

밀폐형 2상 열사이폰내의 비등현상에 관한 가시화 연구

김철주 · 강한국* · 오광현*

성균관대 기계공학과, *성균관대학교 대학원

A Visual Study on Nucleate Boiling Phenomena in a Closed Two-Phase Thermosyphon

Chul Ju Kim, Hwan Kook Kang* and Kwang Heon Oh*

Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*Graduate School of Sungkyunkwan University

요 약

본 연구에서는 밀폐형 2상 열사이폰의 액체 Pool에서 발생하는 핵비등현상과 유동영역에 대해 가시화 방법으로 연구하였다. 실험용 열사이폰은 스텐레스와 유리관을 이용하여 제작하였으며, 열공급은 증발부 주위에 설치된 유도 가열용 코일에 고주파를 가함으로써 스텐레스 외면에 발열이 일어나도록 하였다. 이에 따른 결과는 다음과 같다. 실험용 열사이폰은 고주파 가열등 열사이폰의 작동성능을 저해하는 여러 요인들이 포함되어 있었으나, 실험결과 이러한 문제는 실험 내용에 영향을 미칠만큼 크게 나타나지 않았다. 열속과 상당압력의 범위는 각각 $2 < q'' < 25 \text{ kW/m}^2$, $0.1 < P_v < 1.1 \text{ bar}$ 이었으며, 이러한 구간에서 증발부 Pool내부에서의 비등 Regime은 다음과 같은 형태로 나타났다.

- Pulse boiling Regime: 증기 기포핵이 발생될 때까지 긴 Waiting period가 존재하며, 핵비등이 발생할 때에는 증기 기포의 폭발적인 성장으로 Blow-up현상이 나타난다.
- 천이 비등 Regime: 원형의 증기 기포가 Pool의 중단부에서 2~3개 점으로 분산되어 발생하며, Pool의 상단에서는 기포들이 크게 성장하여 Bubbly 또는 Churn flow형태를 이룬다.
- 연속 핵비등 Regime: 증기 기포핵의 발생점이 가열벽면 전 구간에서 균일하게 분포되며, 전 구간이 Bubbly flow형태를 이룬다. 열속이 증가할수록 기포의 크기는 작아진다.

Abstract—This is an experimental study conducted to visualize the nucleate boiling phenomena and flow regimes occurring inside the liquid pool in a closed two-phase thermosyphon. To meet this purpose, an annular-type thermosyphon was designed and manufactured using a glass tube and a stainless steel tube, being assembled axisymmetrically.

The heat to be supplied to the working fluid is generated within a very thin layer of stainless steel tube wall by applying a high frequency electromagnetic field through the induction coil, axisymmetrically set around the evaporator zone.

Some important results were as follows;

1) Considering the structural complexity of the tested thermosyphon, it showed good performance for the range of heat flux, $2 < q'' < 25 \text{ kW/m}^2$ and saturation vapor pressure, $0.1 < P_v < 1.1 \text{ bar}$.

2) Different type of nucleating boiling regimes were observed as described below.

- Pulse boiling regime: Flow pattern changed cyclically with time during 1 cycle of pulse boiling process. The onset of Nucleation was followed by expulsive growing of vapor bubble, resulting in the so called blow-up phenomenon, massive expulsion of large amount of liquid around the bubble.
- Transient boiling regime: Some spherical vapor bubbles were observed growing out from 2~3 nucleating sites, that was dispersed at the lower part of the heated tube wall in the liquid pool. But the rest upper region above the nucleating sites were filled with churns or bubbles of vapor.
- Continuous nucleate boiling regime: The whole zone of evaporator was filled with lots of spherical vapor bubbles, and the bubbles showed tendency to decrease in diameter as the heat flux increased.

1. 서 론

밀폐형 2상 열사이폰은 양단 사이에 주어진 온도차에 의하여 작동유체가 기-액의 상변화를 일으키며 열을 전달하는 장치이다. 작동원리는 열파이프와 유사하나 증발부와 응축부 사이의 증기압차와 중력장에 의하여 작동유체의 유동이 이루어지기 때문에 관벽에 Wick를 설치할 필요가 없다. 따라서, 열사이폰은 열파이프에 비하여 내부 구조가 단순하고, 낮은 열저항, 높은 열전달한계 등 상대적으로 우수한 열전달 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 오늘날 열사이폰은 Inverter, 변압등의 전기 발열체 냉각, 태양열 집열기에서 집열판으로부터 축열부로 열을 이송하는 장치, 보일러 배기가스로부터 폐열회수등의 에너지절약을 위한 열교환 장치등, 이용범위가 매우 넓다¹⁾.

일반적으로 열사이폰은 넓은 작동범위에서 안정된 작동을 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나 어떠한 제한된 작동영역에서는 내부 작동유체의 비등과 2상유동에 관련된 불안성에 기인하여 여러 형태의 불안정한 작동현상이 나타난다²⁾. 한 예로써 열사이폰이 내부 증기압이 0.2~0.3 bar 이하의 진공압, 그리고 10^4 W/m^2 이하의 낮은 열속에서 작동하면 증발부 액체 Pool에서 핵비등이 불연속적으로 진행되고, 이 결과 열사이폰의 벽의 온도는 시간에 따라 증가와 감소를 반복하는 진동현상을 나타낸다. 이때 진동 주기는 수초~수백초에 이르는 경우도 있다. 이러한 진동 현상이 나타나면 열사이폰을 통한 열이송이 단속적으로 진행되고, 따라서 주기가 수십초 이상 긴 경우에는 전기적 발열체등 열소스의 과열과 함께, 이것이 초래할 수 있는 여러가지 문제들이 심각하게 발생될 수 있다. 이러한 점에서 열사이폰의 이와 같은 불안정 작동특성에 대해 근래에 와서 많은 연구자들이 관심을 집중하고 있다. 이러한 벽온도의 진동현상은 초기의 열사이폰 연구자들에 의해서도 이미 목격되었다³⁾. 그러나 이러한 온도진동 현상에 대하여 내부작동유체의 핵비등 과정과의 상관관계가 연구되기 시작한 것은 80년대초 Casarosa⁴⁾, Negishi 등⁵⁾에 의한 것으로 보인다. 이들 연구자들에 의해 벽온도의 진동은 정성적으로 비교적 주기성을 나타내는 것으로 확인되었으며 이러한 문제는 여러 형태의 Limitation이 열사이폰의 작동을 중단시키는 경우와 차이가 있다. Casarosa⁴⁾, Liu⁶⁾, Kim⁶⁾ 등이 유리관 열사이폰을 이용하여 열사이폰 내부의 핵비등 현상에 관한 가시화 연구를 수행한 결과 이러한 진동현상은 증발부 액체 Pool에서 핵비등이 단속적으로, 그리고 주기적으로 진행되기 때문이며 이러한 관점에서 이때의 비등 과정을 Pulse boiling이라 부르고 있다. Pulse boiling 과정에서 나타나는 2상 유동 현상은 본 연

구의 결과 고찰에서 다시 언급하고자 한다.

가시화 연구외에 비등주기와 작동조건의 상호 관련성에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되었고 열속이 증가할수록, 그리고 작동온도가 증가할수록 주기가 감소하는 특성을 보여주고 있다. 이러한 연구결과를 이용하여 Liu 등⁶⁾은 Pulse boiling에서의 비등 주기를 열속과 증기압사이의 단순한 함수관계로 단순화하고, 여기에 반 해석적 연구결과를 추가하여 비등주기를 예측할 수 있는 상관식을 시도하였다. 그러나 아직까지 이 식으로써 주기를 예측하는 데에는 충분하지 않은 것으로 보이며, 증기압과 기포 Cavity사이의 상관관계등 열사이폰 내부 핵비등에 관련된 보다 기초적인 내용들이 보완되어야 할 것으로 보인다. Fig. 1은 김철주 등⁷⁾이 수직 유리관 열사이폰을 제작하여 수행한 실험으로부터 Pulse boiling과정에서 나타나는 벽면의 진동현상을 보여주고 있다. Pulse boiling과정에서는 언제나 긴 Waiting period에 이어 가열 벽면에서 증기핵이 형성되고, 이어서 짧은 Evaporating period가 이어진다. 위의 연구자들은 열속 $0.5 < q < 20 \text{ kW/m}^2$ 의 넓은 범위에서 열사이폰이 작동할 때, 벽면온도의 진동상태를 고찰한 결과 작동조건에 따라 열사이폰 증발부 내부 비등 Regime을 다음과 같이 3가지 경우로 구분하고 있다. 즉, 안정된 작동영역에서는 연속적 핵비등이, 그리고 증기압을 일정하게 유지하면서 열속을 저하시키면 초기 연속적인 핵비등에서 Pulse boiling으로 변화한다. 더욱 열속을 저하시키면 비등 현상이 나타나지 않고 액체 Pool에서는 오직 자연대류만이 존재한다. 이러한 구분으로부터 열속과 압력의 좌표공간에 각각의 유동 형태가 나타나는 영역을 Map형태로 도시하고, 각 유동영역의 구획경계를 나타내는 곡선을 실험상관식으로 제시하였다. 이상과 같이 그동안 수행한 열사이폰 내부 비등에 관련된 선행 연구들은 증발부내의 액체 Pool에서의 비등 및 2상 유동 Regime이 증기압과 열속의 함수로 변화함을 보여주고 있다. 그러나 앞에서 언급한 Kim 등의 가시화 연구에서는 실험용으로 제작한 열사이폰이 구조적 특성으로 인하여 열속의 범위가 Pulse boiling이 발생하는 영역인 $1 \sim 5 \text{ kW/m}^2$ 의 범위로 제한되었다. 이 때문에 앞에서 언급한 것과 같이 열속 증가에 따라 Pulse boiling에서 핵비등으로 천이하는 과정에서 증기핵의 발생점 분포, 기포의 성장 및 이탈과 운동 과정에 대한 자료를 제공하지 못하였다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 이전의 가시화 연구에서 사용한 실험장치를 개선하여 열속범위를 Pulse boiling에서 연속적 핵비등 영역까지 확장시킴으로써 열사이폰내부 Pool에서 증기핵의 거동과 2상 유동에 관한 포괄적인 특성을 이해하고자 하였다. 이 연구결과는 열사이폰 내부의 핵비등과정과 2상 유동에 대한 이해를

증대시킴으로써 열사이폰의 설계, 작동 범위, 열전달 성능 해석등에 기여할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 열사이폰의 구조는 Fig. 2와 같이 이중관의 형태를 가지고 있다. 이중관은 내부의 스텐레스관과 외부의 유리관으로 구성되어 있다. 작동유체는 두 관사이의 환상공간내에 존재하며 스텐레스관과 작동유체 사이에 열교환이 발생한다. 내부 스텐레스관의 한쪽 끝은 용접하여 밀폐되도록 하였으며 다른 한쪽끝을 통하여 냉각수를 응축부에 순환시켜서 이송된 열을 제거하도록 되어있다. 한편 두 관사이의 공간은 Viton O-ring 체결을 통하여 밀봉되도록 하였으며, 내부진공 및 작동유체 주입을 위해 상단에 진공밸브(Nupro, SS 4BK)를 용접하였다. 또한 열사이폰의 외벽에는 또하나의 유리관을 설치하고 내부를 진공시킴으로써 이중관 열사이폰의 단열을 이루고 열사이폰 외부 유리관에서의 응축을 방지하도록 하였다. 이에 대한 제원은 Table 1과 같다.

한편 열사이폰의 가시화에 있어 균일한 열속을 공급하며 가시화를 이루는 가열방법은 매우 중요한 요소로 본 연구에서는 전자기 유도에 의한 고주파 유도가열 방법을 이용하였다. 즉 유도가열용 코일에 고주파 전류를 흐르게 하면, 코일 중심부에 강한 자장이 형성되고, 자장속에 전도성 물체를 설치하면 반복된 자장변화에 의

해 이 물체에 전류가 유도되어 발열이 일어나게 되는 원리를 이용한 것이다. 즉, 열사이폰의 증발부 주위에 유도가열용 코일을 설치하고, 이 코일관에 고주파를 가함으로써 열사이폰의 중심부에 설치된 스텐레스관에 열이 발생한다. 이때 발열량은 주파수 변화를 통하여 제어할 수 있으며 본 실험에서는 열속의 범위가 2~25 kW/m²였다. 한편 고주파 발생열은 열사이폰 외면에 설치된 유도가열용 코일의 피치와 발열체와 코일간의 거리등 여러 인자들에 따라 자속밀도의 불균일로 인하여 가열면에 공급되는 열속이 불균일하게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 영향은 코일 피치의 간격을 줄임으로써 억제할 수 있으나 코일 사이를 통하여 열사이폰 내부유동을 관찰해야 하기 때문에 적절하게 코일 피치를 유지해야 한다. 이러한 영향을 고려하여 피치를 약 25 mm로 하고 발열체인 스텐레스 내벽에 열전대를 일정 간격으로 부착하고 예비실험을 수행한 결과, 스텐레스 벽면의 온도는 비교적 균일한 분포를 나타내었다. 이로부터 본 실험장치를 통하여 비교적 균일한 열속이 증발부벽에 공급되는 것으로 파악하였다. 또한 가열벽면 뿐 아니라 벽에 부착된 열전대에 고주파에 의한 발열 또는 유도기전력 발생에 관련된 문제점이 우려되었으나 예비 실험결과, 측정치의 영향은 무시할 정도로 작은 것으로 확인되었으며, 이러한 결과는 표피효과에 의한 고주파열의 침투깊이를 계산한 결과와도 일치하였다.

실험과정은 열사이폰이 작동하는 동안 Pool내에서 일어나는 비등형태와 열속의 상관관계를 관찰하고, 비등 및 2상 유동형태는 스틸카메라를 이용하여 프레임 속도 1/3(sec/f)로 연속 촬영하였다.

일반적으로 Pool 비등에 있어 증기압력은 핵 형성조건에 많은 영향을 미치며 열사이폰내에 여러 형태의 비등 현상을 관찰하기 위해서는 0.1~1.2 bar까지 내부 증기압력의 제어가 필요하다. 낮은 진공 증기압을 얻기 위해서는 냉각수 온도를 -20~30°C까지 변화시킬 수 있어

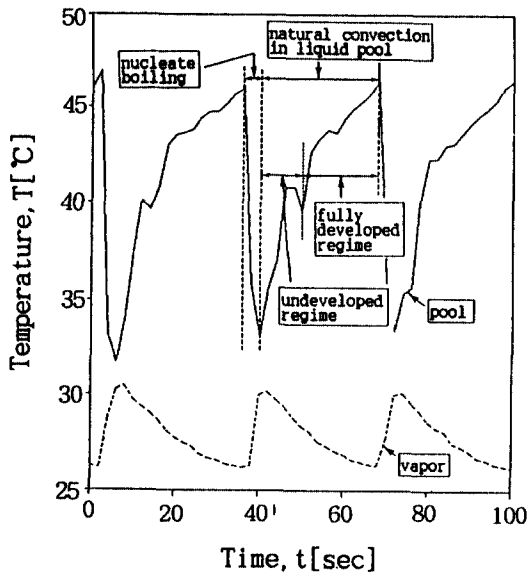


Fig. 1. Temperature variation of the liquid pool and vapor, measured at evaporator zone and at condenser zone respectively during pulse boiling process.

Table 1. Specification of the annular thermosyphon manufactured visualizing experiment.

Component	Material	Dimension (mm)
Container	Stainless steel (inner pipe)	Outer diameter: 19.05 Inner diameter: 16.05
		Length of Evaporator: 300 Length of Adiabatic: 100 Length of Condenser: 200
	Glass (outer pipe)	Outer diameter: 34 Inner diameter: 32
Working fluid	Ethanol	Purity: 99.99% Charge ratio: 40%

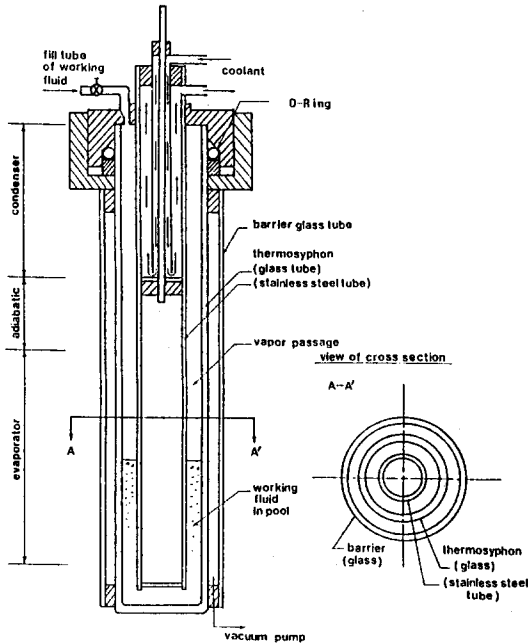


Fig. 2. General view of thermosyphon specifically designed to visualize nucleate boiling phenomena.

야 한다. 그러나, 이를 위해서는 본 연구에서와 같이 열속이 매우 큰 경우 수 kW의 냉동부하를 갖는 대용량의 저온 항온 장치가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 장비의 확보가 어려워서 오직 상수도를 통하여 공급되는 물을 냉각수로 이용하였으며 증발부 열부하를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 본 실험장치에서 사용한 열사이폰은 Fig. 2와 같이 내외관 사이를 밀폐시키기 위하여 O-ring을 사용하였다. 이 결과 장시간의 실험기간동안에 저압의 진공압을 유지하기가 어려웠으며, 미량이 나마 공기 유입이 나타났다. 이 때에는 내부 압력을 1기압 근처까지 가열한 후 진공펌프로 열사이폰 상부에 모여있는 유입공기와 함께 증기를 제거하였다. 이러한 방법을 통한 본 연구의 최저 증기 압력은 응축부 증기압 기준으로 약 0.1 bar이었다. 한편 증발부에서 작동유체에 전달된 열속의 크기는 응축부로 이송된 열을 기준으로 하여 간접 측정하였으며, 응축부 입출구의 냉각수 유량과 온도차를 측정하여 열량계 원리를 이용하여 계산하였다. 열사이폰의 각 측정부 온도는 부착된 열전대로부터 자료획득장치(Hybrid recorder Model 3088, Hydra Model 2620a)를 통하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 열사이폰 증발부의 열전달 특성

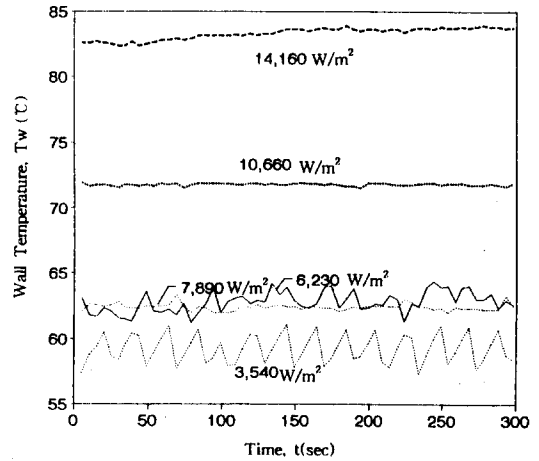


Fig. 3. Evaporator wall temperature versus time for some different values of heat flux.

열사이폰의 증발부 Pool의 비등형태는 서론에서 언급한 것과 같이 열부하 조건에 따라 연속비등, Pulse boiling이 있으며, 극한적으로 낮은 열속에서는 전혀 핵비등이 발생하지 않는다. 이러한 비등 현상과 2상 유동형태는 다음 절에서 고찰하였으며, 여기서는 먼저 이러한 비등 Regime상의 차이에 따른 벽면의 온도변화를 고찰하였다. Fig. 3은 시간에 따른 증발부 벽면온도의 변화 경향을 여러 열속에서 실험한 결과를 이용하여 서로 비교한 것이다. 열속이 약 8 kW/m^2 이하의 열속범위에서는 온도의 진동이 나타나며, 열사이폰내부에서 Pulse boiling이 일어나고 있음을 나타내고 있다. 그림에서 $q''=3.5 \text{ kW/m}^2$ 에서의 온도진동은 주기가 약 25초이며 파형과 주기가 비교적 일정하다. 그러나 $q''=7.9 \text{ kW/m}^2$ 에서는 주기가 불균일하며, 주기는 약 10초로써 Pulse boiling으로서는 작은 영역에 해당한다. 열속의 증가에 따라 주기가 작아지는 것은 증기핵의 형성이 활발해지고 연속핵비등으로 천이하고 있음을 의미한다. 그런데 앞의 그림에서 $q''=3.5 \text{ kW/m}^2$ 일때 Waiting period와 Evaporating period가 서로 비슷한 크기를 나타내고 있으며, 이러한 현상은 그동안 Kim 등⁶⁾, 김철주 등⁷⁾의 연구 결과와 비교하여 유사한 열적조건에서 Waiting period가 상대적으로 매우 크게 나타나는 결과와 다소 정성적으로 차이를 나타내고 있다. 한편 열속이 증가하여 Pool의 가열면에서 연속적인 핵비등을 이루면 그림에서 $q''=10 \text{ kW/m}^2$ 또는 그 이상의 경우와 같이 벽면의 온도가 시간에 대해 균일하게 유지됨을 보여주고 있다.

Fig. 4는 몇가지 서로 다른 열속에 관하여 열사이폰 관벽의 길이방향의 온도분포를 나타낸 것이다. 단, 벽온이 진동을 일으킬 때에는 시간 평균을 취하였다. 그림으

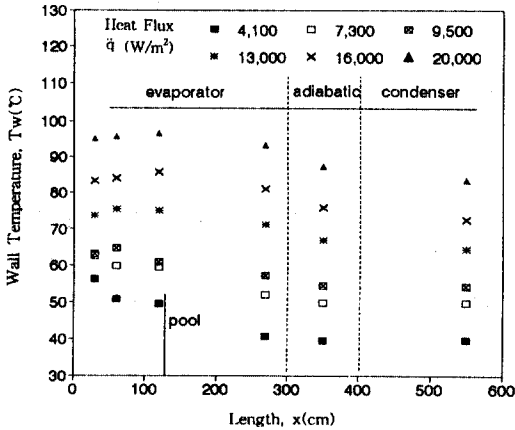


Fig. 4. Local wall temperature distribution for the different flux, showing high wall superheat at the lower part of the evaporator during pulse boiling process inside.

로부터 열속이 4.1 kW/m², 7.3 kW/m²인 경우 증발부 하단 15 cm구간이 그 위의 증발부 구간에 비하여 5~15°C정도 과열되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 작동영역은 주기적인 비등을 일으키는 구간으로써 주로 Pool의 하단이 과열상태임을 알 수 있다. 한편 열속이 증가하여 비등이 활발해지면 증발부 전체가 거의 균일한 온도를 나타내게 된다. 이는 다음 절의 사진에서 보는 것과 같이 핵비등이 발달하여 연속 핵비등 Regime에 도달되면 Pool에서 발생한 증기 기포수가 많아져서 증발부 전체가 균일하게 Bubbly flow regime을 이루기 때문에 전체 가열면에서 열저항이 균일하게 되기 때문이다.

Fig. 5는 증발부의 열속크기와 증발부 과열온도사이의 상관관계를 나타낸 그림이다. 여기서 증발부의 과열온도는 액체가 Pool을 이루고 있는 영역, 즉 증발부 하단으로부터 70 mm위치에서 측정된 온도값을 시간에 대하여 평균값으로 취한 온도와 단열부로부터 취한 증기온도와의 차를 과열도로 나타낸 것이다. 또한 이러한 결과를 가시화의 결과를 토대로 비등 영역을 열속에 대하여 구분하여 표시하였다. Pulse boiling 영역은 Pulse boiling 주기가 5초 이상이 되는 영역으로 가열벽의 온도가 20~30°C이상의 높은 과열을 이루고 있으나 열속의 증가에 따라 과열도가 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 천이 영역에서는 증기핵이 Pool내의 가열면위에 1~2개의 매우 제한된 점에서 발생하고, 이들 주기가 1~2초로 비교적 빠르게 진행되는 구간으로써 그림에서 증발부벽의 과열도가 빠르게 감소함을 보여주고 있다.

Fig. 6은 이러한 각 영역에서의 열전달계수를 Fig. 5의 벽의 과열도를 기준으로 하여 계산하고 이 결과를 Rohsenow⁹⁾의 핵비등 열전달에 관한 상관식 및 열사이

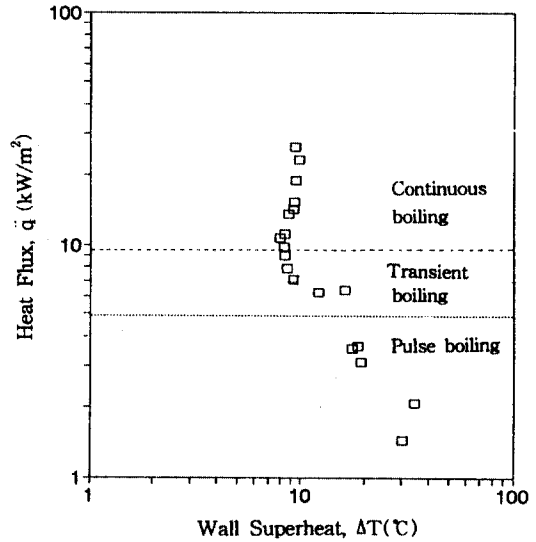


Fig. 5. Wall superheat versus heat flux at the evaporator.

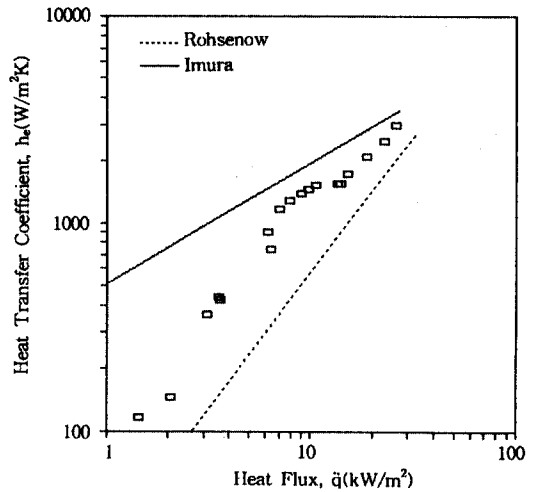


Fig. 6. Correlation of present data units and two semiempirical correlations on nucleate boiling heat transfer coefficient.

폰내의 열전달에 관한 Imura 등⁹⁾의 상관식과 비교한 것이다. 이때 실험용 열사이폰 내부의 증기압은 열속에 따라 변화하므로 각 증기압과 열속에 해당하는 열전달계수를 각각 계산하여 나타내었다. 그림으로부터 열사이폰의 열전달 계수가 전체적으로 Rohsenow의 상관식보다 크며, Imura상관식보다는 작은 값을 나타내고 있다. 이러한 차이는 Rohsenow의 상관식이 수평평판에서 기포의 이탈에 따른 난류유동 열전달 형태로부터 얻어진 식으로, 수직원통 외벽에서의 비등열전달을 이루는 본

연구의 경우 경사각의 증가에 따라서 열전달율이 증가한다는 Nishikawa 등¹⁰⁾의 연구결과와 기포의 혼합유동에 의한 열전달 촉진에 그 원인이 있는 것으로 보인다. 한편 Imura의 상관식은 저열속일수록 과대 예측하는 결과를 보이는 것으로 알려져 있으나, 본 실험결과와 비교하여 연속 핵비등 영역에서는 5%미만의 편차 범위 안에서 잘 일치하고 있다. 그러나 Pulse boiling 영역에서는 Savchenkov 등¹¹⁾이 지적한 것과 같이 Rohsenow 상관식에 매우 접근되어 있음을 보여주고 있으며 그 물리적 이유에 대해서는 아직까지 충분히 설명되지 않고 있다. 그러나 이러한 관계식은 무차원 상관식을 통하여 Pulse boiling 과정의 열전달율을 예측하는 데 기여할 수 있는 것이 사실이다.

3-2. 증발부 Pool내의 핵비등과 2상 유동 Regime

앞절의 Fig. 5에서 언급한 것과 같이 열사이폰 증발부의 핵비등 Regime은 Pulse boiling, 연속적인 핵비등으로 구분할 수 있으며 이들 사이에 천이구간이 존재하고 있다. 이들 각 영역에 대하여 증발부 내부의 2상 유동 Regime을 고찰하면 다음과 같다.

3-2-1. Pulse boiling regime

Photo. 1은 열속이 6.2 kW/m², 내부 증기압이 0.22 bar인 경우로써 주기적 핵비등 영역에서의 유동상태를 나타내며 주기는 약 10초였다. t=0초의 사진은 Waiting period 기간중의 상태를 나타내고 있으며 Pool의 높이가 14 cm로써 Pool의 자유표면의 위치를 인식할 수 있고 Pool에 기포가 존재하지 않는다. t=1/3초의 사진에서는 증발부 하단으로부터 약 7~8 cm 위치에 기포핵이 생성되고 이 기포핵이 급격히 폭발하듯이 성장하여 그 상부의 액체를 단열 및 응축부로 축출한 결과로써 7~8 cm 위치의 기-액 계면 상부는 증기만 남아 있는 것을 보여주고 있다. 이와 같이 초기 증기핵의 폭발에 따라 다량의 액체를 축출시키는 것을 Blow-up 현상이라고 부른다. t=2/3초의 사진은 용기 상부로 축출되던 액체의 일부가 다시 하강하여 자유표면의 높이가 다시 13~15 cm 위치로 회복된 것을 보여주며, 이때 자유표면의 아래 5~6 cm 구간에서 Pool의 내부에 기포가 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 기포들은 가열벽면에서 생성한 것이 아니라 Blow-up 과정에서 비산된 액적들이 Pool에 떨어지면서 만들어낸 기포들로써, 이들 기포들은 t>1초 이후의 사진에서 보는 것과 같이 기포의 성장과 운동과정에서 새로운 기포들을 형성하며 점차 그 범위가 확대되어 액체 Pool의 하단까지 기포가 발달하게 된다. 그러나 t=1초 이후 다량의 증기 생성으로 인하여 Pool내 액체의 과열에너지가 감소되어 새로운 기포의 성장이 둔화되며, 점차 기포가 생성되는 구간이 축소된다. t=2/2

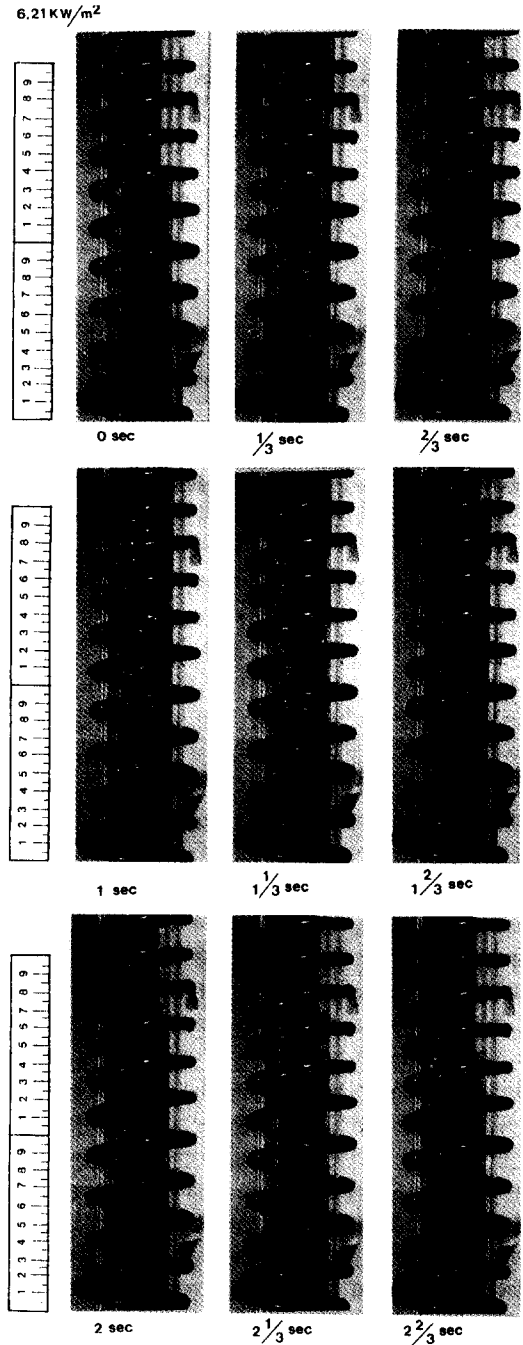


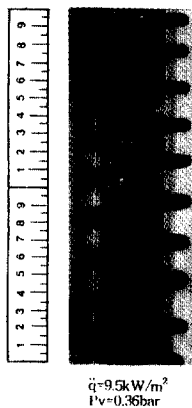
Photo. 1. Variation of flow regime with time inside the liquid pool during cycle of pulse boiling process ($\dot{q}_w=6.2 \text{ kW/m}^2$, $P_v=0.22 \text{ bar}$).

3초에서는 비등과정이 거의 종료되어 자유표면의 위치가 초기(t=0)상태로 회복되어 있음을 보여주고 있으며,

이후 새로운 기포핵이 생성될 때까지 약 7~8초간 액체 Pool은 $t=0$ 초와 같이 단상 상태를 유지하였다. 이러한 결과는 93년 수행되었던 Kim 등⁹⁾의 환형 유리관 열사이폰을 이용한 가시화 실험에서 얻은 결과와 거의 일치하고 있다. 그때의 연구에서도 언급한 것과 같이, 초기 증기 기포핵의 발생과 성장과정이 매우 빠르기 때문에 속도 1/3초의 스틸 카메라로는 포착할 수 없었으며, 또한 육안으로도 식별할 수 없었다. 그러나 0.1 bar 이하의 진공압력하의 Pool boiling에서 발생하는 증기핵의 거동은 Stralen 등¹²⁾에 의해 가시화 실험을 통하여 연구되었으며, 이들 연구자들에 의하면 기포의 생성과 이탈에 이르는 시간이 0.2 bar인 물에서 35 msec이며 이탈 기포의 크기는 증기압력이 감소할 수록 액체와 증기의 밀도차가 크기 때문에 증기 기포의 직경이 수 cm에 도달되고, 이 값은 대기압하에서의 기포의 이탈직경에 비하여 0.02 bar에 이르면 약 170배까지 증가한 값이다.

3-2-2. 천이 비등 Regime

Photo. 2는 열속 $q''=9.5 \text{ kW/m}^2$, 압력 $P_v=0.36 \text{ bar}$ 일 때 증발부 내부의 2상 유동 Regime을 보여주고 있다. Photo. 1의 경우와 비교하여 열속이 증가할수록 가열벽면에서 기포의 발생점이 점차 증대된다. 이 사진에서는 증발부 Pool의 하단으로부터 7~9 cm이하의 영역에서 수개의 기포핵들이 원형을 이루고 있는 것을 보여주며, 이들 기포들이 주어진 2~3개의 생성점에서 성장하여 운동하고 있는 것을 보여주고 있다. 앞의 Photo. 1에서 $t=0$, 1/3초에서 보았던 것과 비교하여, 기포가 매우작고 원형을 이루고 있음을 인식할 수 있다. 그러나 증발부 하단으로부터 10 cm이상의 영역에서는 그 하단에서 생성된 기포들이 이동하면서 함께 서로 합쳐져서 Churn flow, 또는 Bubbly flow regime을 이루고 있다. 이와 같이 증발부 상부에서 Churn flow, 또는 Bubbly flow re-



$q''=9.5 \text{ kW/m}^2$
 $P_v=0.36 \text{ bar}$

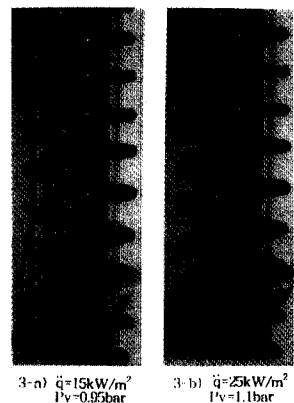
Photo. 2. Churn or bubbly flow regime in transient region ($q''=9.5 \text{ kW/m}^2$, $P_v=0.36 \text{ bar}$).

gime를 이름에 따라 증발부 Pool 계면의 정지 상태의 높이가 초기 15 cm에서 약 20~22 cm위로 이동되어 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 Pool의 자유표면이 증가되면 증발부 전 영역의 가열면이 액체막에 의해 젖어있기 때문에 열전달이 촉진되며 증발부의 과열도가 급격히 감소하는 결과를 초래하게 된다.

3-2-3. 연속 핵비등 Regime

Photo. 3-a, 3-b는 각각 $q''=15 \text{ kW/m}^2$, $P_v=0.95 \text{ bar}$ 및 $q''=25 \text{ kW/m}^2$, $P_v=1.1 \text{ bar}$ 일 때의 증발부내의 2상유동 상태를 보여주고 있다. 증발부 전 구간에서 2상 유동 형태가 거의 균일하게 되고, 기포가 균일하게 분포되어 있으며, Bubble의 크기가 열속이 증가함에 따라 더욱 작아져서 완전한 Bubbly flow regime을 나타내고 있다. 이러한 2상유동 발전과정은 일반적으로 관내 대류비등에서 나타나는 Bubbly flow, Churn flow, Annular flow의 발전과정과 많은 차이가 나타나는 것을 인식할 수 있다. 즉, 본 연구에서는 Pulse boiling으로부터 연속핵비등으로 천이되는 영역에서 매우 큰 Churn flow가 형성되지만 열속이 증가하여 연속 핵비등 영역에 도달하면 증기 기포가 더욱 작아져서 완전한 Bubbly flow regime을 나타내고 있는 것이다. 다만 실험의 최고 열속이 25 kW/m^2 로써 이보다 열속이 증가하여 Critical heat flux에 도달될 때까지 상승시키게 될 때에는 어떻게 유동 Regime이 발전될 것인가에 대해서는 현재의 연구 결과로써는 예측할 수 없다.

본 실험에서 수행한 열속 범위 이상에서는 증기 압력이 대기압 이상으로 증가하기 때문에 본 실험용으로 제작한 열사이폰으로는 내압의 제한성 때문에 수행할 수 없었으며, 보다 높은 증기압을 견딜 수 있는 새로운 열사이폰의 제작이 필요하다. Photo. 3-b에서 보는 것과



3-a) $q''=15 \text{ kW/m}^2$
 $P_v=0.95 \text{ bar}$ 3-b) $q''=25 \text{ kW/m}^2$
 $P_v=1.1 \text{ bar}$

Photo. 3. Bubbly flow regime in continuous nucleate boiling region.

3-a) $q''=15 \text{ kW/m}^2$, $P_v=0.95 \text{ bar}$
3-b) $q''=25 \text{ kW/m}^2$, $P_v=1.1 \text{ bar}$

같이 증발의 2상유동이 연속 핵비등 영역으로 천이되어 Bubbly flow regime이 되면 증발부의 가열벽 전 구간이 액체에 의해 젖게되고 증발부 가열벽면에서 열전달이 균일하게 이루어진다. 이러한 2상유동 Regime에서는 기포의 크기를 계산하고 Void율을 예측하게 되면 증발부 가열벽을 적시는데 필요한 작동유체의 최적 충전율을 계산할 수 있는 이론적 근거를 제시할 수 있을 것으로 생각한다. 이 최적충진율의 예측은 열사이폰 설계과정에서 매우 중요한 인자이며, 최적 충전율이 초과되면 단열부 또는 응축부까지 Pool의 자유표면이 성장하게 되고, 이것은 응축부에서의 응축효과를 저하시키는 효과를 초래하여 열사이폰의 열전달 성능저하가 나타나기 때문이다. 열사이폰을 설계할 때 일반적으로 적용하고 있는 충전율은 10~30%를 많이 이용하고 있으나, 기포의 Void율을 예측함으로써 보다 최적의 충전율을 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

4. 결 론

유리관과 스텔레스관을 사용하여 환형 열사이폰을 제작하고 가시화 방법을 통하여 연구한 실험용 열사이폰의 작동특성을 증발부 내부의 비등 및 기포의 성장, 그리고 이에 따른 2상유동 형태의 발전 과정에 대해 정리하면 다음과 같다.

1) 실험용 열사이폰은 이질의 재료를 사용하였고 Oring을 이용한 밀폐방법, 고주파 가열등 열사이폰의 작동성능을 저해하는 여러 요인들이 포함되어 있었으나 실험결과 온도계측에 미치는 고주파 영향, 발열 열속의 불균일, 내,외부 기체의 Leak 등과 같은 문제가 실험 내용에 영향을 미칠만큼 크게 나타나지 않았다. 열속의 변화와 상당압력의 범위는 각각 $2 < q'' < 25 \text{ kW/m}^2$, $0.1 < P_v < 1.1 \text{ bar}$ 이었다.

2) 이러한 열속범위 구간에서 증발부 Pool내부에서의 비등 Regime은 다음과 같이 열속의 크기에 따라 이동하였으며 각 구간별 생성, 발전, 2상유동 형태에서 각각 차이가 발생하였다.

a) Pulse boiling, $q'' < 5 \text{ kW/m}^2$

증기기포핵이 발생될 때까지 긴 Waiting period가 존재하고 증기 기포는 전 용기구간을 채우며, 기포가 수 cm에 도달할 때까지 급속히 성장하여 주위의 액체를 상부로 날려보내는 Blow-up 현상이 나타난다. 이러한 과정은 Kim 등의 연구결과와 유사하게 진행된다.

b) 천이 비등, $5 < q'' < 9.5 \text{ kW/m}^2$

증기 기포가 원형의 모양을 이루도록 서서히 성장하여, 기포발생점을 Pool의 중단부에서 2~3개점으로 분산되었다. 그러나 Pool의 상단에서는 기포들이 크게 성

장하여 Bubbly 또는 Churn flow 형태를 이루고 있다.

c) 연속 핵비등, $q'' > 9.5 \text{ kW/m}^2$

증기 기포핵의 발생점이 가열벽면 전 구간에서 균일하게 분포되며, 전 구간이 Bubbly flow 형태를 이룬다. 열속이 증가할수록 Bubble의 크기가 작아졌다.

3) 열사이폰의 작동성능은 증발부에서 연속핵비등이 가장 안정된 작동과 함께 작은 열저항을 나타낸다. 따라서 열사이폰 설계시 이러한 비등 Regime을 가정하고 Pool내의 Void율을 예측하면 이로부터 가열벽이 Bubbly flow로 채워지기 위한 최적의 액체충진율을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Dunn, P. D. and Reay, D. A., "Heat Pipes", 4th ed. Pergamon press (1994).
- Negishi, K., "Thermo-Fluidynamics of Two-Phase Thermosyphons", Proc. 5th int. Heat Pipe Conf., Tsukuba, Japan, Part1, pp. 193~207 (1984).
- Casarsa, C., Latrofa, E. and Shelginski, A., "The Geyser Effect in a Two-Phase Thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 6. pp. 933~941 (1983).
- Negishi, K., Kaneko, K. and Kusumoto, F., "Analysis of Pulsation in Two-Phase Thermosyphons", Proc. 6th Int. Heat Pipe Conf., Grenoble, pp. 436~440 (1987).
- Liu, J. F. and Wang, J. C. Y., "On the Pulse Boiling Frequency in Thermosyphons", Journal of Heat Transfer, Vol. 114, pp. 290~292 (1992).
- Kim, C. J., Kang, H. K., Pak, E. T. and Hwang, Y. K., "The visual Study of Nucleate Boiling Phenomena in Liquid Pool for a Closed Two Phase Thermosyphon", 6th ISTP in Thermal Engineering, Seoul, Korea, Vol. I., pp. 389~393 (1993).
- 김철주, 박이동, 황영규, 문석환, 강환국, "밀폐형 2상 열사이폰의 Pool 내부 Pulse Boiling에 관한 연구", 95 열 및 유체공학 부문 학술대회 논문집, pp. 71~78 (1995).
- Rohsenow, W. M., "A Method of Correlating Heat Transfer for Surface Boiling of Liquids", Trans. ASME, Vol. 74, pp. 967~976 (1952).
- Imura, H., Kusada, H., Oyata, J., Miyazaki, T. and Sakamoto, N., "Heat Transfer in the Two-Phase Closed Thermosyphon", Trans., JSME, Vol. 45, pp. 712~722 (1979).
- Nishikawa, K., Fujita, Y., Uchida, S. and Ohta, H., "Effect of Heating Surface Orientation on Nucleate Boiling Heat Transfer", Proc. ASME-JSME Eng.

- Joint Conf., Honolulu, Vol. 1, pp. 129~136 (1983).
11. Savchenkov, G. A. and Gorbis, Z. R., "Boiling Heat Transfer in Low Temperature Evaporating Thermosiphons", Proc. of the 5th All-Union Conference on Heat and Mass Transfer, Vol. 3, pp. 87~91 (1976).
 12. Stralen, S. J. D., Cole, R., Sluyter, W. M. and Sohal, M. S., "Bubble Growth Rates in Nucleate Boiling of Water at Subatmospheric Pressures", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 655~669 (1975).