

# 비 혼합 2유체 열사이폰의 유동 특성에 관한 가시적 연구

도선엽<sup>1\*</sup>, 강환국<sup>2</sup>, 박승철<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국산업기술대학교 기계공학과, <sup>2</sup>동은에이티이에스

## Visualization of Flow Characteristics on Thermosyphon with Immiscible Binary Working Fluid

Sun Yub Do<sup>1\*</sup>, Hawn Kook Kang<sup>2</sup>, Seung Chul Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Polytechnic University Mechanical Engineering, <sup>2</sup>Dongeon ATS

**요약** 본 연구에서는 물과 비 혼합 비 공비 물질을 작동 유체로 사용하는 가시화 실험 장치를 제작하여 열유속을 증가시키며 시간에 따른 벽면온도 특성과 내부 유동을 카메라로 연속 촬영하며 2유체 열사이폰의 내부의 유동 및 열전달 특성에 대하여 가시적 방법으로 실험을 수행하여 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 물과 FC40을 사용한 비 혼합 2유체 열사이폰은 열유속의 크기에 따라 자연대류, 펄스비등, 연속비등의 세가지 영역으로 구분 되었으며 비등은 증기압이 낮은 물에서 발생하였다. 자연대류에서는 액체 풀에서 물의 증발과 대류 액막 유동이 발생하였다. 액체 풀에서 비등이 발생할 때에는 강한 비등에 의하여 FC40과 물의 혼합된 상태로 전 영역에 걸쳐 기-액 이상 유동이 발생하였다.

**Abstract** This study presents experiments to visualize the internal flow and heat transfer characteristics of thermosyphon with immiscible of water-FC40 adopted as binary working fluid. Three different regimes depending on the amount of heat flux applied to the thermosyphon were observed: natural convection, pulse boiling, and continuous boiling. Boiling incipience took place in water, which has lower vapor pressure than FC40. During natural convection water was vaporized in liquid pool while liquid film flows were formed. On the other hand, meanwhile bubbles were generated in the liquid pool during pulse and continuous boiling, the binary working fluid of water-FC40 was observed as the mixture throughout a whole range of the thermosyphon.

**Key Words** : Immiscible binary fluid, Thermosyphon, Visualization

### 1. 서론

전기철도 차량용 전력변환 장치, 고속용 승강기의 속도제어용 인버터 시스템 등에 적용되는 대용량 전력 반도체 소자는 일반적으로 온도 특성이 강하기 때문에 적정 허용 온도를 유지해야 한다. 따라서 작동 온도를 유지하기 위해서는 반도체 내부의 스위칭 과정 또는 전기저항 손실에 의해 발생하는 열을 제거하기 위한 냉각 장치가 필요하다. 그 동안 국내 전력제어 반도체의 냉각은 기존의 알루미늄 히트싱크와 함께 전력반도체의 고밀도화에 따라 2000년대 초반부터 국산화 개발된 중력을 이용

하는 열사이폰식 히트파이프 냉각기를 사용하는 추세에 있다[1]. 이러한 히트파이프용 작동 유체로써 물은 최대 열 수송 부하가 크고 열전달계수가 높아 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 작동 유체로써 물은 사용 조건에 따라 제한이 따른다. 관련 연구에 의하면 증발부에서 이송된 작동 유체가 응축부에서 응축한 후 결빙되어 증발부로 귀환하지 못함에 따라 증발부의 건조현상(dry out)이 확인되고 있다[2]. 이러한 문제의 해결 방법으로 물과 에탄올을 혼합하여 작동 유체로 사용하는 방법과 불응축성 가스를 충전하여 냉 시동 문제를 해결하는 연구가 수행되었다[3,4,5]. 그러나 에탄올을 혼합하는 경우에는 열전

\*Corresponding Author : Sun-Yub Do(Korea Polytechnic Univ.)

Tel: +82-010-3283-3891 email: dsy0824@gg.go.kr

Received April 2, 2015

Revised (1st April 27, 2015, 2nd May 6, 2015)

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

달 계수의 저하와 함께 가연성에 따른 적용의 제한이 있고 불응축성 가스를 주입하는 가스 내장 히트파이프의 경우에는 불응축 가스 점유 공간의 발생으로 인한 냉각기가 대형화의 단점이 있다. 최근, 작동 유체의 결빙에 의한 시동성 개선을 목적으로 물과 비 혼합 물질을 사용한 2유체 히트파이프의 시동에 관한 연구가 수행 되었다 [6]. 또한 증온용으로 사용되는 나프탈렌 히트파이프에 비 혼합 유체를 사용한 2유체 열사이폰에 관한 연구 결과에 의하면 시동성과 성능 개선의 효과가 있는 것으로 발표되고 있다[7]. 그런데 관련 연구 결과에 의하면 2유체 열사이폰은 시간에 따라 매우 불규칙적이며 불균일한 축 방향 온도 등 일반적으로 사용하는 단일 유체의 히트파이프와 매우 다른 작동 특성을 나타내었다. 이에 따라 여러 관련 문헌을 검토하였으나 2유체 열사이폰의 2상 유동 열전달 특성에 기초한 설명은 확인하기 어려웠다. 본 연구에서는 이러한 작동 특성의 원인을 파악하고자 물과 비 혼합 작동 유체를 사용하는 2유체 열사이폰형 히트파이프를 유리관으로 제작하고, 작동 유체의 내부 유동을 가시화하여 작동 특성을 이해 하고자 하였다. 또한 증발부의 벽면 온도를 계측하고 작동과정에서 내부 유동과의 상관성을 고찰함으로써 열전달 특성을 이해 하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 물과 혼합되지 않는 두 가지의 작동 유체의 내부 유동 가시화를 위하여 모세관 구조물이 없는 지름 15mm의 Pyrex 재질의 유리관에 진공 배기후 작동 유체를 주입하여 열사이폰형 히트파이프를 제작하였다. 제작된 열사이폰은 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. Fig. 2는 실험 장치의 구성과 함께 열사이폰 증발부를 보여준다. 작동 유체는 물과 FC40을 동일한 비율로 일반적으로 적용하는 열사이폰의 충전율인 증발부 체적의 약 30%를 충전하였으며 자세한 제원은 Table 1과 같다. 그림에서 상대적으로 밀도가 큰 FC40이 물의 하부에 액체 풀을 이루고 있음을 볼 수 있다. 열사이폰에 열부하 공급을 위해 증발부 표면에 전기 저항선 ( $\phi 0.45$ ,  $7.5\Omega/m$ )을 일정한 간격으로 설치하였으며, 응축부에는 아크릴 재질의 냉각수 순환 장치를 설치하여 이송된 열을 제거 하도록 하였다. 열사이폰의 작동온도 계측을 위하여 증발부에 8개의 열전대(K type  $\phi 0.12mm$ )를 Fig. 3

과 같이 표면에 설치하였으며 데이터로거(DR230, Yokogawa)로 계측하였다. 이 때 유동이 보다 복잡할 것으로 예상되는 두 유체의 경계면에 열전대를 상대적으로 좁은 간격으로 설치하였다. 증발부의 열부하 공급은 슬라이다스를 사용하여 전압을 제어하도록 하였으며, 공급된 열부하는 파워메타(WT210, Yokogawa)로 계측하였다. 실험 방법은 다음과 같다. 먼저 수직으로 설치된 가시화형 열사이폰의 응축부에 냉각수가 흐르는 상태에서 증발부에 열부하를 공급하며 초기 시동과정 및 정상 상태에 이르는 동안의 시간에 대한 벽면 온도를 계측하였다. 동시에 내부 유동을 관찰했으며, 내부 현상을 카메라(EOS700D)로 연속 촬영 하였다. 하나의 열부하에 대한 실험이 완료되면 열부하를 변경하며 열유속에 따른 작동 특성에 대하여 실험을 수행하였다.

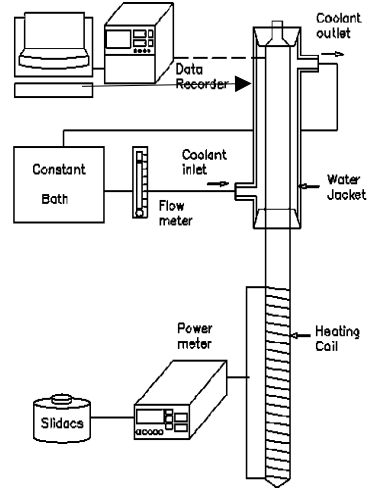


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

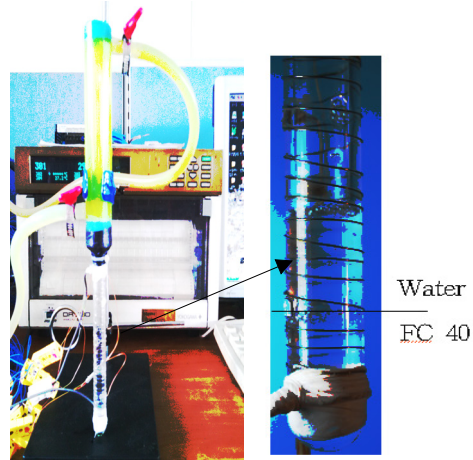


Fig. 2. Visualization apparatus and 2 fluid thermosyphon.

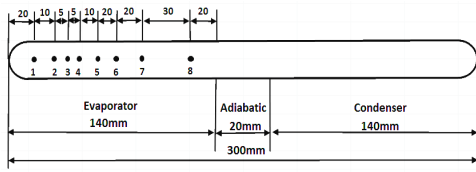


Fig. 3. Position of thermocouples.

Table 1. Design parameters of the thermosyphon

Working fluid	Water, FC40	
Charge ratio/ volume	Water 15%	FC40 15%
	10 cc	10 cc
Container Dimension	Outer Diameter : 15 mm	
	Length of Evaporator : 140 mm	
	Length of Adiabatic section : 20 mm	
	Length of Condenser : 140 mm	
Container Material	Pyrex	

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시간에 대한 온도분포와 비등영역

Fig. 4는 가시화용 열사이폰에  $3\text{kW/m}^2$ 의 열유속을 갑자기 가한 상태에서 시동이 이루어지는 동안, 시간에 대한 증발부 각 측정점의 온도를 측정한 결과이다. 그림에서 각 측정점의 온도는 열부하 공급 후 약 2분까지는 시간에 따라 급격한 증가율을 보이나 이후 온도 증가율이 감소하고 있다. 이때 각 측정점의 시간에 따른 온도 증가율은 비교적 유사하다. 다만, 증발부 하단 두 측정점인 1번과 2번의 온도 증가율은 지속적으로 증가하는 경향을 보임으로써 다른 측정점들과 구분되고 있다. 이와 같은 현상은 다음절의 가시화 결과에서 설명하는 것과 같이 하단에 형성된 액체 풀(liquid pool)에서 비등 열전달은 발생하지 않으며 FC40과 물에 현열로 저장됨에 따른 결과로 파악된다. 다만, 이러한 범위의 열부하에서는 과열도(degree of super heat)가 낮아 비등은 발생하지 않는 것으로 파악된다. 이 때 벽면에서 공급되는 열은 두 유체 내부의 자연대류 열전달에 의하여 상부에 물의 표면으로 전달된 후 물과 증기의 기-액 계면에서 물의 증발에 의하여 소산된다. 또한, 증발부 액체 풀 상부는 응축 후 귀환되는 액막에서의 증발에 의하여 소산된다. 이러한 결과로 FC 40이 액체 풀을 이루는 하단 2번 측정점에서 최고의 과열도를 보이고 있다. 이러한 열전달 특성에 대해서는 3.3절에서 고찰하였다. 그림에서 열 유속

을  $4.5\text{kW/m}^2$ 로 증가시킨 후 벽면 온도는 수초 간 다시  $2\sim 3^\circ\text{C}$  온도 상승 후 갑자기 온도가 급격하게 감소하며 이 때 액체 풀을 이루는 벽면에서의 온도 강하는 최대 약  $20^\circ\text{C}$ 에 달하고 있다. 이후 벽면 온도의 상승과 하강이 반복하는 벽면 온도의 진동이 발생하고 있다. 이러한 현상을 가이저 보일링(geyser boiling)이라 하며 통상 주기성을 갖기 때문에 펄스비등(pulse boiling)으로 지칭하기도 한다. 관련 연구에 의하면 열사이폰이 저열유속, 저압상태에서 주기적 비등에 의하여 나타나는 현상으로 여러 논문에서 언급되고 있으며[8,9] 두 가지 유체를 사용한 본 연구에서도 동일한 현상이 발생하는 것으로 파악된다.

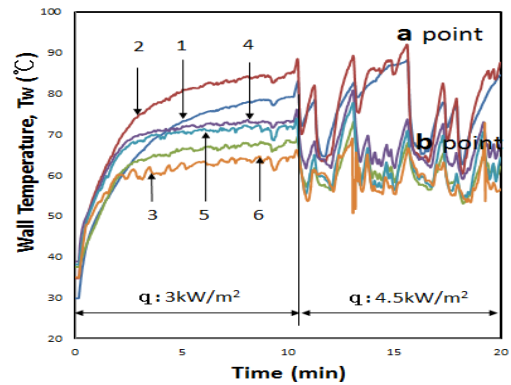
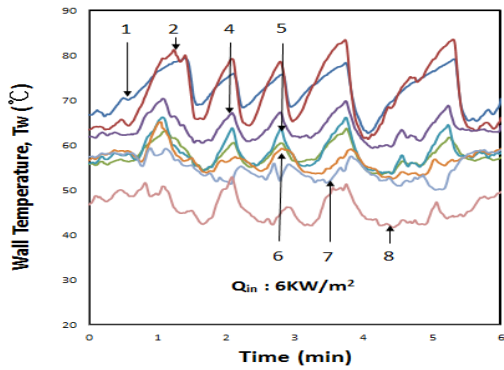


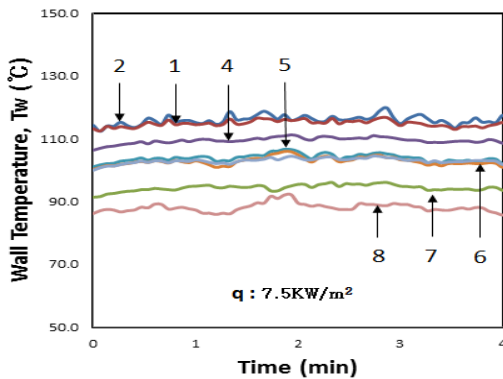
Fig. 4. Wall temperature variation with time at the natural convection and pulse boiling regime.

Fig. 5[a],[b]는 열 유속을 증가시켜 약  $6\text{kW/m}^2$ 와  $7.5\text{kW/m}^2$ 일 때 시간에 따른 벽면온도를 나타낸 그림이다. 그림에서 Fig. 4의 결과와 비교하여 열 유속 증가에 따라 벽면온도 진동의 주기와 진폭이 비교적 일정하며 또한 짧아짐을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 열 유속 증가에 따라 핵 비등의 발생주기가 단축됨에 따른 현상이다. 이러한 주기와 과열도등은 작동유체의 종류, 작동 온도, 가열 표면 상태에 따라 서로 상이한 결과를 나타내며 관련 문헌에서 확인할 수 있다[8-12]. 이상의 결과로부터 본 실험의 조건에서는 비 혼합인 2유체를 사용하는 경우에도 열 유속의 범위에 따라 액체 풀 내의 유동은 자연대류, 펄스비등, 연속비등의 구간으로 구분되었다. 본 연구의 결과로는 약  $3\text{kW/m}^2$ 이하에서는 자연대류 유동이, 약  $7\text{kW/m}^2$ 까지의 열 유속 범위에서는 펄스 비등이 그리고 그 이상의 열 유속에서는 연속비등이 지배적

으로 발생하였다. 관련문헌[13]의 물을 작동유체로 하는 열사이폰의 실험결과와 비교하면 열유속 범위에서 다소 차이가 확인되다. 이러한 원인은 비등 영역이 작동 유체의 종류와 용기의 표면 즉 가열 표면 조건 및 작동 압력에 의하여 지배되는 것으로 알려져 있으며[8,9,10] 이에 따라 비혼합 2유체를 사용하는 열사이폰을 산업적으로 적용하는 경우에는 용기의 재질을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.



[a]



[b]

Fig. 5. Wall temperature variation with time at the various heat flux.

### 3.2 열사이폰 내부의 열전달 현상

Fig. 6은 증발부 열 유속이 3kW/m<sup>2</sup>로써 액체 풀이 자연대류 영역일 때 촬영한 결과이다. 사진에서 증발부에 액체 풀에서는 어떠한 비등 현상도 목격되지 않으며 증발부-증기 경계면에서의 증발과 그 상부에서의 액막 유동을 확인할 수 있다. 또한 사진에서 보는 것과 같이 물과 FC40의 경계면이 뚜렷하게 구분되며 각각의 유동 영

역에서 대류 유동이 발생함을 확인할 수 있었다. 한편 응축부에서 응축된 후 중력에 의한 체적력에 의하여 액막 형태로 귀환하는 액막은 줄기를 이루며 국부적으로 흐르는 것이 확인 되었으며 이러한 결과, 앞절의 Fig.4에서 보는 것과 같이 벽면은 시간과 위치에 따라 불균일한 온도 분포를 나타낸다.

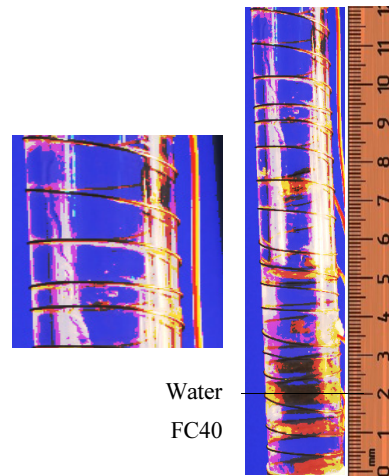


Fig. 6. Natural convection in the liquid pool and liquid film on the evaporator surface.

Fig. 7[b]~[e]는 일련의 핵비등이 발생하는 2~3초 동안 연속적으로 촬영된 결과를 보여준다. 펄스비등이 발생하면 과열된 작동유체가 비등함에 따라 기포의 성장은 폭발하듯이 성장하여 주변 및 상부의 유체를 응축부 상부로 밀어 낸다. 초기 비등의 발생 위치는 물이 풀을 이루는 벽면의 상단에서 발생하며 이후 비등발생 위치는 하향한다. 이 때 초기 기포의 발생 위치는 물이 액체 풀을 이루는 벽면이었으며 경우에 따라 물과 FC40 경계면의 물에서 목격되기도 하였으나 상대적으로 낮은 빈도로 발생하였다. 또한 두 유체의 계면에서 발생한 기포는 측면의 가열 벽면에서 발생하는 기포의 성장률에 비하여 매우 느린 속도로 성장함에 따라 가이저 보일링과 같은 현상은 발생하지 않았다. 한편 이러한 일련의 연속적인 비등은 비교적 주기를 가지고 발생하였으며 물의 폭발적인 기포 성장이 발생하면 주변의 유체는 응축부로 함께 비산되며 이 때 FC40도 물과 강제 혼합된 상태로 응축부로 이송되었다. Fig. 8은 이러한 영역에서 펄스 비등 주기 사이의 액막 유동이 발생할 때 응축부에서 촬영한 결과를 보여준다. 증발부에서 발생하는 비등에 의하여

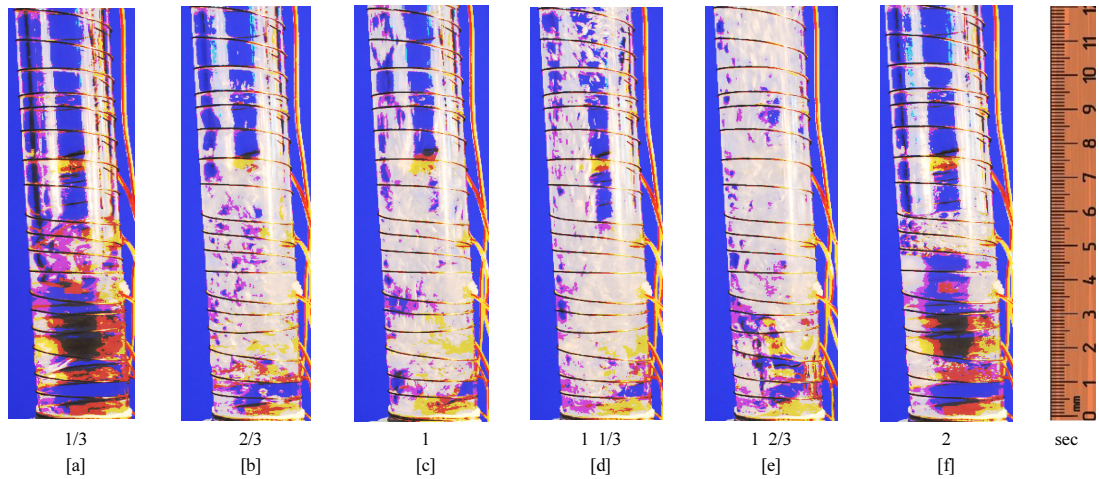


Fig. 7. Process of pulse boiling in the liquid pool.

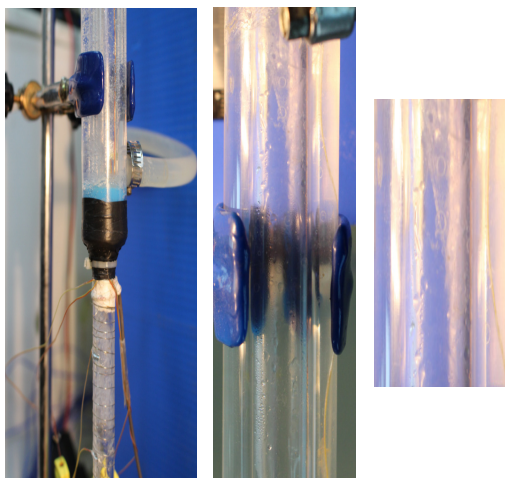


Fig. 8. Condensate flow on the condenser surface.

액체가 그 상부로 이동하여 배제되면 작동유체-증기 계면은 하향한다. 이후 액적 상태로 증발부로 귀환되는 혼합유체는 과열 상태인 증발부 벽에서 다시 비등이 발생되며 수회 일련의 연속적인 비등이 발생되었다. 이때 오로지 물에서 비등이 발생하고 FC40에서는 비등이나 기화 등 상변화는 발생하지 않은 것으로 파악되며, 다만 이때 FC40은 현열 형태로 응축부에 열을 전달하는 것으로 파악된다. 일련의 핵 비등 과정이 완료되면 비등은 Fig. 7[f]와 같이 두 유체는 서로 분리되어 액체 풀을 다시 형성한다. 이후 다음의 핵 비등이 발생할 때까지 증발부 상부의 증발과 대류 유동 열전달 과정이 유지된다.

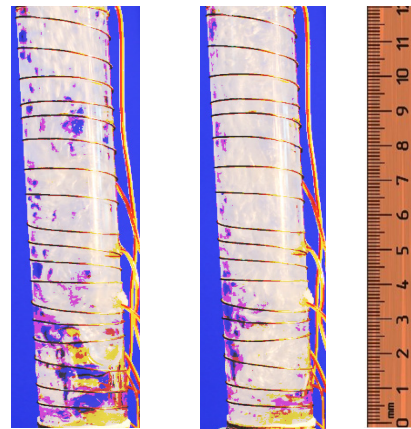


Fig. 9. Continuous boiling in the evaporator.

Fig. 9는 열 유속을  $7.5\text{ kW/m}^2$ 로 증가시켜 연속적인 핵 비등이 발생하는 조건에서 촬영된 사진이다. 사진에서 증발부 벽 전 영역이 기포류(bubbly flow) 또는 천류(churn flow)가 점유되는 현상을 확인할 수 있다. 이 때 증발부 전 영역은 FC40과 물이 혼합된 상태에서 비등이 발생함에 따라서 두 유체는 강한 혼합 유동이 나타나며 열 유속 증가에 따라 비등 주기와 혼합 유동 강도도 증가하였다. 이에 따라 비등 발생 위치에서 비등이 발생하는 유체의 종류를 육안으로 확인하기는 매우 어려웠다. 한편 물과 FC40이 혼합된 상태의 혼합액적은 증발부와 단열부 뿐 아니라 응축부 상부에까지 도달 하였다. 따라서 핵 비등이 발생하는 물의 액체풀이 점유하는 그 하부와 달리 이 지역에서는 혼합 유체의 대류 및 액막에서의

증발이 주요 열전달 특성인 것으로 파악된다. 이에 따라 증발부나 응축부에서는 FC40이 일종의 액체층에 의한 열 저항체로 작용하여 열전달 성능을 저하시킬 수 있을 것으로 예측 된다. 한편 표면장력의 차에 의하여 두 유체의 계면을 따라 물질 절단이 발생하는 마랑고니 효과(Marangoni effect)가 발생할 것으로 예측되나 본 실험의 경우에는 연속적인 강한 비등과 혼합 유동에 의하여 이러한 현상을 육안으로 확인하기는 어려웠다.

### 3.3 벽면온도분포와 열전달 특성

두 가지 혼합 유체를 작동 유체로 사용함에 따라 비등의 발생 위치나 벽면 온도분포 및 과열도는 열사이폰의 열전달 성능을 파악하는 중요한 특성이 된다. 이러한 관점에서 비등의 발생위치 및 열전달 특성을 파악하고자 Fig. 4의 a점과 b점에 표시된 것과 같이 비등이 발생하기 전, 후 열사이폰의 길이 방향으로의 온도분포를 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 증발부 끝단으로부터 온도가 증가하여 FC40과 물의 경계면의 가장 근접한 위치인 2번에서 가장 높은 온도를 보이며 그 상부는 상대적으로 일정한 온도를 나타내고 있다. 이러한 현상은 하단 FC40은 공급된 열에 의하여 온도가 상승함에 따라 자연 대류에 의하여 상부의 물에 열을 전달하며 이 때 두 유체의 비 혼합 특성에 따라 물과 FC40의 경계면에서는 전도 열전달에 의하여 열이 전달됨에 따라 두 유체의 계면 하부에서 가장 높은 온도를 보이는 것으로 파악된다. 한편 상부의 물은 액체 풀을 유지한 상태에서 상부 기액 계면에서의 증발에 의하여 공급된 열을 소산하게 된다. 이후 연속적인 비등이 발생하면 물과 FC 40은 혼합된 상태에서 유동하며 액체 풀의 높이가 낮아짐에 따라 물은 두 유체의 경계면 이하로 하향하게 된다. 이 때 과열된 벽면으로 유입된 혼합 유체중 물에서 비등이 발생하게 되며, 따라서 하부 벽면의 온도도 감소하게 된다. 이에 따라 그림에서 보는 것과 같이 상대적으로 FC40으로 점유되던 하단의 과열도는 감소하며 최고점의 위치도 증발부 끝단에서 나타나고 있다. 한편 기포의 발생 위치와 주기는 열적 조건에 따라 변동하였으며 동일 열 유속 조건에서도 항상 일정한 형태를 유지하지는 않았다.

열유속 변화에 따른 영향을 파악하고자 증발부 길이 방향으로의 벽면 온도를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서도 앞의 결과와 동일하게 액체 풀이 상대적으로 과열된 상태로 이중 두 유체의 계면에 근접한 2번 측정점에

서 최고의 온도를 보이며 단열부 하단부인 8번 측정점에서 가장 낮은 온도를 보이고 있다. 이러한 이유는 열 유속이 증가하여 연속 비등이 발생하면 혼합 유동이 발생하는 경우에도 증발부 하단에는 여전히 FC40이 풀을 이루고 있으며 대류 이외의 열전달은 발생하지 않기 때문으로 파악된다. 또한 증발부 상부에서는 두 유체가 액체층을 형성하며 하향함에 따라 액체층이 두꺼워지는 증발부 하단은 상대적으로 온도가 증가하고 있다. 열유속이 증가하면 두 유체의 혼합 유동 및 기-액 경계면의 하강에 따라 FC40의 점유 위치의 과열도가 상대적으로 낮아지게 됨을 확인할 수 있다.

한편 본 연구에서는 가시적 실험을 통하여 내부 유동 특성을 이해할 목적으로 실험 장치가 구성됨에 따라 열 저항 등 열전달 성능과 관련한 실험은 수행하지 못하였다. 따라서 냉각 장치의 설계를 위한 증발부와 응축부의 열전달 성능 파악을 위해 작동환경을 고려한 용기의 재질과 지름 및 충진율 등을 변수로 하는 체계적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

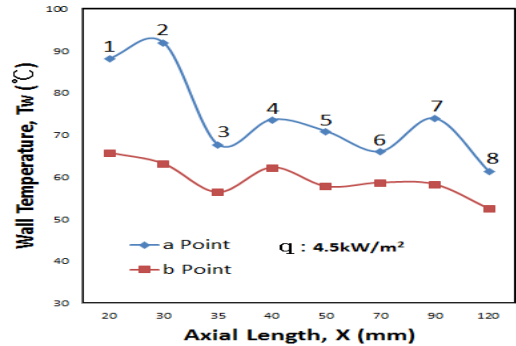


Fig. 10. Wall temperature distribution before and after a boiling process.

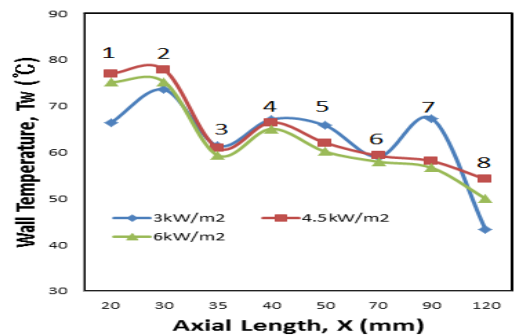


Fig. 11. Wall temperature distribution at the various heat flux.

## 4. 결론

본 연구에서는 물과 비 혼합 물질인 FC40을 작동 유체로 사용하는 2유체 열사이폰의 내부의 유동 및 열전달 특성에 대하여 가시적 방법으로 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 물과 FC40을 사용한 비 혼합 2유체 열사이폰은 열 유속의 크기에 따라 자연대류, 펄스비등, 연속비등의 세가지 영역으로 구분되었으며 비등은 증기압이 낮은 물에서 발생하였다.
- 2) 자연대류 영역에서 두 유체는 액체 풀 상부의 물에서 증발 및 대류 액막 비등이 발생하였다. 펄스비등 과정 및 연속 비등 영역에서는 물에서 강한 비등이 발생하면 두 유체는 혼합 유동이 발생하며, 증발부 및 응축부 전 영역에 걸쳐 FC40과 물의 혼합 액막 및 기포류(bubbly flow) 또는 천류churn flow)가 형성되었다.
- 3) 연속비등이 발생하는 영역에서는 두 유체의 혼합 유동에 의하여 FC40이 증발부 및 응축부 벽에서 일종의 액막층을 형성함에 따라 열 저항체로 작용할 것으로 예측된다.

## References

- [1] H. K. Kang, "Performance Test for the Performance Reliability of the Heat Pipe for Cooling PowerSemiconductors", *The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 9, No. 3, pp. 203-212, 2004.
- [2] S. E. Hong, H. K. Kang, K. C. Cho, "A Study on the Characteristics of a FrozenStart up for a Variable Conductance HeatPipe", *Korean Air-Conditioning and RefrigerationEngineering of Summer Conference*, pp. 339-345, 2006.
- [3] E. G. Jung, H. B. J, H. Y. Kwak, "Performance Characteristics of a Heat Pipe Having Water-Ethanol Mixture as Working Fluid for Evacuated Solar Collectors", *Journal of Korean Solar Energy Society*, Vol 28, No 5, pp.1598-6411, 2008.
- [4] H. K. Kang, W. Cho, "A Study on the Operational Characteristics of the VCHP", *Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 37-43, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17958/ksmt.11.4.200912.37>
- [5] H. K. Kang, W. Cho, "A Study on the Operational Characteristics of the Power Semiconductor Cooling Device for Frozen Start-up Using VCHP", *Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 211-217, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17958/ksmt.12.4.201012.211>
- [6] S. Y. Do, H. K. Kang, S. C. Park, "A Study on the Frozen Start up Characteristics of the Immiscible Two Fluids Thermosyphon" *Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 223-229, 2015.
- [7] T. S. Jung, H. K. Kang, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Binary Working Fluid for Clean Large Cauldron Using Liquid-Vapor Phase Change Heat", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 11, pp. 899-905, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.11.899>
- [8] C. J. Kim, S. H. Moon, H. K. Kang, "A Study on the Pulse Boiling Occuring Inside the Liquid Pool of Closed Tow-Phase Thermosyphon", *Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology(B)*, Vol. 21, No. 10, PP. 1254-1261, 1997.
- [9] H. K. Kang, H. S. Chung, M. S. Kim, S. S. Kim, "Flow Visualization of FC-72 Thermosyphon", *Korean Air-Conditioning and Refrigeration Engineering of Summer Conference*, pp. 1447-1451, 2001.
- [10] H. K. Kang, J. M. Park, C. J. Kim, K. B. Yim, "An Experimental Study on the Regimes of Unstable Nucleate Boiling for a Closed Tow-Phase Thermosyphon", *Korean Air-Conditioning and Refrigeration Engineering of Winter Conference*, pp. 17-21, 1995.
- [11] J. F. Lin, J. C. Y.Wang, "On the Pulse Boiling Frequency in Thermosypons", *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 290-292, 1922.
- [12] K. Negishi, K. Kaneko, F. Kusumoto, " Analysis of Pulsation in Two-Phase Thermosypons", *Pro. 6<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf, Grenoble*, pp. 436-440, 1987.
- [13] H. K. Kang, " A Study on the Boiling Mechanism and Heat Transfer Characteristics of Pulse Boiling for a Closed Two-Phase Thermosyphon", *Sungkyunkwan University Ph.D thesis*, pp. 94-99, 1996.

---

**도 선 엽(Sun-Yub Do)**

[정회원]



- 1996년 8월 : 아주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 ~ 현재 : 한국산업기술대학교 기계시스템공학과(공학박사과정)

<관심분야>  
열전달 / 자동차

---

**강 환 국(Hawn-Kook Kang)**

[정회원]



- 1996년 8월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 7월 ~ 현재 : 동은 ATS 대표

<관심분야>  
열전달 / 기계설계

---

**박 승 철(Seun-Chul Park)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 경희대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1998년 1월 ~ 현재 : 한국산업기술대학교 기계공학과(교수)

<관심분야>  
냉공조 / 열유체