

# 소형가열면에서 CHF 발생시 Bubble 및 Dry Spot의 현상학적 거동: R-113의 수조비등

정홍준\* · 김복득\* · 천세영\* · 노희천\*\*

## Phenomenological behavior of Bubbles and dry spots at CHF on a short heated wall: Pool boiling of R-113

H. J. Chung, B. D. Kim, S. Y. Chun, H. C. No

**Key Words:** CHF(임계열유속), Bubbles(기포), Dry Spots(건조점).

### Abstract

A simultaneous visualization of the behavior of bubbles and dry spots has been carried out for pool boiling of R-113 on a horizontal heater. From video imaging and image processing analysis, the formation of bubbles and dry spots occurs simultaneously, and therefore they should be considered as a synchronized concept rather than independent identities. The dry spot density is equivalent to the active site density in the region before CHF. At CHF point, large dry areas due to the coalescence of neighboring dry areas cover the heater surface.

### 1. 서론

수조비등 및 강제대류비등시 임계열유속(CHF, Critical Heat Flux)에 대한 수많은 이론적 및 실험적 연구에도 불구하고 임계열유속 발생 Mechanism에 대한 의견은 매우 분분한 실정이다. 기존의 임계열유속에 대한 시각은 임계열유속을 핵비등 현상과 독립적으로 취급하여 왔다 [1], [2]. 그러나 핵비등에 영향을 미치는 모든 인자들은 천이비등 영역까지 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다 [3], [4]. 핵비등은 가열면상에 위치한 임의의 특정 기포생성지점에서 발생하는 기포의 존재에 의해 특정지어진다. 비등현상에 대한 고전적 가시화연구로서 Gaertner[5]는 임계열유속 Mechanism을 다음과 같이 설명한다. 고열유속에서 이윳하는 Vapor Column의 결합에 의해 생성된 매우 큰 Vapor Mushroom이 그하부에 존재하는 얇은 액막에 의해

전열판과 분리되어 있으며, 이 Vapor Mushroom이 떨어져 나가기 전에 액막의 일부가 건조되었을 때 2차 천이가 발생하고, 전열판에 고착되어있는 매우 적은 지름의 Vapor stem이 서로 결합하여 액막이 완전히 건조되었을 때 임계열유속이 발생한다. 이러한 Gaertner의 실험결과를 기본으로 Haramura and Katto[2]는 'Macrolayer dryput model'을 개발하였고, Dhir and Liaw[8]는 'Unified model'을 개발하였다. 최근의 Nisho 등[7]에 의하면 임계열유속시 액체의 전열판에 대한 접촉형태는 Network 형태인 것으로 관찰되었다. 이러한 관찰 내용은 Gaertner의 관찰 내용과 매우 상이하다.

지금까지 살펴본 바와 같이 임계열유속현상에 대한 완전한 기구학적 설명이 부족한 이유는 다음과 같은 2가지의 요인으로 요약된다. 첫째, 가열면 근처에서 비등현상을 직접적으로 관찰하기 매우 곤란하고 두 번째는 지금까지의 대부분의 연구자들은 주요 관점의 변수 즉 Bubble 또는 Dry Area 1가지의 경우에만 초점을 둔 결과이다. 따라서 본 연구에서는 기포거동과 액체접촉현상을 동시에 가시화하여 보다 근본적인 임계열유속 기구에 대한

\* 한국원자력연구소

\*\* 한국과학기술원

규명자료를 제공하는 것이다.

## 2. 실험장치

실험장치는 수조비등 및 강제대류비등 모두 실시할 수 있도록 제작/설치되었으며 그림 1에 도식적으로 보여준다. 실험장치는 실험부, 응축기, 저장탱크, 구동모터 및 예열기 등으로 구성된다. 그림 2에 보여준 실험부는 두께 10 mm의 운모판을 이용하여 가로/세로 80 mm, 길이 500 mm의 내부 단면을 이룬다. 실험부 하부판 중앙에는 전열판으로써 두께 10 mm, 가로/세로 50 mm의 Single Crystal Sapphire가 삽입된다. Sapphire하부에는 투명하고 전도성인 ITO (Indium Tin Oxide) Film이 700Å 두께로 Coating되어있다. 비등은 이 ITO Film에 DC 전류를 공급함으로써 발생한다.

그림 2에 나타난 바와 같이 핵비등 현상에 대한 가시화는 전반사 기법을 이용하여 투명한 가열판 하부에서 이루어진다. 굴절률이 큰 매질에서 적은 매질로 입사광이 통과할 때, 입사각을 적절히 조절할 경우 입사광은 매질표면에서 모두 반사하게 된다. 이 원리를 비등현상에 적용할 경우 가열면에 액체가 접촉할 경우 입사광은 그대로 통과하게 되고 가열면이 건조되었을 때 입사광은 전반사현상으로 나타나게 되어, 비등시 액체의 가열면에 대한 접촉현상에 대한 관찰이 가능하다. 이와 동시에 가열면을 하부에서 직접 관찰하게 되면 기포의 거동을 파악할 수 있으므로 액체-고체 접촉현상과 기포의 거동에 대한 동시 가시화가 가능하다.

수조비등시 실험액체의 포화온도 조건을 유지하기 위하여 각각 450 W의 용량의 보조가열기 4개가 이용된다. 실험은 정상상태 조건(1기압, 포화온도 조건)에서 수행되며, DC 전류를 단계적으로 상승시켜 비등개시점으로부터 임계열유속까지의 비등현상을 관찰한다.

## 3. 실험결과

### 3.1 비등개시

그림 3은 열유속  $27.0 \text{ kW/m}^2$  에서의 기포와 Dry Spot의 거동을 연속적으로 보여준다. 그림 3의 상부의 사진은 기포를 나타내며 하부는 Dry Spot을 나타낸다. 그림 3(a), (b)에서 관찰해보면 기포가 생성되어 발달하는 과정을 보여주며, 그림 3(c), (d)는 크기가 감소하면서 이탈직전의 상황을

나타내고, 그림 3(e)는 기포가 완전히 이탈하여 사라진 현상이다. 각각의 기포에 해당하는 Dry Spot의 거동을 살펴본 기포의 생성-성장-소멸과정을 명확히 파악할 수 있다. 이그림으로부터 기포와 Dry Spot의 생성-소멸과정은 동시에 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 가시화 내용은 단일기포의 생성소멸과정에 대한 Ramanujapu and Dhir[10]의 가시화 결과와 매우 유사하다.

### 3.2 핵비등 영역

열유속이 증가함에 따라 기포 및 Dry Spot의 수 및 크기가 증가한다. 그림 4는 임계열유속의 약 50%( $70.2 \text{ kW/m}^2$ )일 때의 비등현상을 보여준다. 기포간 또는 Dry Spot 간의 상호작용이 매우 활발하게 발생하나 독립기포 및 Dry Spot이 동시에 존재함을 알 수 있다. 각 그림의 왼쪽 하부에서 기포간 결합에 의해 생성된 Dry Spot을 볼 수 있다. 기포간 결합에 의해 생성된 Dry Spot은 독립기포에 비해 그 크기가 약 3배이고, 다시 해체되면서 적고 여러 가지의 형태의 Dry Spot으로 분리된다. 이 과정에서 액체는 Dry Spot 사이에 선형태로 존재하게 됨을 알 수 있다.

### 3.3 임계열유속

그림 5는 임계열유속에서의 비등현상을 보여준다. 대부분의 가열판 표면은 이미 건조되어 있으며, 액체의 가열판에 대한 접촉형태는 연속적인 면의 형태가 아니라 국부적 선 형태임을 알 수 있고 이러한 액체접촉형태는 Oka 등[9] 및 Nishio 등[7]의 결과와 매우 잘 일치한다. 또한 대부분의 기포들은 결합되어 막형태로 존재하고, 그 하부에는 국부적 선 형태의 액체가 갇히게된다. 그러나 비교적 액체가 많이 접촉해 있는 부분에서는 여전히 비등이 발생하나 대부분의 열전달 형태는 액체와 Dry Spot의 경계선상에서 발생하는 Vaporization임을 알 수 있다. 이러한 열유속 상황에서 약간의 열유속 증가는 국부적 선형태의 액체의 증발을 더욱 촉진시키고 궁극적으로 가열판 표면은 완전히 건조하게 되어 임계열유속을 지나 막비등으로 천이하게 된다. 이러한 임계열유속 현상은 기존의 Gaetner[5] 또는 Haramura and Katto[2]가 설명하는 기포간의 결합에 의해 생성된 매우 큰 기포 하부에 존재하는 Macrolayer 건조모델과는 일치하지 않는다. 즉 기존의 모델에서는 매우 큰 기포가





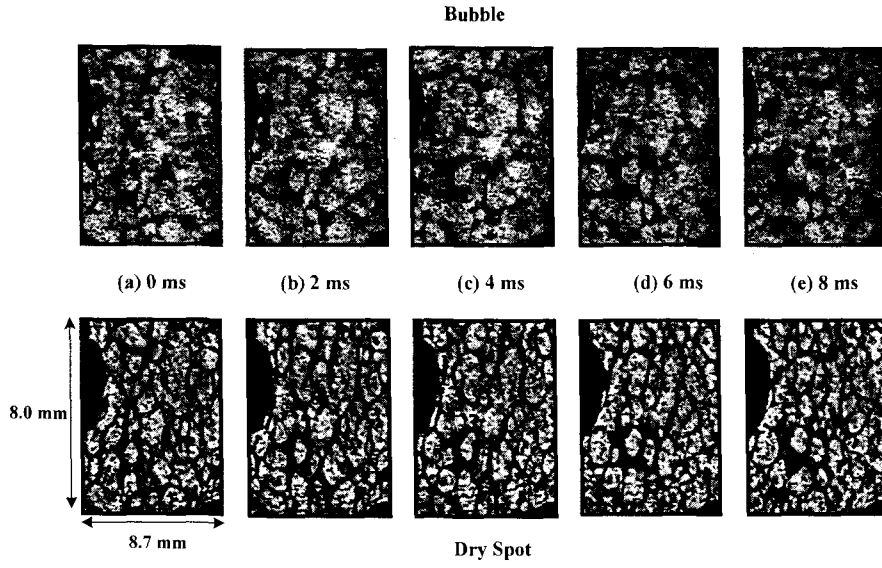


그림 5 Chronological dynamic behavior of bubbles and dry spots at CHF ( $\Delta T_{ws}=43.0$  K,  $q=150.7$  kW/m<sup>2</sup>)

생성되고 그 하부에는 Macrolayer가 존재하게되며, 큰 기포가 이탈하기 전에 Macrolayer가 건조하게 되면 임계열유속이 발생한다고 설명한다. 그러나 본연구에서의 가시화 결과에 의하면 기포가 생성 되면 Dry Spot은 동시에 생성됨을 알 수 있었고, 또한 큰기포의 생성시 그형태는 거의 막형태이나 그 하부에는 선 형태의 액체가 갇히는 현상을 관찰할 수 있었다. 이러한 국부적 선 형태의 갇힌 액체는 열유속 증가에 따라 쉽게 증발되어 결국 임계열유속에 도달한다. 또한 이러한 임계열유속 주요 지배인자는 국부적 열적현상이며 수력적현상의 변화가 아님을 알 수 있다.

#### 4. 결론

기포 및 Dry Spot에 대한 동시가시화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 기포의 생성과 Dry Spot의 발현은 동시에 이루어지며, 이러한 Dry Area 형성과정은 기존의 연구 결과와 매우 상이하다.
- 2) 임계열유속의 약 50% 이하의 영역에서는 Active Site Density와 Dry Spot Density는 거의 일치하나, 그 이상의 영역에서는 기포간 상호작용으로 인해 일치하지 않는다. 따라서 임계열유속의 약 50% 이상의 영역에 대해서는 Active Site Density를 대체할 수 있는 새로운 개념의 관계식이 필요하다.
- 3) 임계열유속은 기포의 수력학적 작용이 아니라 Dry Spot의 열적인 현상에 의해 발생한다.

#### 참고문헌

[1] Zuber N., 1958, Stability of Boiling Heat Transfer, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 80, pp 711-720.

[2] Haramura Y., and Katto Y., 1983, A new hydrodynamic model of critical heat flux, applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp 389-399.

[3] Berenson P. J., 1962, Experiments of pool-boiling heat transfer. *International*

*Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 5, pp 985-999.

[4] Sadasivan P. et al., 1995, Perspective: Issues in CHF modeling-The need for new experiments. *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 558-567.

[5] Gaertner R. F., 1965, Photographic study of nucleate boiling on a horizontal surface. *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 87, pp. 17-29.

[6] Kirby D. B., and Westwater J. W., 1965, Bubble and vapor behavior on a heated horizontal plate during pool boiling near burnout. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, Vol. 61, No. 57, pp 238-248.

[7] Nishio S. et al., 1988, Observation of boiling structures in high heat- flux boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp 3191-3201.

[8] Liaw S. P., and Dhir V. K., 1989, Void fraction measurements during saturated pool boiling of water on partially wetted vertical surfaces. *ASME Journal of heat Transfer*, Vol. 111, pp 731-738.

[9] Oka T. et al., 1995, A pool boiling of n-pentane, CFC-113, and water under reduced gravity: Parabolic flight experiments with a transparent heater. *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp 406-417.

[10] Ramanujapu N., and Dhir V. K., 1999, Dynamics of contact angle during growth and detachment of a vapor bubble at a single nucleation site. *Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, San Diego, U.S.A., ASTE99/6277, pp 1-7.