에 가하는 힘에 대한 반작용으로 기포가 벽면에 수직인 방향으로 멀어지게 하는 힘이 작동한다. Klausner<sup>(4)</sup>는 이를 정압력으로 표현하여 모델한 바 있다. 또한 기포 생성 초기 비구형의 기포가 가열벽면에 형성되는데, 이러한 기포는 표면 장력의 영향으로 구형의 기포가 되려는 힘이 작동한다. 이러한 힘은 기포를 벽면에서 떨어뜨리는 방향으로 작동하여, 기포의 벽면으로부터의 이탈이 발생하는 힘의 하나로 기여했을 것으로 판단된다.

1차 부상 이후 기포는 증력의 영향으로 다시 가열면에 재부착된다. 이후 가열 벽면을 따라 활주하며, 가열면과의 접촉으로 인한 미세층 증발 및 가열면 인근 과열 액체의 증발로 인해 기포 성장이 진행된다. 기포는 부력의 영향으로 점차 가속되며, 속도가 어느 이상 증가할 경우, 기포를 벽면에서 떨어뜨리는 방향으로 작동하는 양력이 기포를 벽면으로 부착시키려는 힘을 극복하며, 기포의 2차 부상이 나타난다. 이와 같은 생성-1차 부상-재부착-활주-2차 부상으로 진행되는 기포 주기(life-cycle)



관측 결과를 그림 13에 나타내었다.

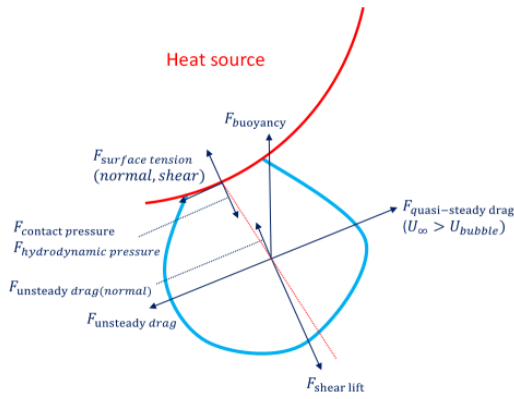


Figure 11. 기포에 작용하는 힘 (45도)

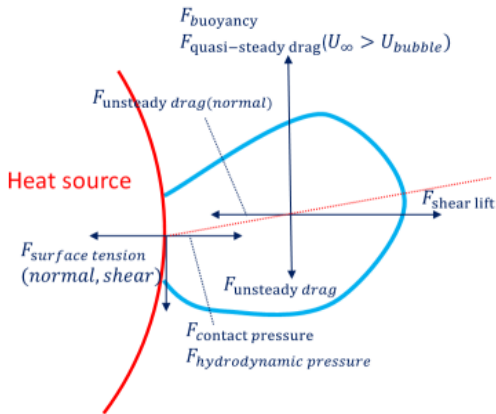


Figure 12. 기포에 작용하는 힘 (90도)

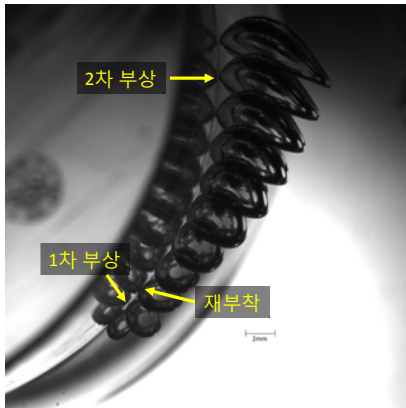


Figure 13. 수평 전열관 표면의 기포 주기

## 5.2 기포 체적 측정 결과

본 연구에서는 3차원 기포 재구성을 통해 시간에 따른 기포 부피의 변화를 측정하였다. 기포 부피 변화는 총 비등열전달량 중 상변화에 의한 열전달량을 계산하기 위해 요구되는 정보로서, 기포 생성 각도, 벽면 열속, 액체 유속에 의해 그 특성이 달라질 수 있다. 본 논문에서는 열속의 변화에 따른 기포 부피 변화 측정 결과를 그림 13과 같이 분석하였다.

기포는 생성 직후 짧은 시간 동안 빠르게 성장하는 관성 성장을 거친 후, 대부분의 성장 시간 동안 기포 밀면과 과열액체층에서 전달되는 열에 의해 증발이 일어나 성장하는 확산성장에 의해 성장한다. 이러한 성장 기구 (mechanism)의 변화로, 기포 생성 직후 기포의 체적 증가 속도는 점차 감소한다(그림 14). 약 0.01초 동안의 성장 이후 기포의 1차 부상이 나타나며 이후 기포의 성장이 멈추는 구간이 나타난다(0.01초~0.02초 구간). 이후 기포는 벽면에 재부착되어 활주하며 지속적으로 성장한 기포는 2차 부상하여 액체 유동 내로 진입한다. 이와 같은 시간에 따른 기포 체적 변화는 그림 13의 현상 관측 결과와 잘 일치한다.

벽면 열속에 따른 기포 성장을 측정 결과, 벽면 열속이 증가함에 따라 활주 기포의 성장율이 작게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 기포의 발생 빈도에 따른 영향으로 판단된다. 열속이 증가할수록 기포의 발생빈도가 증가한다. 발생한 기포는 활주하며 벽면에 형성된 과열액체층을 교란시켜 벽면 과열도 및 액체온도 과열도를 감소시킨다. 열속이 증가할수록 기포의 발생빈도가 증가하므로, 보다 많은 기포가 생성되어 과열액체층을 교란하며, 이로 인해 단일 기포가 성장하는 속도는 열속이 증가할수록 감소한다. 열속이 작은 경우, 기포활주 시 보다 많은 양의 과열액체 상변화가 발생하며, 이로 인해 보다 빠른 기포 성장이 나타난다.

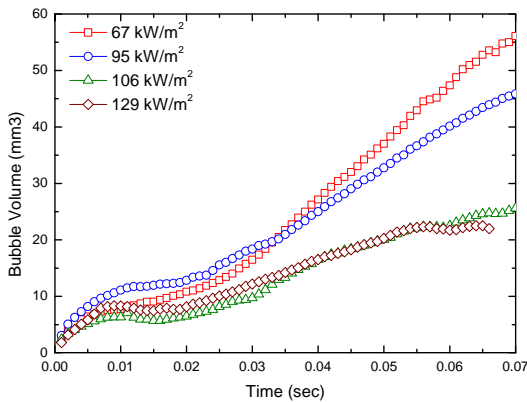


Figure 14. 시간에 따른 평균 기포 체적 변화(생성지점 45도, 유속 22mm/s)

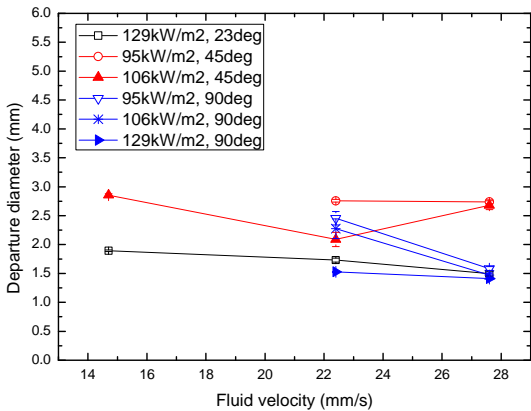


Figure 15. 조건에 따른 평균 기포 이탈 직경

### 5.3 기포 이탈 직경 측정 결과

기포가 생성된 이후, 기포에 작용하는 합력에 의해 기포는 생성된 초기 위치에서 이탈하여 움직이기 시작하며, 이를 기포 이탈(departure)이라 정의한다. 또한 이 때의 기포 직경을 기포 이탈 직경이라고 하며, 이는 기구학적 비등열전달 모델에서 매우 중요한 인자이다. 본 실험을 통해 수평전열관 표면에서의 기포 이탈 직경을 측정하였으며, 이를 그림 15에 도시하였다. 생성지점 각도, 벽면 열속, 내부 유속에 의해 이탈 직경이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 기포 이탈 시 기포의 등가직경은 대략 1.5~3.0 mm 이며, 생성지점의 각도에 따라 이탈 직경이 변화한다. 가열면 하부 기준 23도에서 45도로 증가함에 따라 이탈직경이 증가하는 경향을 보

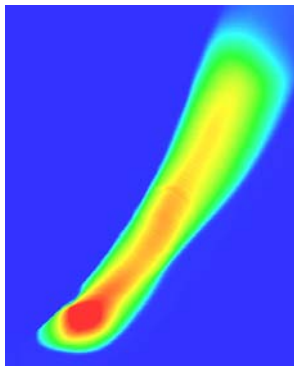
였다. 이때 열속 및 액체 속도의 영향은 크지 않다고 판단된다. 45도 지점에서 기포가 생성될 경우 더 큰 기포가 관측되는 이유는 액체 과열도로 설명할 수 있다. 23도 지점에서 기포가 생성될 경우와 비교하였을 때, 45도 지점에서 기포 생성 시 상류에서 축적된 에너지로 인해 더 높은 액체과열도를 갖게 된다. 이로 인해 45도지점에서 기포가 생성될 경우, 더 빠른 속도로 기포가 성장하며 이로 인해 이탈 직경 또한 증가한다. 그러나 90도 지점에서 기포가 생성될 경우 그 특성이 크게 달라진다. 90지점에서는 그림 11과 같이 액체에 의한 항력이 기포를 이탈하는 방향으로 추가적으로 작용하며, 결과적으로 상대적으로 더 작은 직경에서 기포 부상이 나타난다. 또한 액체에 의한 항력의 영향이 나타나 액체의 속도가 빠를수록 더 작은 직경에서 기포의 이탈이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 수평관 비등 시, 기포 생성 지점에 따라 힘의 합력이 변화하는 특성이 나타나며 이를 고려할 수 있는 기포 거동 모델이 필요함을 확인하였다.

### 5.4 시간평균 기포율 측정결과

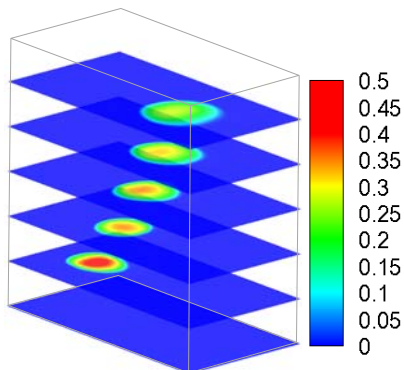
시간 평균된 기포율은 비등열전달에 대한 전산 유체해석(Computational Fluid Dynamics) 시, 해석 결과의 정확도를 평가하기 위한 매우 중요한 인자이다. 본 실험에서 측정된 개별 기포의 위치 정보를 바탕으로 시간평균 기포율을 계산하였으며 그 결과를 그림 16에 도시하였다. 가열면을 따라 상부로 진행되면서 기포가 성장함으로 인해 시간 평균 기포율이 넓게 분포되는 것을 확인할 수 있다. 또한 기포 중심부가 위치하는 곳에서 가장 높은 기포율이 나타나는 것을 관측할 수 있다. 기포 중심부 위치에서의 기포율이 상부로 올라가면서 감소하는 이유는 기포의 속도가 점차 가속되기 때문으로 판단된다. 이와 같은 결과는 향후 2-유체 모델(two-fluid model)을 사용하는 전산유체해석의 검증에 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 활주기포를 고려한 비등열전달 모델 개선 연구의 일환으로 수평관 표면에서 발생하는 비등기포의 거동을 측정하는 연구를 수행하였다. 이를 통해 비등 열전달 모델에 사용되는 기포의 거동 관련 변수들인 기포 이탈, 기포 활주, 기포 부상 등에 대한 실험적 규명을 통해 수평전열관 비등 모델 개선에 필요한 실험 결과를 생산하였다. 기포 거동을 명확하게 관측하기 위한 특수 전열관을 제작하고, 이때 발생한 비등 기포의 거동을 정밀 측정하기 위한 측정 기법을 개발하였다. 수립된 실험 기법을 바탕으로 기초 실험을 수행하고, 기포 거동 모델 개발에 요구되는 변수의 기초 측정 결과를 제시하였다.



(a) 가열면 중심 축방향단면



(b) 높이별 단면

**Figure 16.** 시간 평균 기포율 측정 결과 (106kW/m<sup>2</sup>, 14.7mm/s, 45도)

향후, 다양한 유량, 열속, 유체 온도 조건에서의 실험이 진행될 예정이며, 획득한 실험결과는 수평관 비등 해석 시 요구되는 기포 거동 모델 개발 및 전산유체역학해석 코드의 비등열전달 모델 검증 및 개선 연구에 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 또한 실제 현상에서는 다수의 기포가 복잡하게 생성되므로, 추후 연구에서 이러한 중첩 및 상호작용을 다룰 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국 원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다. (No. 1305011)

## REFERENCE

- 1) Kang, K. H. et al., 2012. "Separate and integral effect tests for validation of cooling and operational performance of the APR+ Passive Auxiliary Feedwater System". Nuclear Engineering and Technology, Vol. 44(6), pp.597-610.
- 2) Cho, H. K. et al., 2014. "Heat structure coupling of CUPID and MARS for the multi-scale simulation of the passive auxiliary feedwater system". Nuclear Engineering and Design, Vol. 273, pp.459-468.
- 3) Kurul, N. and Podowski, M. Z., 1990. "Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling". Heat Transfer Conference, Vol 2, pp.19-24.
- 4) Klausner, J. F., 1993. "Vapor bubble departure in forced convection boiling". Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 36(3), pp.651-662.
- 5) Sateesh, G. et al., 2005. "Analysis of pool boiling heat transfer: effect of bubbles sliding on the heating surface". International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp.1543-1553.
- 6) Okawa, T., 2005, "Bubble rise characteristics after the departure from a nucleation site in vertical upflow boiling of subcooled water". Nuclear Engineering and



Design, Vol. 235, pp.1149-1161.

7) Jung, S. B., 2015, "An experimental study on heat transfer mechanisms in the microlayer using

integrated total reflection, laser interferometry and infrared thermometry technique". Heat Transfer Engineering, Vol. 36(12), pp.1002-1012.