



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 8월  
석사학위 논문

알루미늄 맥동 히트 파이프의 표면  
개질을 통한 성능 및 내구성  
향상 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

김지연

# 알루미늄 맥동 히트 파이프의 표면 개질을 통한 성능 및 내구성 향상 연구

Improvements of performance and durability through surface  
modification of aluminum pulsating heat pipe

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원

기계공학과

김지연

# 알루미늄 맥동 히트 파이프의 표면 개질을 통한 성능 및 내구성 향상 연구

지도교수            정   성   용

이 논문을 공학석사 학위 신청 논문으로 제출함

2022년 04월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 지 연

# 김지연의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조 흥 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 성 용 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 정 원 (인)

2022년 05월

조선대학교 대학원

## Contents

<b>Contents</b> .....	<b>i</b>
<b>List of Figure</b> .....	<b>iii</b>
<b>List of Table</b> .....	<b>v</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구 배경 및 이전 연구 .....	<b>1</b>
제 2 절 연구 목적 .....	<b>6</b>
<b>제 2 장 형상 설계 및 젖음성 개질</b> .....	<b>7</b>
제 1 절 PHP 형상 설계 및 제작 .....	<b>7</b>
제 2 절 PHP 채널 표면 개질 .....	<b>9</b>
<b>제 3 장 실험 장치 및 방법</b> .....	<b>11</b>
제 1 절 실험 방법 .....	<b>11</b>
제 2 절 수치적 데이터 처리 및 불확실성 .....	<b>15</b>

제 4 장 실험 결과 및 분석 .....	19
제 1 절 PHP 표면 개질 .....	19
제 2 절 유동 가시화 .....	29
1. 이상 유동 .....	29
2. OS PHP의 유동 패턴 분석 .....	31
3. MS PHP의 유동 패턴 분석 .....	38
4. OS 및 MS PHP의 dry-out 비교 .....	45
제 3 절 PHP 온도 및 열 성능 .....	47
1. 온도 변화 .....	47
2. 열 저항 및 열 성능 .....	59
제 5 장 결 론 .....	65
참고문헌 .....	67

## List of Figure

Fig. 1.1 Pulsating heat pipe proposed by Akachi et al. ....	1
Fig. 1.2 Pulsating heat pipe types .....	4
Fig. 1.3 Typical channel types of pulsating heat pipe .....	4
Fig. 1.4 Schematics of PHP .....	5
Fig. 2.1 Design of PHP used in this study .....	9
Fig. 2.2 Schematics and picture of surface modification procedure .....	11
Fig. 3.1 Schematics and image of an experimental setup .....	14
Fig. 4.1 (a) SEM image and (b) EDS of OS .....	21
Fig. 4.2 (a) SEM image and (b) EDS of MS .....	22
Fig. 4.3 Comparison of static contact angle on Al plate .....	24
Fig. 4.4 Surface properties according to contact angle .....	25
Fig. 4.5 Schematics of (a) Cassie-Baxter and (b) Wenzel state on surface having heterogeneous structures .....	27
Fig. 4.6 Comparison of droplet behaviours on PHP channels .....	29
Fig. 4.7 Typical two-phase flow patterns in vertical flow .....	31
Fig. 4.8 Typical internal flows in OS PHP at conditions of (a) initial flow motion and (b) start up pulsations .....	33
Fig. 4.9 Effect of micro-cavity on the boiling nucleation .....	35
Fig. 4.10 Bubble growth at a cavity .....	35
Fig. 4.11 Accelerated pulsating caused by Al corrosion after operations in OS PHP ( $Q_{in} = 60 \text{ W}$ ) .....	37
Fig. 4.12 Weak pulsation and bubble generation caused by Al corrosion after operations OS PHP ( $Q_{in} = 65 \text{ W}$ ) .....	38
Fig. 4.13 Initial bubble generations in MS PHP under $Q_{in} = 50 \text{ W}$ .....	40



**Fig. 4.14 Typical internal flows in MS PHP at conditions of (a) initial flow motion and (b) start up pulsations ..... 42**

**Fig. 4.15 Comparison of pulsations of MS PHP under (a)  $Q_{in} = 65 \text{ W}$  (b)  $Q_{in} = 70$  (c)  $Q_{in} = 75 \text{ W}$  ..... 44**

**Fig. 4.16 Comparison of displacement in OS and MS PHP ..... 45**

**Fig. 4.17 Comparison of internal flows of OS and MS PHPs at dry-out condition .. 47**

**Fig. 4.18 Variations of operating temperatures for OS PHP at 0 day during (a) Initial flow motion, (b) start up pulsations and (c) dry-out ..... 49**

**Fig. 4.19 Temperature variations under various Q of OS PHP after (a) 0 day and (b) 1 day ..... 51**

**Fig. 4.20 Temperature variations under various Q of OS PHP after (a) 5 day and (b) 7 day ..... 52**

**Fig. 4.21 Variations of operating temperatures for MS PHP at 0 day during (a) Initial flow motion, (b) annular flow and (c) normal operating regimes ..... 54**

**Fig. 4.22 Variations of operating temperatures for MS PHP at 1 day during (a) Initial flow motion, (b) annular flow and (c) normal operating regimes ..... 56**

**Fig. 4.23 Temperature variations under various Q of MS PHP after (a) 0 day and (b) 1 day ..... 58**

**Fig. 4.24 Temperature variations under various Q of MS PHP after (a) 5 day and (b) 7 day ..... 59**

**Fig. 4.25 Comparisons of temperature difference for OS and MS PHP ..... 61**

**Fig. 4.26 Comparisons of thermal resistance for OS and MS PHP ..... 63**

**Fig. 4.27 Heat flux corresponding to the input power for PHP used in this study ... 65**

## List of Table

Table 3.1 Working range and accuracy of the instruments .....	15
Table 3.2 Experimental conditions and parameters .....	15
Table 3.3 Minimum temperature difference and uncertainty of thermal resistance for OS PHP .....	18
Table 3.4 Minimum temperature difference and uncertainty of thermal resistance for MS PHP .....	19

## Nomenclature

### Roman symbol

<b>Bo</b>	:	<b>Bond number</b>
<b>D</b>	:	<b>PHP의 내부 채널 직경 [mm]</b>
<b>D<sub>crit</sub></b>	:	<b>임계 직경 [mm]</b>
<b>g</b>	:	<b>중력 가속도 [m/s<sup>2</sup>]</b>
<b>h</b>	:	<b>열전달계수 [W/m<sup>2</sup>°C]</b>
<b>I</b>	:	<b>전류 [A]</b>
<b>K</b>	:	<b>열전도도 [W/m°C]</b>
<b>Q<sub>in</sub></b>	:	<b>히터의 입력 전력 [W]</b>
<b>q''</b>	:	<b>열 유속 [W/m<sup>2</sup>]</b>
<b>R<sub>th</sub></b>	:	<b>열 저항 [°C/W]</b>
<b>T<sub>ad,avg</sub></b>	:	<b>단열 영역의 평균 온도 [°C]</b>
<b>T<sub>c,avg</sub></b>	:	<b>응축 영역의 평균 온도 [°C]</b>
<b>T<sub>e,avg</sub></b>	:	<b>증발 영역의 평균 온도 [°C]</b>
<b>ΔT</b>	:	<b>증발 영역과 응축 영역의 평균 온도차 [°C]</b>
<b>V</b>	:	<b>전압 [V]</b>
<b>V<sub>PHP</sub></b>	:	<b>PHP의 부피 [mL]</b>
<b>V<sub>I</sub></b>	:	<b>주입된 액체의 부피 [mL]</b>
<b>f</b>	:	<b>자유에너지</b>
<b>CHF</b>	:	<b>임계열유속 [W/cm<sup>2</sup>]</b>

## Greek symbol

$\rho_{\text{liq}}$	:	액체 상태에서 작동 유체의 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{vap}}$	:	증기 상태에서 작동 유체의 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	:	표면 장력 [N/m]
$\theta$	:	접촉 각 [°]
$\theta'$	:	유효 접촉 각 [°]
$\beta$	:	공동협각 [°]

## Abbreviations

<b>PHP</b>	<b>:</b>	<b>Pulsating heat pipe</b>
<b>CLPHP</b>	<b>:</b>	<b>Closed loop pulsating heat pipe</b>
<b>CEPHP</b>	<b>:</b>	<b>Closed end pulsating heat pipe</b>
<b>MPHP</b>	<b>:</b>	<b>Micro pulsating heat pipe</b>
<b>SEM</b>	<b>:</b>	<b>Scanning electron microscopy</b>
<b>EDS</b>	<b>:</b>	<b>Energy dispersive X-ray spectroscopy</b>
<b>FR</b>	<b>:</b>	<b>Filling ratio</b>
<b>DI</b>	<b>:</b>	<b>Deionized</b>
<b>Al</b>	<b>:</b>	<b>Aluminum</b>
<b>O</b>	<b>:</b>	<b>Oxygen</b>
<b>Al(OH)<sub>3</sub></b>	<b>:</b>	<b>Aluminum hydroxide</b>
<b>PC</b>	<b>:</b>	<b>Polycarbonate</b>
<b>OS</b>	<b>:</b>	<b>Original surface</b>
<b>MS</b>	<b>:</b>	<b>Modified surface</b>
<b>DAQ</b>	<b>:</b>	<b>Date-acquisition system</b>
<b>fps</b>	<b>:</b>	<b>frames per second</b>
<b>CHF</b>	<b>:</b>	<b>Critical heat flux</b>
<b>TC</b>	<b>:</b>	<b>Thermal couple</b>

## Abstract

### Improvements of performance and durability through surface modification of aluminum pulsating heat pipe

Ji Yeon Kim

Advisor : Prof. Jung, Sung Yong, Ph.D.

Department of Mechanical, Engineering

Graduate School of Chosun University

As electronic devices become smaller and lighter, the problem of the management of high heat generation is emerging. The importance of cooling devices is increasing, and it is known that a heat pipe spreading heat with two-phase flows can provide the highest thermal performance. Conventional heat pipes have a disadvantage in a requirement of a wick structure. However, the micro pulsating heat pipe (PHP) has a small channel diameter flows can be generated using capillary pressure even without a wick structure.

Water can provide high thermal performance due to its high specific heat and latent heat as a working fluid in PHPs. PHPs using water are commonly made of copper and silicon, but aluminum has the advantage of being longer sustainable than copper and more economical than silicon wafers. In addition, it is possible to reduce weight and improve durability with aluminum. However, aluminum has not been employed as a material for PHPs with water as a working fluid because non-condensable hydrogen gas is generated by the reaction of aluminum and water at high temperature. The non-condensable hydrogen gas leads to the stoppage of flows inside the PHPs resulting in the worst thermal performance.

In this study, the surface of aluminum was modified using a micro-nano surface treatment for improving the durability of PHPs. This treatment prevented hydrogen gas formation even at high temperatures by forming aluminum hydroxide which removed

the possible reaction sites on surfaces. The wettability of the aluminum channel was modified to superhydrophilic to resolve the performance and durability using water as a working fluid. Water was filled approximately 55% of the channel total volume to make a stable operation and improve durability.

The evaporation region was heated through a cartridge heater, and the condensation region was cooled through a Peltier and water block. The thermal resistance was calculated from the measured temperature data at the evaporation and condensation regions with K-type thermocouples for comparing the thermal performance. The durability was evaluated by the reduction of the thermal performances before and after PHP operations. In addition, the flows inside PHPs were visualized to confirm the surface modification effect on the preventing flow motions.

The flows inside PHPs were also visualized to compare flow motions before and after the surface modification. Compared to the original PHP, the thermal resistance in the surface-modified PHP is lower due to more water evaporation. The durability was evaluated by the reduction of the thermal performances before and after PHP operations. In original surface PHP, the thermal resistance was increased and dry-out occurred under lower heat conditions as PHP operated. In contrast, in the modified surface PHP (MS PHP), both thermal resistance and dry-out heat condition were kept even after repeated operations. Therefore, the proposed method improved not only the performance but also the durability of water-Al PHPs.

Keyword : Pulsating heat pipe (PHP), Heat transfer, Surface modification, Superhydrophilic, Two-phase flow

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경 및 이전 연구

최근 들어 전자 장치의 소형화 및 고성능화 기술에 대한 발전이 가속화되며 과도한 발열 문제가 대두되고 있다. 이에 따라 효율적인 에너지 관리를 위하여 다양한 냉각 장치들에 관한 연구가 이루어지고 있다. 이로 인해 열전달률이 높은 상변화로 열을 분산시키는 히트 파이프에 관한 연구의 발전 추세가 나날이 높아지고 있으며, 이를 이용한 냉각 기술에 관한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다 [01].

히트 파이프는 한 지점에서 다른 지점으로 열을 전달할 수 있는 간단한 장치로, 구조가 간단하고 열전달 성능이 우수하며 소음이 없고 냉각 효율이 높다는 장점이 있다. 1960년대 초반부터 개발되어 다양한 형태로 발전하였으며, 1990년대 후반에 Akachi et al. [02]에 의해 Fig. 1.1과 같은 구조를 가지는 맥동 히트 파이프 (Pulsating heat pipe, PHP)가 제안되었다. PHP는 기존의 wick 구조를 가지는 히트 파이프가 소형화에 한계가 있다는 단점을 보완할 수 있는 wickless 구조로 제작 및 작동이 간단하여 소형화가 용이하며, 모세관 압력을 이용하여 유동을 발생시켜 열을 전달한다. PHP는 전자 장치의 냉각뿐만 아니라 연료 전지 또는 우주선 열 관리에도 널리 사용할 수 있다 [03-06].

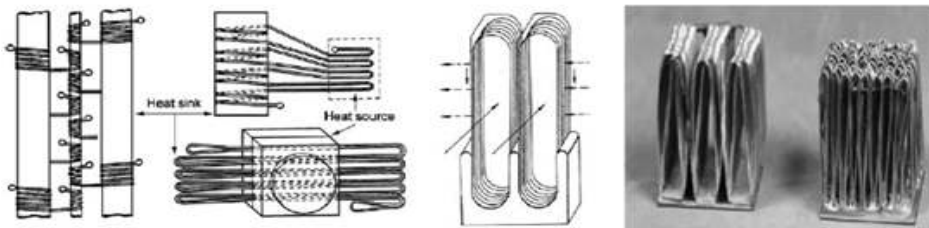


Fig. 1.1 Pulsating heat pipe proposed by Akachi et al.



고전적인 PHP는 Fig. 1.2와 같이 형태에 따라 크게 closed-loop (CLPHP)와 closed-end (CEPHP)로 나뉜다 [07]. CLPHP가 밀폐된 파이프 내에서 유체 순환이 효율적으로 이루어질 수 있기 때문에 CEPHP보다 열 성능이 우수하다고 알려져 있다 [08].

일반적으로 CLPHP는 Fig. 1.3과 채널 형태에 따라 튜브 형식과 판형 형식으로 나뉠 수 있다. 튜브 형식의 PHP는 전자 회로 및 반도체와 같은 작은 장치의 발열 문제를 해결하기 힘들며, 열 발산이 약하다는 단점이 있다. 최근 이러한 튜브 형식의 PHP의 단점을 극복하기 위해 판형 채널 형식이 주목받고 있다. 채널 형식의 평판으로 이루어진 PHP의 경우에는 어떤 위치에서도 작동할 수 있기 때문에 작동 유연성이 있으며, 안정적이고 경제적인 이점이 있다 [09-11].

PHP 장치는 Fig. 1.4과 같이 밑에서부터 크게 증발 영역, 단열 영역 및 응축 영역으로 나눌 수 있으며, 한 영역에서 다른 영역으로 작동 유체의 이동은 모세관 작용에 의해 발생한다. 따라서, PHP의 내부 유동 및 열전달 성능은 부분적으로 채워진 작동 유체의 표면 장력에 큰 영향을 받는다.

PHP의 열 성능은 슬러그 또는 플러그 유동에서 시작하여 annular 유동에 이르는 이상 유동 패턴에 따라 달라진다. 증발 영역에 열이 가해지면 기화로 인한 기포가 발생하며, 발생한 기포가 응축 영역으로 진동 혹은 맥동 운동으로 이동하여 열이 제거됨으로써 냉각된다. 이와 같이 응축 영역과 증발 영역에서 응축과 증발이 반복적으로 발생하면, 유체 부피의 팽창 및 수축으로 liquid slug와 vapor plug의 진동 운동이 발생한다.

이때 채널에 발생하는 온도 구배는 튜브 내부에 일시적인 압력 변화를 일으켜 기포의 성장 및 생성을 유도하는 원동력이 된다. 하지만, 증발 영역에 지속적으로 열이 가해지면 증발 영역은 건조 상태가 되고 응축 영역에 대부분의 유체가 정체하게 되어 장치는 더 이상 작동할 수 없게 된다.

이처럼 PHP는 유동 및 열전달이 결합된 열유체역학 시스템으로 PHP의 작동 원리는 현재까지도 명확하게 밝혀지지 않았다. PHP의 연구는 이론적인 연구와 실험적인 연구로 나눌 수 있다. 이론적인 연구는 주로 이상 유동을 예측하고 PHP의 열전달 성능에 대한 다양한 매개 변수의 영향을 분석하기 위한 모델 개발에

중점을 둔다.

실험적인 연구로는 시각화 실험과 비시각화 실험으로 나눌 수 있다. 여기서, 시각화 실험은 작동 조건, 형상 및 작동 유체에 의해 변화하는 PHP의 내부 이상 유동 (two-phase flow) 패턴에 관하여 연구한다. 비시각화 실험은 기하학적 구조, 작동 유체의 유형 및 작동 조건이 열전달 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다.

이러한 다양한 방법을 이용하여 PHP 작동 메커니즘을 이해하기 위하여 성능에 영향을 미치는 다양한 매개 변수에 관한 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어, 제작과 관련한 매개 변수로 PHP 재료 [12, 13], 단면 [14, 15], 튜브 직경 [16, 17], 턴 수 [18, 19] 및 길이 [20, 21] 등의 영향이 연구되었다. 작동 환경과 관련한 매개 변수로 채널 내부 압력 [22, 23], PHP 기울기 [24, 25], 작동 유체의 충전 비율 (filling ratio, FR) [26-28] 및 증발 영역의 입력 열 [29, 30]에 따른 PHP 성능 변화가 연구되었다. 또한, DI-water [31-33], 휘발성 유체 [32, 34], 냉매 [35], 계면 활성제 [26, 36-38], 자가 습윤 유체 [39] 및 나노 유체 [22, 40, 41] 등을 PHP의 작동 유체로 사용하는 연구도 수행된 바 있다. PHP의 성능을 제어하는 데 있어서 가장 지배적인 변수는 없으며, 앞서 언급한 다양한 변수들은 상호 영향을 미치며 PHP 작동 및 성능에 영향을 미치며, 현재까지도 많은 연구가 진행 중이다.

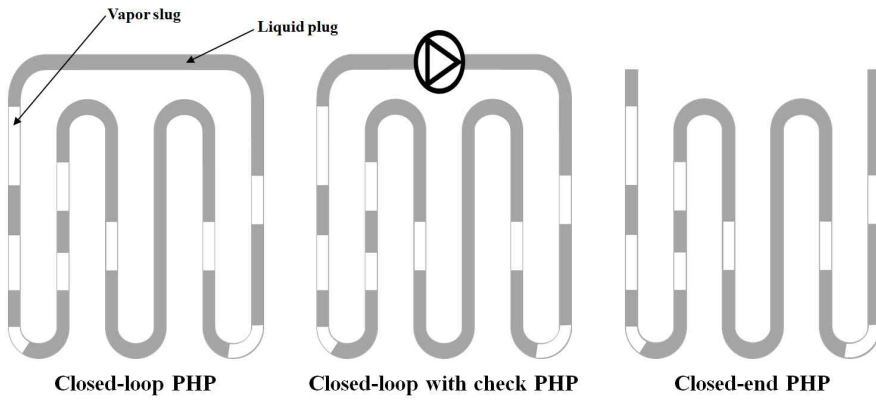


Fig. 1.2 Pulsating heat pipe types.

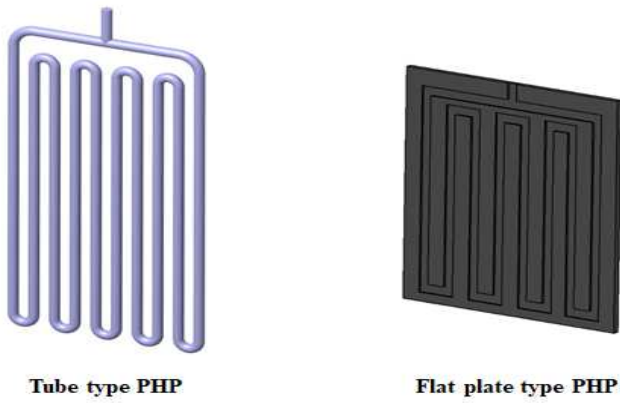


Fig. 1.3 Typical channel types of pulsating heat pipe.

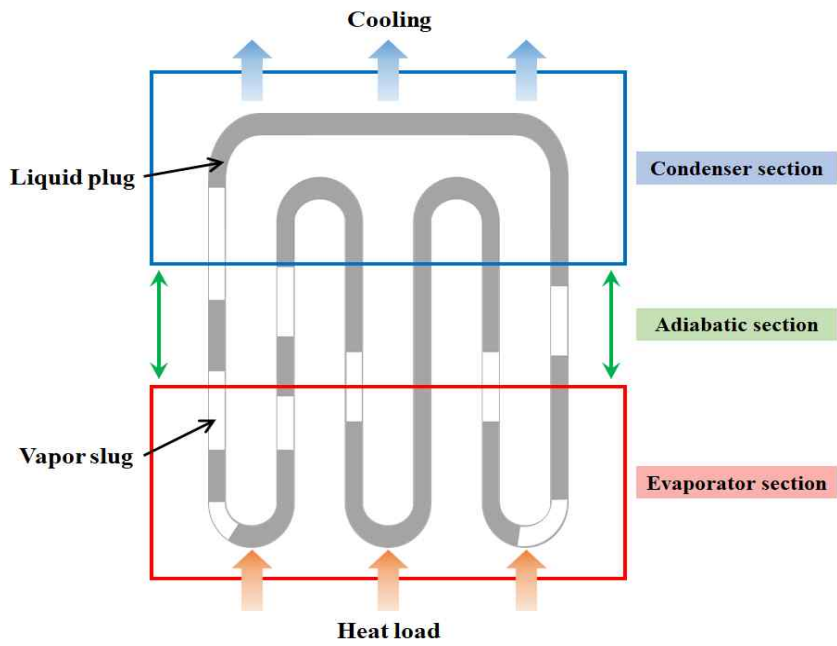


Fig. 1.4 Schematics of PHP

## 제 2 절 연구 목적

DI-water는 PHP의 작동 유체로서 높은 비열로 인해 우수한 열 성능을 제공할 수 있으며, 높은 잠열로 인해 온도 유지가 가능하여 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다. 또한, 물의 높은 열전도율은 열을 더 쉽게 분산시킬 수 있도록 한다. 일반적으로 DI-water를 작동 유체로 사용한 PHP의 재료로는 실리콘 웨이퍼 또는 구리가 사용된다. 하지만, 실리콘 웨이퍼의 경우에는 경제적인 부분이 큰 단점이며, 구리의 경우에는 약한 내구성의 단점이 있다. 알루미늄 (Al)은 구리보다 경량화 할 수 있고 내구성이 강하다. 또한, 실리콘 웨이퍼보다 높은 열전도도를 얻을 수 있으며 저렴한 가격으로 구입할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 Al으로 만들어진 PHP는 실리콘 웨이퍼와 구리의 단점을 보완할 수 있다. 하지만, Al으로 제작된 PHP에 작동 유체로 DI-water를 사용하게 되면, 고온에서 식 1.2.1과 같은 화학 반응이 일어난다 [33].



식 1.2.1 에서 알 수 있듯이, Al과 물이 고온에서 반응하여 수소 가스가 생성되기 때문에 Al은 물을 사용하는 PHP의 재료로 사용되지 않았다. 이 수소는 비응축성 가스로 밀봉된 채널에서 생성되면 유동 작동을 멈추게 하고, 열전달 성능 및 PHP 내구성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 작동 유체로 물을 사용하는 Al으로 제작된 PHP의 열 성능 저하를 방지하고 내구성을 향상하는 것이다. 이를 위해, 식 1.2.1의 생성물 중에서 수소 가스가 아닌 수산화알루미늄 (  $Al(OH)_3$  )을 미리 생성시킬 수 있는 마이크로 나노 부식 표면 개질 방법을 통해, Al PHP의 표면을 개질하였다. 따라서, Al과 물이 고온에서 만나도 화학 반응을 일으키지 않고 내구성을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 2 장 형상 설계 및 젖음성 개질

### 제 1 절 PHP 형상 설계 및 제작

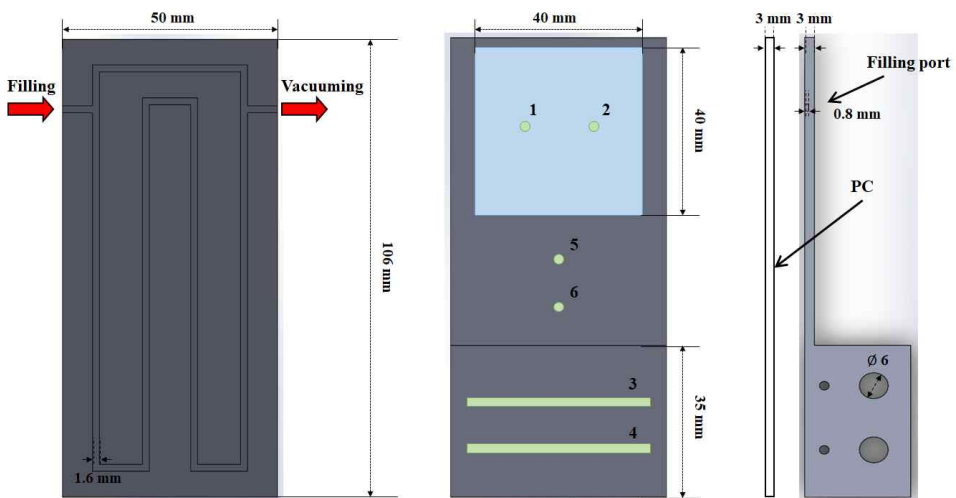
Fig. 2.1은 본 연구에서 사용된 PHP의 설계도를 보여준다. 본 연구에서는 4개의 채널을 가지는 PHP를 이용하였으며, PHP의 베이스 플레이트의 채널은 알루미늄 (Al 6061)을 CNC 밀링 가공하여 제작하였다. 플레이트에 두께가 3 mm인 투명 polycarbonate (PC)를 부착하여 열 성능 측정과 내부 유동 가시화를 동시에 진행할 수 있도록 하였다. PHP의 전체적인 크기는 너비 50 mm, 길이 106 mm 그리고 증발 영역을 제외한 두께는 3 mm이다. PHP의 내부 채널의 너비는 1.6 mm이고, 깊이는 0.8 mm이다. 채널의 폭은 표면 장력이 지배적인 임계 직경 ( $D_{crit}$ )을 고려하여 선정하였다.

$$D \leq D_{crit} \approx 2[\sigma/g(\rho_{liq} - \rho_{vap})]^{0.5} \quad (2.1.1)$$

여기서,  $D$ 는 PHP의 내경,  $\sigma$ 는 작동 유체의 표면 장력,  $g$ 는 중력 가속도,  $\rho_{liq}$  및  $\rho_{vap}$ 은 각각 액체 및 증기 상태에서 작동 유체의 밀도이다. 식 2.1.1에서 상수 ‘2’는 많은 연구자들에 의해 제안된 표면 장력의 영향이 중력의 영향보다 강하여 채널에 기체 플러그와 액체 슬러그가 안정적으로 형성될 수 있는 임계 Bond number (Bo) 값이다. 위 식의 조건은 안정적인 액체 슬러그의 형성을 돕기 때문에 PHP 작동 필수 전제 조건이다. Fig. 2.1 왼쪽 그림과 같이 진공 및 작동 유체 주입을 위한 채널을 동일한 높이에 양쪽으로 가공하였다. 유체 주입 전 진공 포트를 이용하여 PHP 채널 내부를 진공으로 만든 후 유체 주입 포트를 통하여 작동 유체를 주입할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 카트리지 히터를 사용하여 증발 영역에 열을 가해 주었으며, Fig. 2.1의 오른쪽 그림에서 볼 수 있듯이 카트리지 히터는 PHP의 뒷면 아랫부분에 PHP와 동일한 재료인 Al 6061을 이용하여 두께 20 mm이며, 길이가 35 mm인

Al 블록 내에 직경 6 mm 구멍을 가공하여 위치 시켰다. PHP 증발 영역 채널의 온도를 측정하기 위하여 작은 구멍을 채널에 가깝게 추가 가공하고 열전대를 이용하여 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 여기서, 초록색으로 표시한 부분이 열전대 접착 위치이며, 숫자로 영역을 구분하였다.



**Fig. 2.1 Design of PHP used in this study.**

## 제 2 절 채널의 표면 개질

Fig. 2.2는 PHP 채널의 표면 개질 과정을 보여준다. PHP의 알루미늄 채널 표면을 개질하는 방법으로 마이크로 나노 부식 방법을 사용하였다. 먼저, 1 M 수산화나트륨 (NaOH, bead, 98.0%, Samchun Chemical, Seoul, Republic of Korea) 용액에 PHP를 5분간 담가 미세 세척을 하였다. 그 후, DI-water를 이용하여 잔류액을 제거하고, 2 M 염산 (HCl, 35.0-37%, Samchun Chemical, Seoul, Republic of Korea) 용액에 10분간 etching 하여 마이크로 구조를 생성시켰다. 이후 DI-water에 세척 후 NaOH 용액을 이용하여 10초 동안 alkaline 과정을 거쳐, 나노 구조를 생성시켰다. 이와 같이 마이크로 나노 구조를 형성한 후, 90°C로 끓고 있는 DI-water에 30분 이상 담가두었다. 175°C로 달궜진 오븐에서 건조하여 최종 표면 개질된 PHP를 준비하였다. 이 과정을 통해서 PHP 채널에  $Al(OH)_3$ 을 미리 생성시켰으며, PHP의 젖음성은 초친수성으로 변화되었다 [46, 47].

본 연구에서 적용한 표면 개질 방법은 Al과 용액이 닿는 부분은 바로 화학 반응이 일어나기 때문에 PHP의 채널 부분만을 개질하기 위하여 Fig. 2.2 아래와 같이 채널을 제외한 다른 표면에는 Kapton 테이프를 부착한 후 표면 개질을 진행하였다.



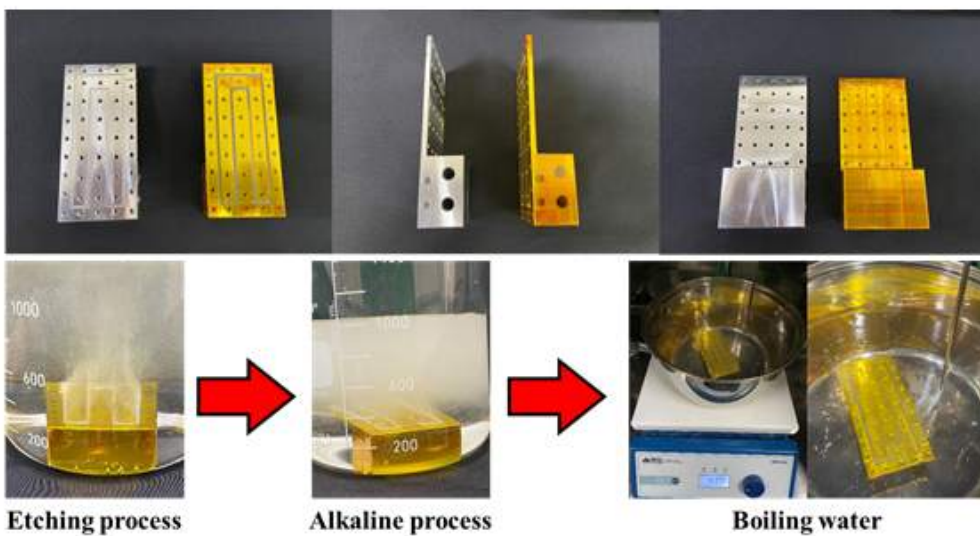
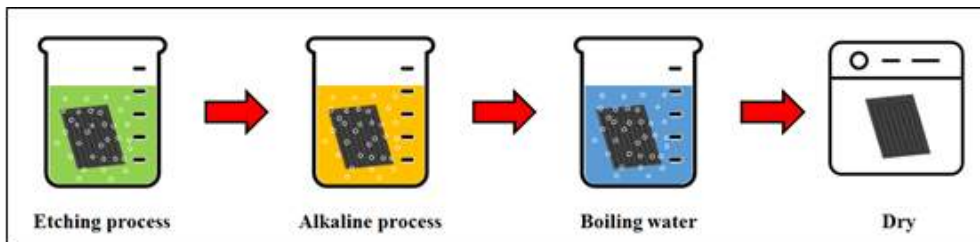


Fig. 2.2 Schematics (upper) and picture (lower) of surface modification procedure.

## 제 3 장 실험 장치 및 방법

### 제 1 절 실험 방법

Fig. 3.1은 PHP 열 성능 측정과 PHP 내부 유동을 가시화하기 위한 실험 개략도를 보여준다. 실험은 수직 바닥 가열 모드에서 수행되었으며, original surface PHP (OS PHP)와 초친수성으로 표면 개질한 modified surface PHP (MS PHP)의 성능과 내구성을 비교하였다. 초기 운전 이후 시간에 따른 성능 (0 day, 1 day, 5 day, 7 day)을 측정 비교하였다.

작동 유체인 DI-water는 약 95℃에서 3시간 동안 불필요한 기체들을 제거하고 사용하였다. 진공 펌프를 이용하여 PHP 채널 내부 압력을 10 kPa 이하로 진공도를 형성하고 DI-water를 주입하였다. 이때, 작동 유체의 FR 은 약 55%로 설정하며, FR 은 다음 식으로 계산된다.

$$FR = \frac{V_I}{V_{PHP}} \quad (3.2.1)$$

여기서,  $V_{PHP}$  와  $V_I$  는 각각 계산된 PHP 와 주입된 액체의 부피를 나타낸다. 주입된 액체의 부피는 FX-300i 정밀 저울 (AND Company, limited, Korea, 정확도 :  $\pm 0.001g$ )을 이용하여 주입 전 무게와 주입 후 무게의 차를 계산하여 측정하였다.

본 실험은 상온에서 진행되며, OS 및 MS PHP 모두 증발 영역으로 가해지는 입력 전력 ( $Q_{in}$ )는 DC power supply (Toyotech, Japan)를 이용하여 50 W부터 80 W까지 5 W 간격으로 인가하였다. 다만, 장치의 고장을 방지하기 위하여 dry-out 현상이 발생하면 실험을 중단하였다. 증발 영역에 열을 가하기 전에 응축 영역의 Peltier는 계속 켜두어 정상상태에 도달하였을 시 실험을 시작하였다. 응축 영역은 워터 블록이 부착된  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  크기의 Peltier를 이용하여 냉각하였고, 워터 펌프를 이용하여 냉각수를 워터 블록 내부로 공급하였다. Peliter 의 경우,

인가전압은 DC power supply (Protek, Korea)에 의해 6 V로 고정하였고, 워터 펌프의 유속은 240 mL/min으로 고정하였다. Peltier 및 워터 블록을 응축 영역에 부착할 때 열 저항을 줄이기 위해 thermal grease를 사용하였다.

PHP의 열 성능은 증발 영역의 평균 온도 ( $T_{e,avg}$ )와 응축 영역의 평균 온도 ( $T_{c,avg}$ )를 사용하여 계산한다. Fig. 3.1에서 초록색으로 표시한 것과 같이 K-type 열전대 (TC, 정확도 :  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5\%$ )를 각 영역의 후면 플레이트에 2개씩 부착하여 열 성능 평가를 위한  $Q_{in}$  에 따른 온도를 측정하였다. 응축과 증발 영역의 온도는 각각 접촉식 및 probe 타입 열전대를 사용하여 측정하였다. 측정된 온도 데이터는 정상상태에 도달한 후 20분 동안 data-acquisition system (DAQ, NI-cDaQ-9171)을 통해 PC로 수집하였다.

온도 그래프가 각  $Q_{in}$ 에서 정상상태에 도달했을 때 PHP 전면에서는 고속 카메라 (Fastcam Mini UX50, Photron, USA)를 사용하여 250 frames per second (fps)으로 유동 이미지를 촬영하였다. 획득한 유동 영상은 adobe photoshop 과 Image J 소프트웨어를 사용하여 후처리를 진행하였다. 영상 처리된 이미지는 열 성능과 함께 비교 분석하였다.

Table. 3.1은 본 실험 장치들의 사양에 해당하며, Table. 3.2는 본 실험에서 사용된 주요 장치의 조건을 나타낸다.

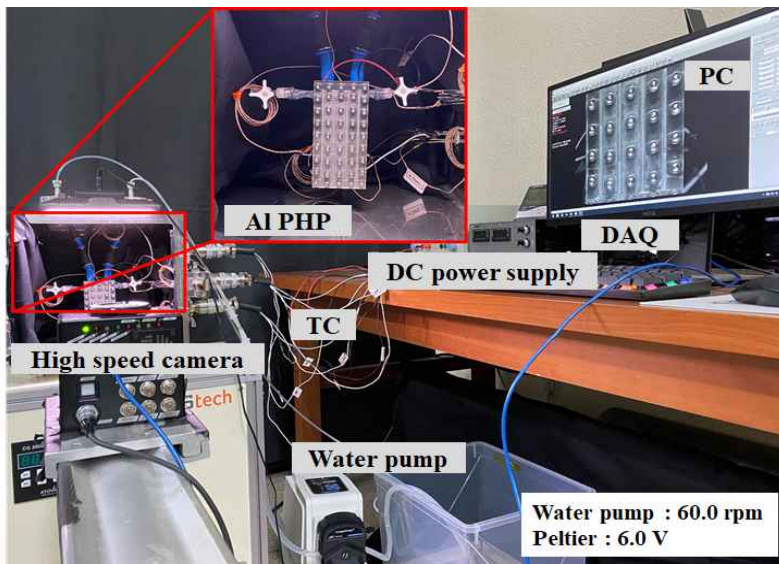
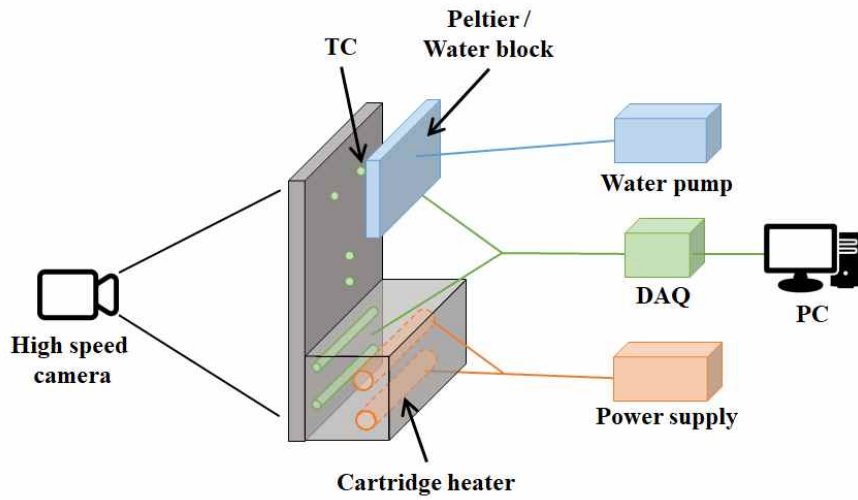


Fig. 3.1 Schematics and image of an experimental setup.

Table. 3.1 Working range and accuracy of the instruments.

Instruments	Working range	Accuracy
DC power supply (Peltier)	0-30 V (0-5 A)	±0.05%
DC power supply (heater)	0-100 V (0-5 A)	±0.1%
Catridge heater	0-100 V	±0.05%
Peltier	0-12 V (0-11.8 A)	-
Water pump	0.1 - 100 rpm	-
K-type thermocouple	Max : 260 °C	±1 °C ±0.5%

Table. 3.2 Experimental conditions and parameters.

Instruments	Conditions
DC power supply (Peltier)	6 V
DC power supply (heater)	50 - 80 W
Water pump	60 rpm (240 ml/min)
Working fluid	DI-water
Fluid filling ratio	about 55%
Total volume	about 0.563 mL

## 제 2 절 수치적 데이터 처리 및 불확실성

열 저항은 증발 영역과 응축 영역의 평균 온도의 차이를 히터의 입력 전력으로 나누어 계산할 수 있다 :

$$R_{th} = \frac{T_{e,avg} - T_{c,avg}}{Q_m} \quad (3.3.1)$$

여기서,  $T_{e,avg}$  및  $T_{c,avg}$  는 각각 증발 영역과 응축 영역의 평균 온도를 나타낸다.  $Q_{in}$ ,  $T_{e,avg}$  및  $T_{c,avg}$  는 각각 다음 방정식으로 계산된다 :

$$Q_{in} = V \times I \quad (3.3.2)$$

$$T_{e,avg} = \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (3.3.3)$$

$$T_{c,avg} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.3.4)$$

여기서,  $V$  및  $I$  는 각각 DC power supply를 통해 적용되는 전압 및 전류이다.  $T_{1-4}$ 는 Fig. 2.1 에 표시한 각 위치에서 측정된 온도 값을 나타낸다. 본 연구의 주요 목적은 표면 개질에 의한 성능 및 내구성 비교이기 때문에, 유동 패턴을 가시화하기 위하여 사용된 PHP 전면의 PC를 통해서 발생하는 열 손실은 고려하지 않았다.

$Q_{in}$  에 대한 표준 불확실성은 다음 식으로 계산된다 :

$$\frac{\Delta Q_{in}}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I}\right)^2} \quad (3.3.5)$$

여기서, DC power supply의 최대  $V$  및  $I$  는 각각 100 V , 5 A에 해당한다. 이에 따른 정확도는 각각 0.1%이다.  $Q_{in}$  의 총 불확실성은  $\pm 2\%$ 이다.

열 저항의 불확실성은 다음 식으로 계산된다 :

$$\frac{\Delta R_{th}}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{e,avg}}{T_{e,avg} - T_{c,avg}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{c,avg}}{T_{e,avg} - T_{c,avg}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_{in}}{Q}\right)^2} \quad (3.3.6)$$

여기서,  $\Delta T_{e,avg}$  및  $\Delta T_{c,avg}$  는 K-type 열전대의 정확도를 나타내며 정확도는 0.5 %이다.  $T_{e,avg}$  및  $T_{c,avg}$ 는 실험 중 증발 영역과 응축 영역 사이의 최소 평균 온도차를 나타내며, 이 온도차는 Table. 3.3과 Table 3.4에 정리되어 있다. Table. 3.3과 Table. 3.4는 각각 OS 및 MS PHP의 최소 온도차 및 열 저항의 불확실성이며, 열 저항의 불확실성은 OS 및 MS PHP 전체적으로 약 2%에 해당한다.

Table. 3.3 Minimum temperature difference and uncertainty of thermal resistance for OS PHP.

Q [W]	$T_e - T_c$ [°C]	$\frac{\Delta R_{th}}{R} \times 100$ [%]
50	50.45	2.012
55	54.47	2.011
60	59.34	2.008
65	54.15	2.011
70	58.29	2.009
75	71.68	2.006
80	78.39	2.005



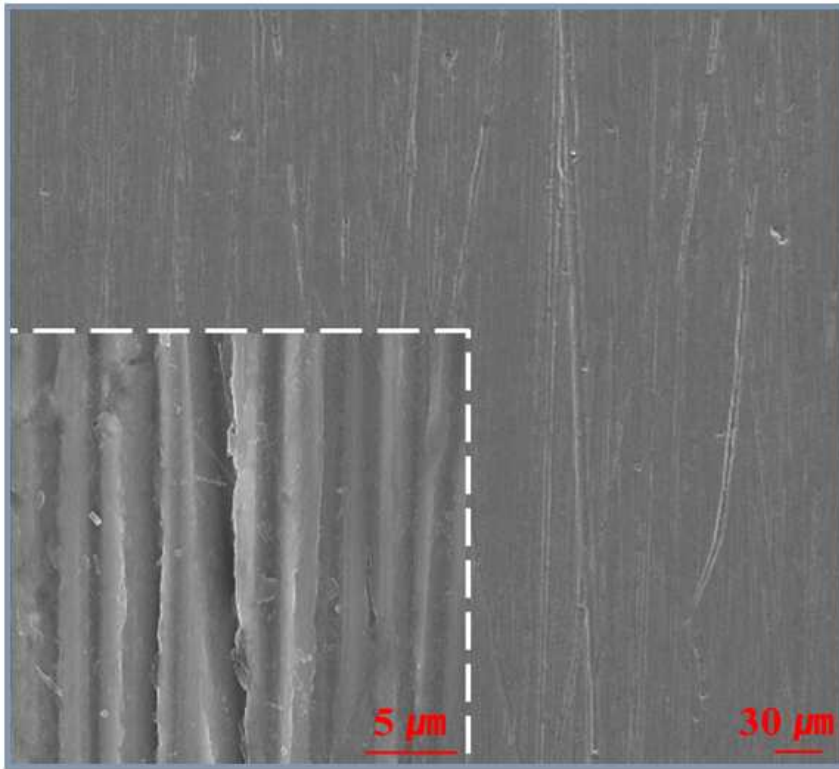
Table. 3.4 Minimum temperature difference and uncertainty of thermal resistance for MS PHP.

Q [W]	$T_e - T_c$ [°C]	$\frac{\Delta R_{th}}{R} \times 100$ [%]
50	40.71	2.018
55	45.09	2.015
60	48.09	2.013
65	50.55	2.012
70	47.02	2.014
75	44.65	2.016
80	38.74	2.021

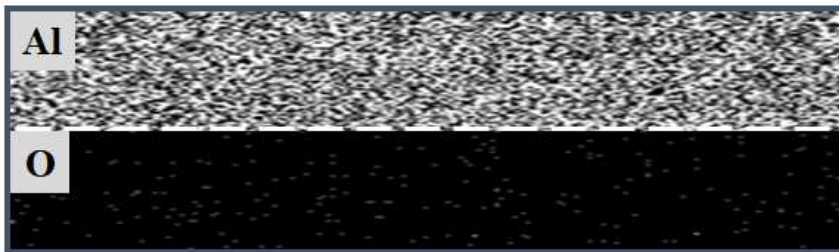
## 제 4 장 실험 결과 및 분석

### 제 1 절 PHP 표면 개질

본 연구에서 사용된 표면 개질 방법을 적용하면  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 생성을 미리 촉진해 식 1.2.1과 같은 화학 반응을 방지할 수 있다. 표면 개질을 확인하기 위하여 Figs. 4.1 와 4.2에 OS와 MS의 scanning electron microscope (SEM) image와 energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) 결과를 나타내었다. Fig. 4.1(a)와 같이 OS에서는 어떠한 구조와 결정도 관찰되지 않는다. 대조적으로, Fig. 4.2(a)와 같이 MS에서는 마이크로-나노 구조와  $\text{Al}(\text{OH})_3$  결정이 균일하게 형성되는 것을 볼 수 있다.  $\text{Al}(\text{OH})_3$  생성을 확인하기 위하여 EDS를 이용하여 Al과 oxygen (O)의 분포를 분석하고 Fig. 4.1(b)와 Fig. 4.2(b)에 나타내었다. O가 거의 검출되지 않는 OS과 달리 MS에서 전체적으로 균일하게 O 분포가 관찰된다. 이러한  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 균일한 형성은 물과 함께 PHP가 고온에서 작동하더라도 식 1.2.1과 같은 화학 반응이 일어나기 어렵고, 수소 가스 발생으로 인한 PHP 정지를 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

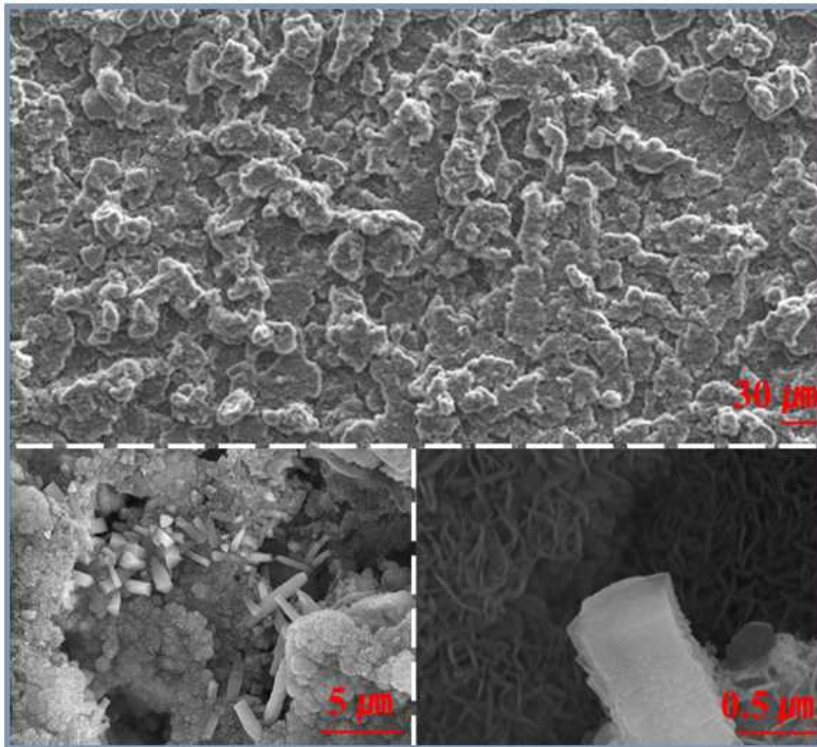


**(a) SEM image**

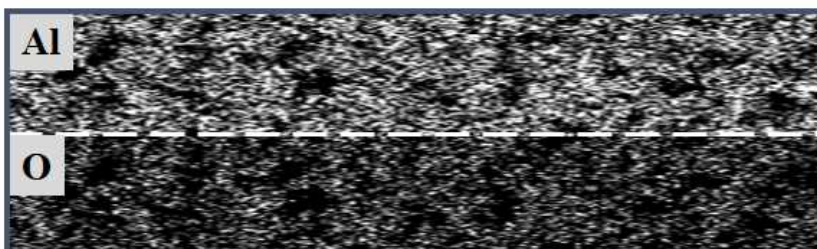


**(b) EDS**

**Fig. 4.1 (a) SEM image and (b) EDS of OS.**



(a) SEM image



(b) EDS

Fig. 4.2 (a) SEM image and (b) EDS of MS.

Figs. 4.1 및 4.2와 같이 표면에 마이크로-나노 구조가 형성되면 표면 젖음성도 변화한다. OS 및 MS의 정적 접촉 각을 drop shape analysis device (Phoenix 300 Touch, SEO)를 사용하여 측정하였으며, Fig. 4.3에 비교하였다. PHP의 채널이 너무 작아서 물방울을 떨어트리고 접촉 각을 측정할 수 없으므로 AI 평판에 동일한 표면 처리 후 접촉 각을 측정하였다. 표기된 값은 10회 측정한 평균값을 나타낸다. OS의 평균 접촉 각은  $94.64^\circ$ 로 일반적인 AI 젖음성과 일치하였다. MS의 평균 접촉 각은  $10^\circ$ 로 측정되었다.

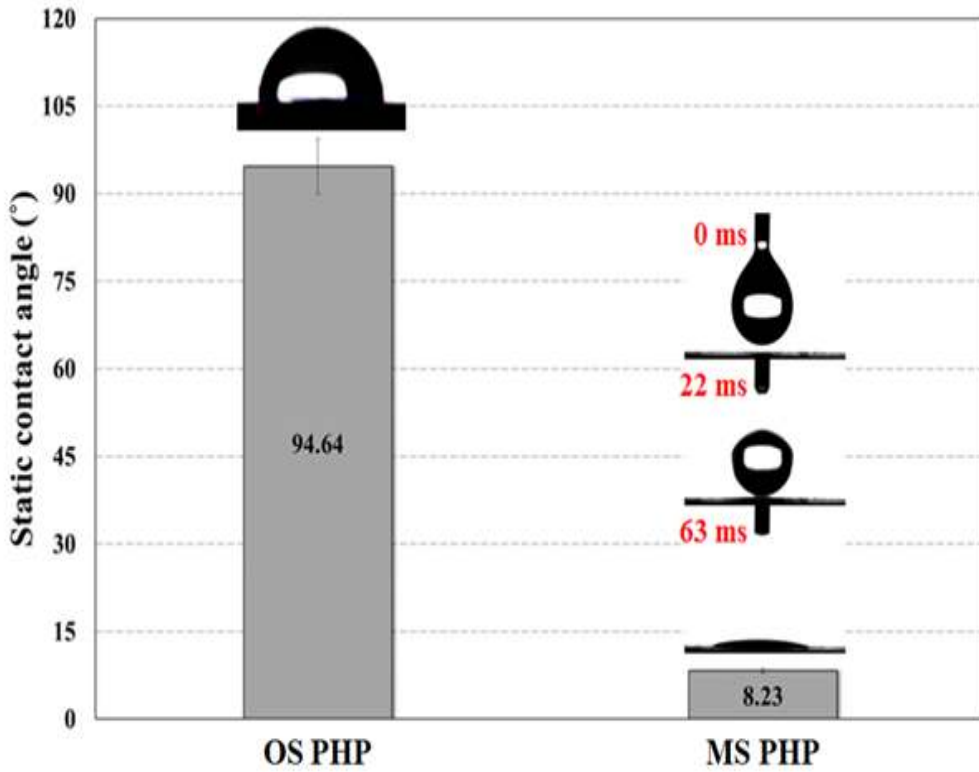
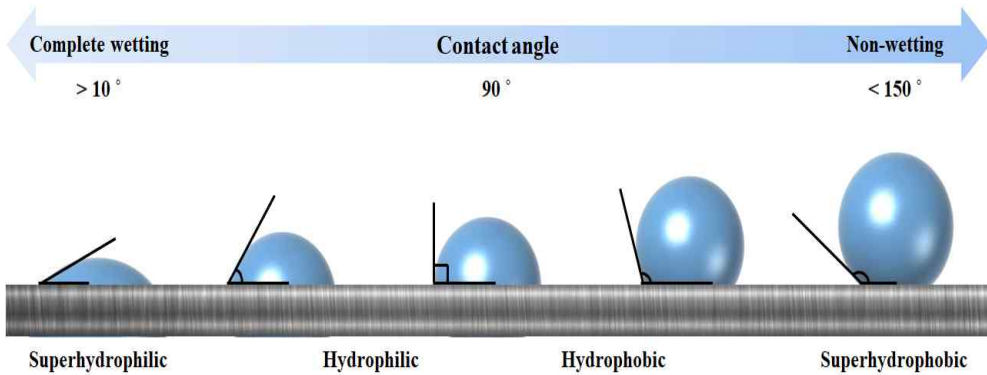


Fig. 4.3 Comparison of static contact angle on Al plate.

표면 개질에 의해 나타나는 대표적인 변화는 표면 젖음성이다. 표면 젖음성은 일반적으로 표면의 액적에 정적 접촉 각을 측정하여 확인한다. Fig. 4.4와 같이 표면에 물방울을 떨어트렸을 때, 접촉 각이  $90^\circ$  미만이면 친수성 (hydrophilic)에 해당하며, 그 이상이면 소수성 (hydrophobic)에 해당한다. 또한, 접촉 각이  $10^\circ$  미만이면 초친수성 (superhydrophilic)에 해당하며,  $150^\circ$  이상이면 초소수성 (superhydrophobic)에 해당한다.



**Fig. 4.4 Surface properties according to contact angle.**

표면의 *heterogeneous* 한 미세 구조에 의해 표면의 젖음성은 영향을 받으며 Fig. 4.5는 미세 구조에 의해 발생할 수 있는 대표적인 젖음성 상태인 Cassie-Baxter와 Wenzel state의 개략도를 보여준다. Fig. 4.5(a)와 같이 Cassie-Baxter 상태에서는 미세 구조 사이에 공기층이 형성되고 액체는 전체 표면을 적시지 않고, 표면 구조 위에 떠 있는 상태로 유지된다. 즉, 액체가 마이크로 나노 구조 사이의 빈 곳으로 침투하지 않으며, 결과적으로 고체와 증기로 구성된 복합 계면을 마주하는 상태이다. 반면에 Fig. 4.5(b)와 같이 미세 구조 내부로 액체가 침투하여 표면과 접촉하는 또 다른 상태가 존재하는데, 이를 Wenzel 상태라고 한다 [48, 49].

본 연구에서의 젖음성 변화는 Fig. 4.2에서와 같은 마이크로-나노 구조에 의해 Wenzel 상태가 유도되며 초친수성으로 변화가 나타난다.



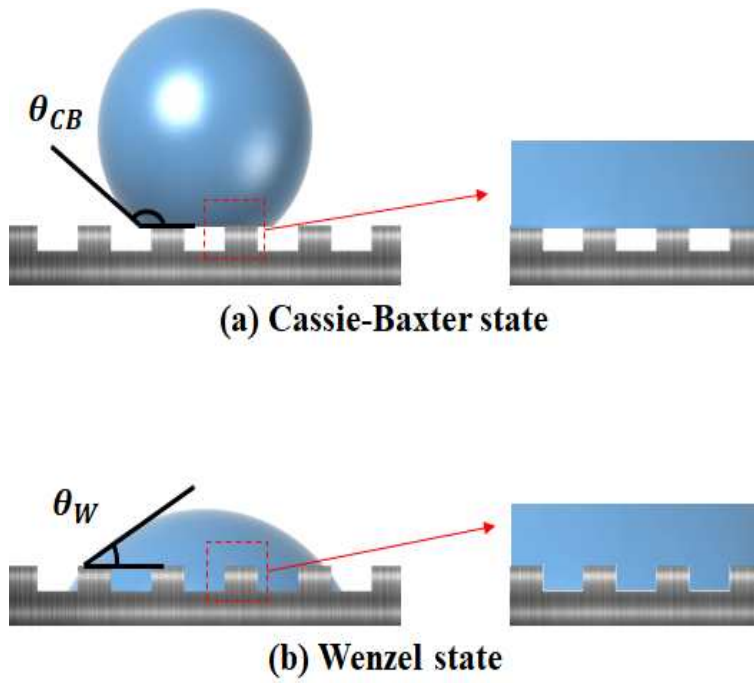


Fig. 4.5 Schematic of (a) Cassie-Baxter and (b) Wenzel state on surface having heterogeneous structures [48].

PHP 작동 중에 발생하는 산화로 인한 표면 변화를 조사하기 위해 작동 전/후 OS 및 MS PHP 채널에 물방울을 떨어뜨리고 물방울의 거동을 비교하였다. 물방울을 명확하게 구분하기 위하여 0.01 wt%의 로다민 B를 혼합한 DI-water를 사용하였다. Fig. 4.6(a)와 같이 OS PHP에서는 PHP 작동 후, 표면 부식에 의한 표면 젖음성의 변화가 뚜렷하게 관찰된다. 또한, 표면 부식에 의하여 채널의 CNC 가공 패턴이 Fig. 4.6(b)의 MS PHP에서와 같이 사라졌다. 이러한 젖음성과 표면 변화는 식 1.2.1의 화학 반응이 PHP 작동 중에 발생하였음을 나타낸다. Fig. 4.6(b)의 MS PHP 이미지는 Fig. 4.3의 접촉 각 측정에서와 동일한 젖음성 특성을 보이며, DI-water가 채널 표면에 떨어진 후 빠르게 퍼진다. PHP 작동 후에도 MS PHP에서는 표면 이미지 및 젖음성 특성에 큰 변화가 관찰되지 않았다. SEM, EDS 및 물방울 거동으로부터, 본 연구에서 적용한  $Al(OH)_3$ 의 형성을 통한 표면 개질은 Al과 물의 화학 반응을 효과적으로 방지하고 PHP의 표면을 초친수성으로 변화시키는 것을 확인하였다.

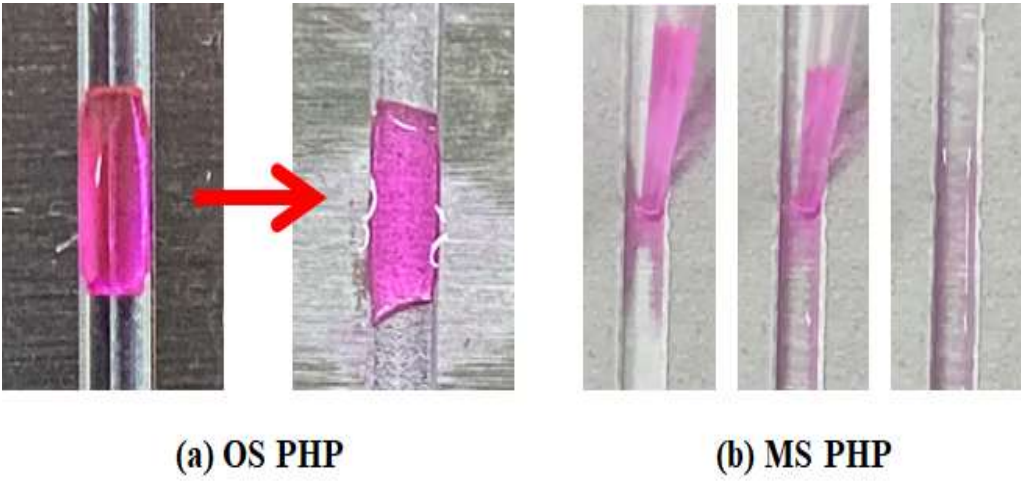


Fig. 4.6 Comparison of droplet behaviors on PHP channels.

## 제 2 절 유동 가시화

### 1. 이상 유동

이상 유동 (two-phase flow)란 기체와 액체가 공존하여 흐르는 유동을 뜻한다. 열전달은 이러한 유동 특성에 큰 영향을 받으며, 이상 유동에 대한 이해는 열전달 특성을 이해하는 데 도움을 줄 수 있다.

본 실험과 같이 대부분의 PHP는 중력 방향인 수직 방향으로 배열되고 아래에서 가열하는 조건에서 작동 시 효율이 가장 높은 것으로 알려져 있다. Fig. 4.7은 대표적인 수직 2상 유동의 패턴을 나타낸다. 유동 패턴은 크게 bubbly, slug/plug, churn, 그리고 annular로 구분된다.

Fig. 4.7(a)와 같이 bubbly 유동은 액체 내에 기체로 이루어진 작은 기포들이 분산되어 있는 형태이다. 기포의 크기는 관 직경보다 작으므로, 기포의 거동은 채널 벽면의 직접적인 영향은 받지 않는다. 하지만, 채널 전체에 채워진 액체 유동이 기포 거동에 영향을 미치기 때문에 채널 벽면의 영향을 간접적으로 받게 된다. 기포의 양이 많아지면, 기포 간의 충돌 및 성장에 의해 더 큰 기포가 형성된다.

Fig. 4.7(b)와 같이 slug/plug 유동은 채널 직경과 비슷한 직경을 가지는 Taylor bubble 이 채널 가운데로 흐르고, 이 기포와 채널 벽면 사이에 액체는 film 형태로 존재한다. 대부분은 Taylor bubble을 증기 플러그라고 부르며, 이 기포 사이의 액체를 액체 슬러그라고 부른다.

Fig. 4.7(c)와 같이 churn 유동은 slug/plug 유동과 비슷하다. 하지만, 기포의 형태가 불규칙하게 변형되어 많이 생성되며, 유동 전체가 상하로 진동하며 흐른다.

Fig. 4.7(d)와 같이 annular 유동은 채널 벽을 따라서 액체가 film 형태로 흐르며, 채널 중심 영역은 기체가 흐르는 유동을 뜻한다. 이 유동은 기체의 흐름이 지배적일 때 나타나며, 액막으로부터 작은 액적이 떨어져 나와 기체 유동에 유입될 수 있다.

PHP 와 같이 열전달이 수반된 증발 유동 또는 응축 유동의 경우, 채널의

벽으로부터 대류 열전달에 의해 액체의 온도가 증가하여 비등점에 도달하면, 채널 벽에서 기포의 생성이 시작된다. Bubbly 유동이 생성된 후, 인접한 기포들이 합쳐져 큰 기포로 성장하면, slug/plug 유동이 생성된다. 점차 기체량의 증가로 유동이 빨라지면, churn 유동을 지나 annular 유동으로 성장할 수 있다.

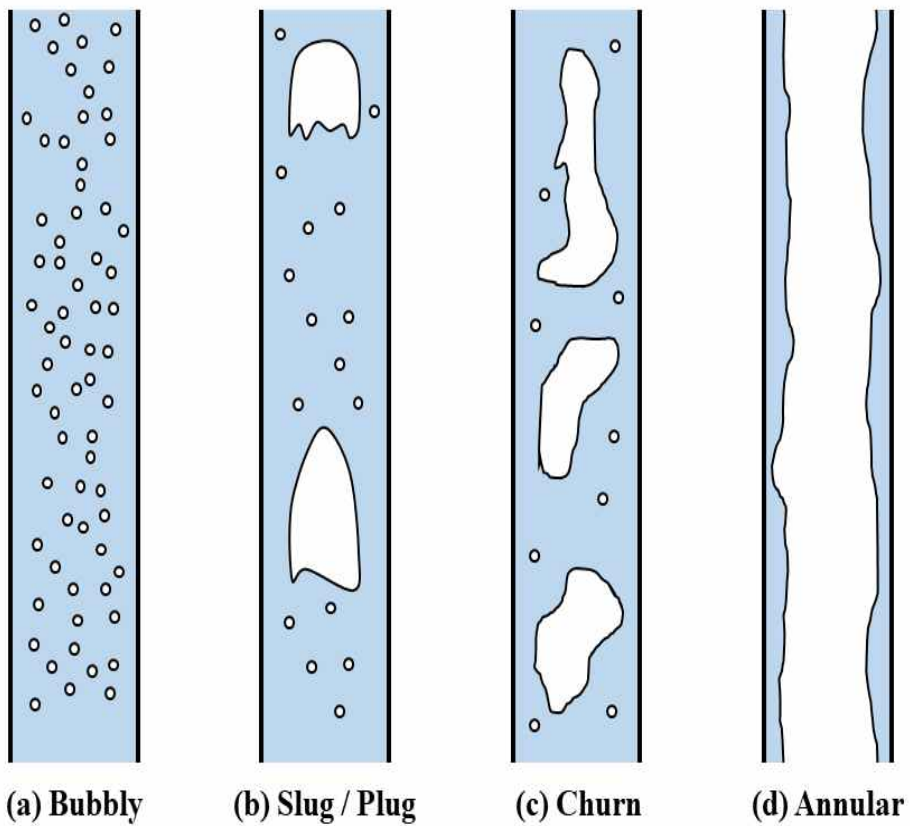


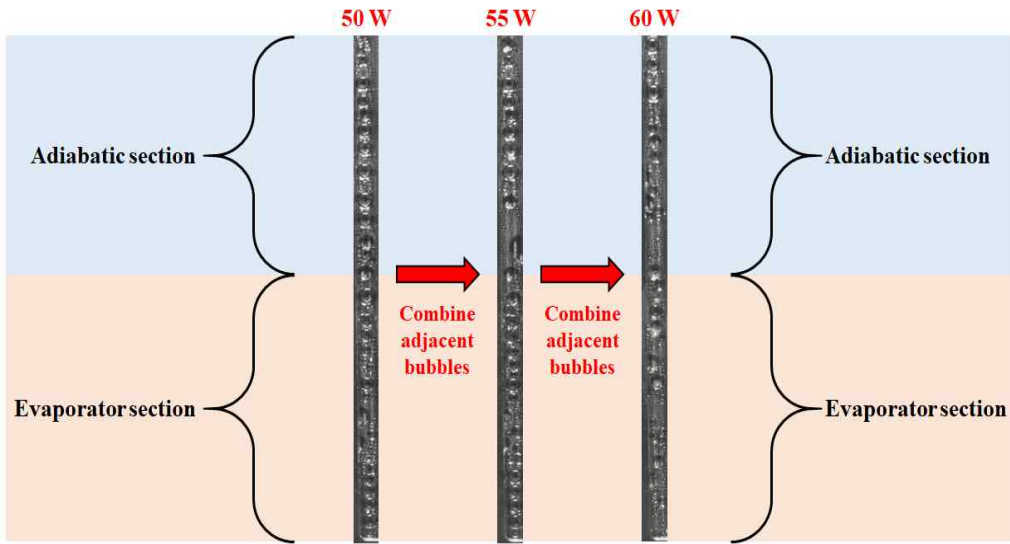
Fig. 4.7 Typical two-phase flow patterns in vertical flow.

## 2. OS PHP의 유동 패턴 분석

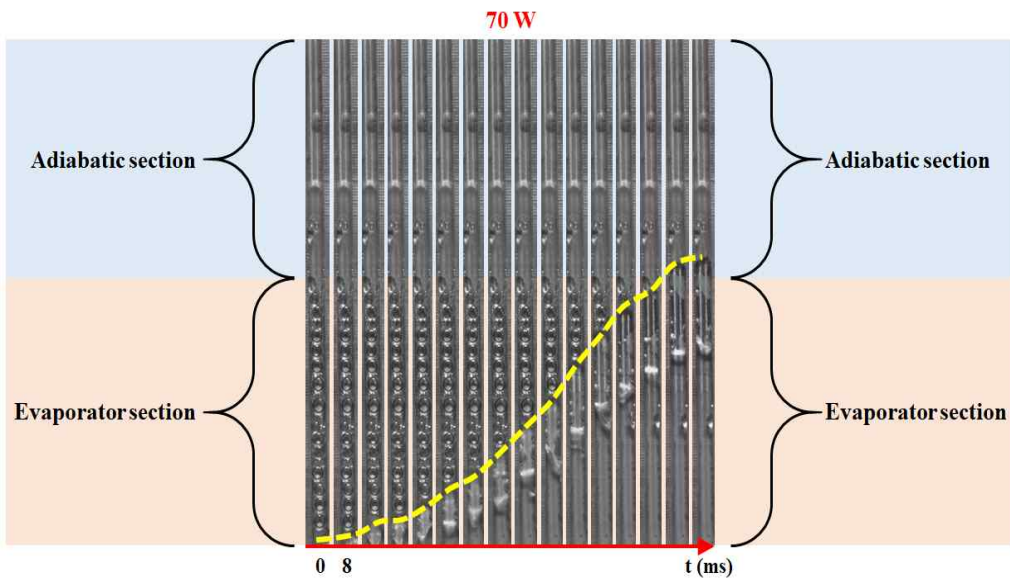
열 성능은 내부 유동에 크게 영향을 받으며, 유동에 의해 표면 온도의 변화가 발생한다. 고속 카메라를 이용하여 PHP 내부 유동을 가시화하고, 유동이 표면 개질에 의해 어떻게 변화하는지 확인하였다. 여기서, 본 PHP는 4개의 채널로 구성되어 있으며, 그 중에 유동이 가장 활발한 채널을 분석하였다.

Fig. 4.8는 OS PHP 0 day의  $Q_{in}$  에 따른 증발 영역과 단열 영역의 유동 영상을 나타낸다. Fig. 4.8(a)와 같이 OS PHP에서는 유동 발생 시작 전인 50 W에서 채널 전체에 기포가 발생하고 55 W부터 60 W까지 근접한 기포들이 결합하여 큰 기포로 성장한다. 이러한 기포 생성 및 성장에 의해 다수의 액체 슬러그 및 증기 플러그가 발생하고 슬러그의 진동이 시작되면 채널 전체에서 내부 유동의 맥동이 시작된다.

Fig. 4.8(b)는 한 채널에서의 증기 플러그의 시간적 변화를 보여준다. Fig. 4.8(b)의 노란색 점선은 증기 플러그 계면의 위치를 나타내며, 다음 유동 영상과 같이 70 W에서 증발 영역 아랫부분의 직선 채널이 연결되는 U자형 구간이나 채널의 아래 모서리 부분에서 증기 플러그가 생성되고, 작동 시간이 증가하면 증기 플러그는 증발 영역에서 단열 영역으로 상승한다. 이러한 플러그가 상승하면서 채널 전체에 분포되어있는 기포가 같이 이동한다.



(a) Initial flow motion



(b) Start up pulsations

Fig. 4.8 Typical internal flows in OS PHP at conditions of (a) initial flow motion and (b) start up pulsations.

Fig. 4.6에서와 같이 작동 시간이 증가할수록 OS PHP 채널 내부 AI은 산화되어 표면 특성이 변화하고 이로 인하여 내부 유동의 변화가 발생한다. Fig. 4.9는 표면의 구멍이나 미소 공동 (cavity)의 계면에 대한 개략도이다. Figs. 4.9(a and b)와 같이 고체 표면과 기포와 액체의 경계면 사이에서 접촉 각 ( $\theta$ )에 따라 임계 기포 핵의 생성이 달라진다.  $\theta$ 가  $0^\circ$ 에서는 고체 표면에 액체가 완전히 젖어있어 액체를 증발시키기 위해서는 과열도 (superheat)가 필요하고,  $\theta$ 가  $180^\circ$ 에서는 증기 막에 의해 액체가 고체 표면과 완전히 분리되므로 액체의 과열 없이도 액체 표면에서 증발 현상이 발생할 수 있다. 또한, Figs. 4.9(c and d)와 같이 공동협각 (included angle of cavity,  $\beta$ )이 감소할수록, 식 4.1.1과 같이 유효 접촉 각 ( $\theta'$ )은 증가하여 과열이 없거나 낮은 과열 조건에서도 액체의 증발을 촉진할 수 있다. 여기서, Fig. 4.9(a)는 공동 또는 흠이 없는 평평한 면을 나타낸다. Fig. 4.9(b)는 일반적인 공동을 나타내며, 이때의  $\theta$ 는  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$  사이의 값을 갖고, 임계 기포 핵의 생성을 위한 자유에너지 ( $f$ )는 1에서 0.5 사이의 값을 갖는다. 여기서,  $f$ 는 식 4.1.2와 같이 표현된다. Fig. 4.9(c)는  $\theta'$ 이  $180^\circ$ 이며,  $f$ 는 0일 때의 공동이다. Fig. 4.9(d)는  $f < 0$ 일 때의 공동을 나타낸다.

$$\theta' = \theta + \frac{(180 - \beta)}{2} \quad (4.1.1)$$

$$f = \frac{2 + 3\cos\theta - \cos^3\theta}{4} \quad (4.1.2)$$

Fig. 4.10과 같이 공동 내의 생성된 버블은 증기압이 증가할수록 지속적으로 성장하고 Fig. 4.10에서 6번과 같이 커지면 기포는 과열 상태의 액체 내에서 자발적으로 성장할 수 있다. 이와 같이 표면의 구멍이나 공동의 크기가 그 지점에서 버블이 생성될 수 있는 과열도를 결정하며, 버블 생성 및 성장 그리고 이탈 빈도수를 결정한다고 할 수 있다 [50, 51]. 본 연구에서 적용한 표면 개질 방법과 같은 AI 산화에 의해 생성된 미세 구조는 기포 핵 생성이 가능한 위치의 수를 증가시켜 기포 생성을 촉진할 수 있다.



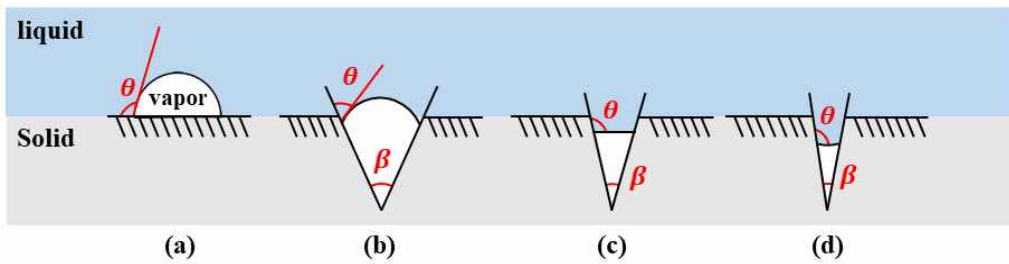


Fig. 4.9 Effect of micro-cavity on the boiling nucleation.

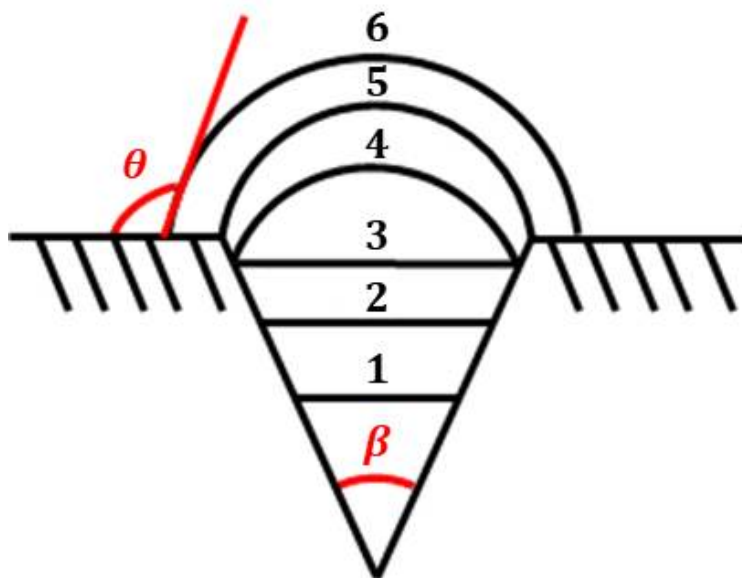
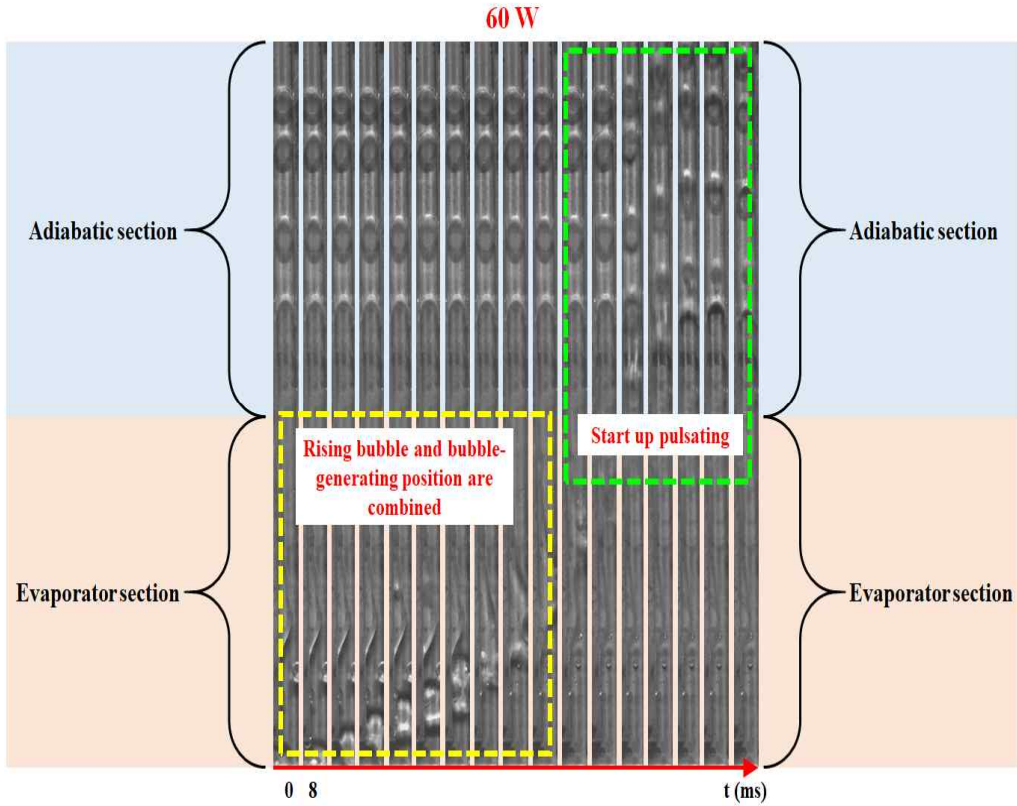


Fig. 4.10 Bubble growth at a cavity.

Fig. 4.11은 OS PHP 1 day의 60 W에서 채널의 산화로 인해 기포가 생성이 촉진되는 영역의 시간적 변화에 대한 유동 가시화 결과이다. 여기서, Fig. 4.8(b)와 동일한 채널을 나타내며, Fig. 4.8(b)와 다르게 증기 플러그 생성되는 위치가 추가되었음을 확인할 수 있다. 이는 채널 산화에 의해 생성된 공동에서 기포 생성이 촉진됨을 보여준다. 왼쪽 점선 노란색 점선 박스를 보면, 근접한 채널로부터 U자형 구간을 통해 넘어온 증기 플러그가 상승하면서, 산화로 인해 생성된 공동에서 성장하고 있는 증기 플러그와 결합한다. 이러한 결합에 의해 성장한 증기 플러그의 높은 압력에 의해 오른쪽 점선 연두색 점선 박스와 같이 빠르게 단일 영역으로 상승하며 단일 영역에 존재하는 다른 증기 플러그들도 동시에 진동하게 된다. 이후, Fig. 4.12에서 연두색 점선 박스와 같이 1 day의 65 W에서 약한 맥동 유동이 안정적으로 일정하게 유지된다. 여기서, 증기 플러그를 위에서부터 1번부터 4번으로 표시하였다. 또한, Fig. 4.12에서 노란색 점선 박스와 같이 증발 영역에 존재하는 AI 산화에 의한 공동에서 증기 플러그가 일정하게 생성되는 것을 확인할 수 있다.  $Q_m$  가 증가할수록, 진동이 더 강해지고 증발 영역의 유동 패턴은 annular 유동으로 변화 후 dry-out 상태에 도달한다.



**Fig. 4.11 Accelerated pulsating caused by Al corrosion after operations in OS PHP ( $Q_{in} = 60 \text{ W}$ ).**

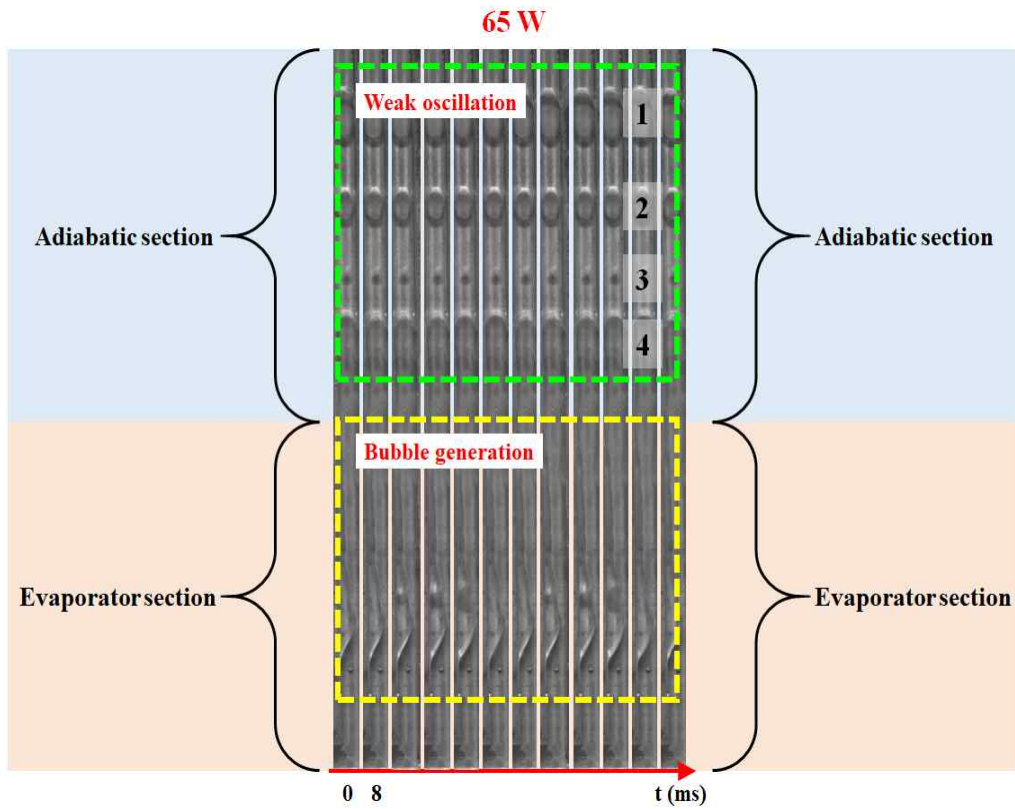


Fig. 4.12 Weak pulsation and bubble generation caused by Al corrosion after operations OS PHP ( $Q_{in} = 65 \text{ W}$ ).

### 3. MS PHP의 유동 패턴 분석

Fig. 4.13는 MS PHP의 최초 동작 시 0 day의 50 W 조건에서 버블이 생성되는 위치를 보여준다. 여기서, 왼쪽 빨간 점선 박스는 PHP의 첫 번째 채널의 유동 영상이며, 오른쪽 빨간 점선 박스는 PHP의 4 번째 채널의 유동 영상을 시간적 변화로 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서 적용한 표면 개질 방법에 의해 생성된 마이크로 나노 구조는 기포 핵 생성이 가능한 위치의 수를 증가시켜 기포 생성을 촉진할 수 있다. OS PHP에서는 증발 영역의 하단 및 U자형 구간에서만 버블이 생긴다. 반면에 MS PHP에서는 표면 개질에 의해 생성된 마이크로 나노 구조로 인해 버블이 생성될 수 있는 cavity의 수가 증가하여 기포가 증발 영역 전체에서 생성 및 성장한다. 성장한 기포는 근접한 기포와 결합하여 점차 슬러그 또는 플러그로 성장하여 맥동 유동을 유발한다. MS PHP 표면의 친수 특성은 기포가 이탈되었을 때 그 위치로 액체를 공급하여 기포 생성 주기를 줄여주어 증발 영역의 열전달을 높여준다. 따라서 본 연구의 마이크로 나노 구조를 가지는 표면 개질 방법은 수소 가스를 생성하지 않는다는 장점뿐만 아니라 기포 생성을 촉진하여 증발 영역의 열을 응축 영역으로 빠르게 전달할 수 있다는 장점이 있다.

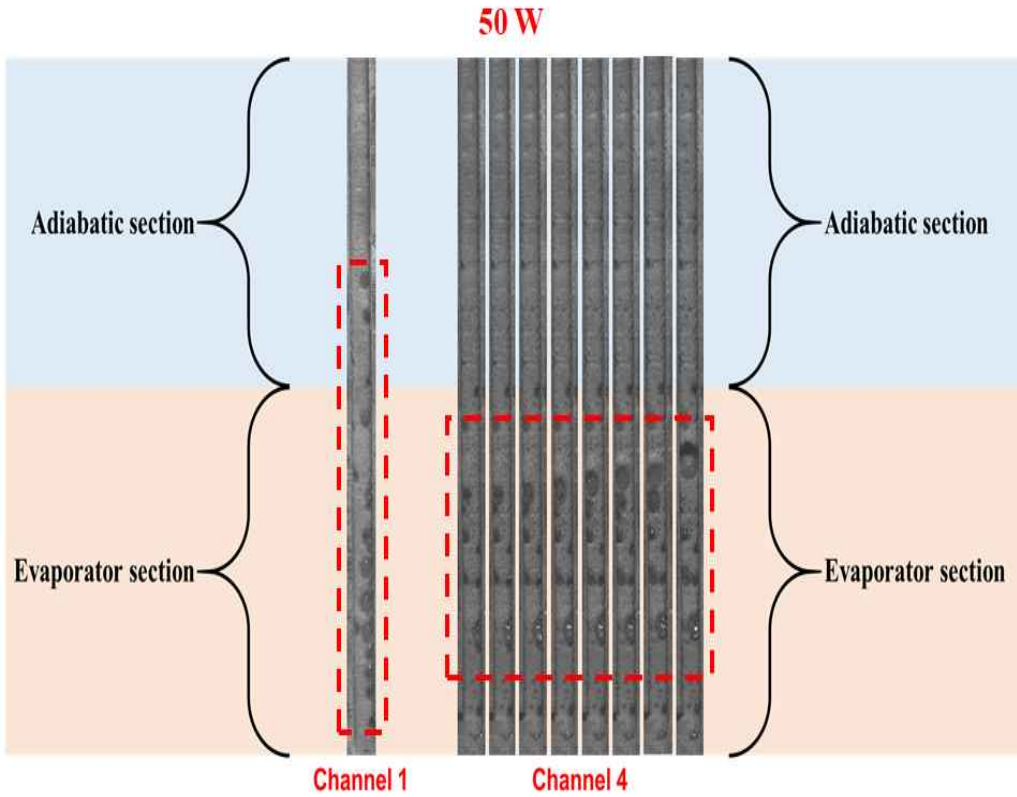
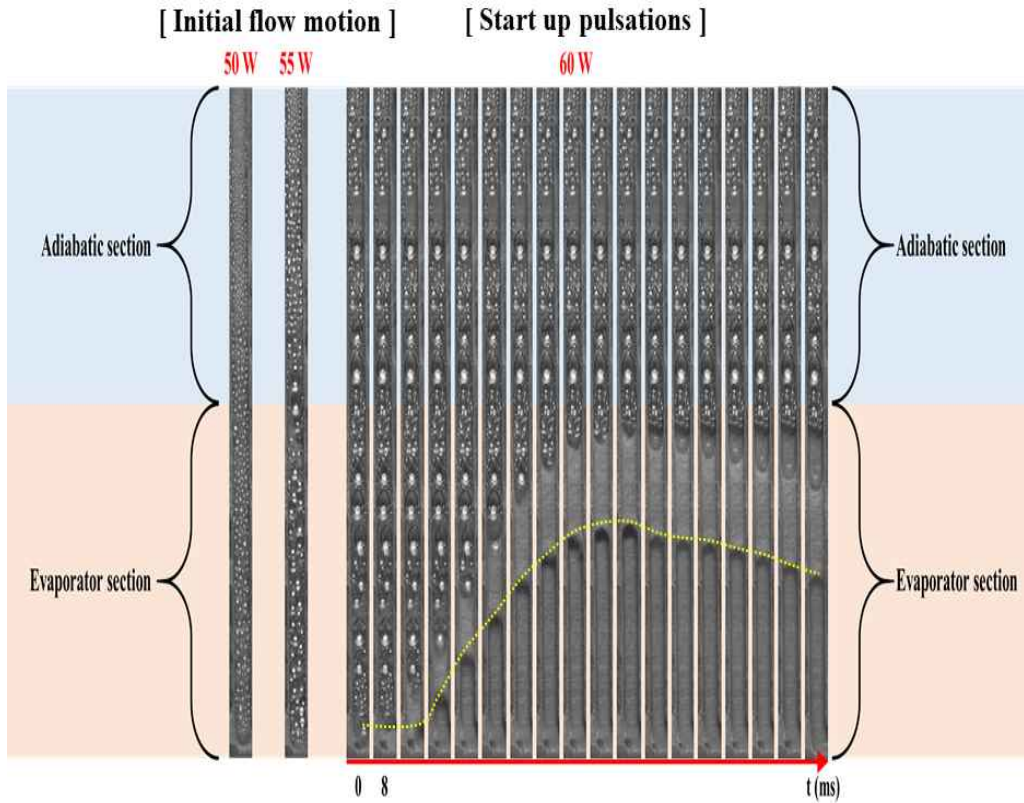


Fig. 4.13 Initial bubble generations in MS PHP under  $Q_{in} = 50 \text{ W}$ .

Fig. 4.14는 MS PHP의 최초 동작 시 0 day 낮은  $Q_{in}$  조건에서의 유동 가시화를 보여준다. 50 W에서 채널 전체에 기포가 발생하고 55 W에서는 근접한 기포들이 결합하여 큰 기포로 성장한다. OS PHP에서 70 W 조건에서 관찰된 증발 영역 하단 및 U자형 구간에서 증기 플러그의 생성이 60 W 조건에서 발생한다. 여기서, Fig. 4.14 노란색 점선은 증기 플러그의 시간적 변화를 보여주며, 표시된 것처럼 이 증기 플러그가 상승하면서 채널 전체에 분포되어있는 기포를 포함하여 맥동이 시작된다.

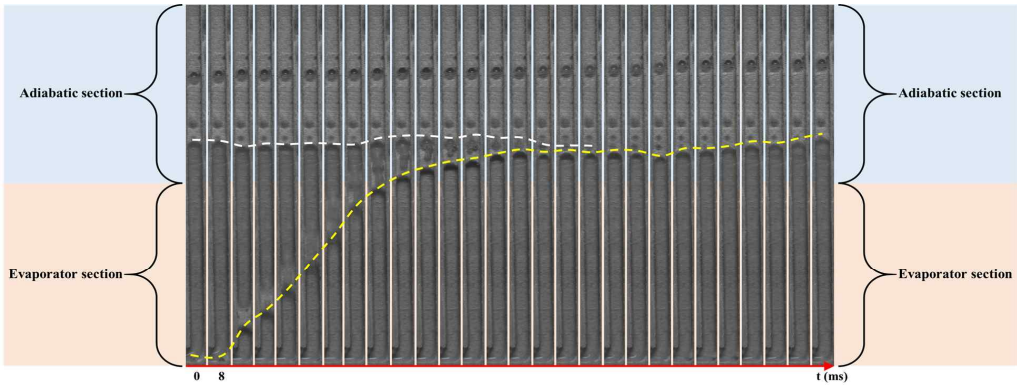


**Fig. 4.14 Typical internal flows in MS PHP at conditions of (a) initial flow motion and (b) start up pulsations.**

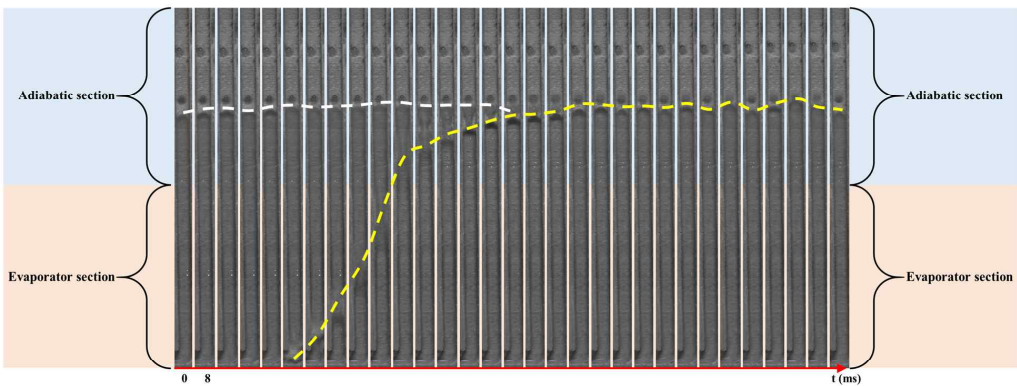


Fig. 4.15는 1 day  $Q_{in}$  에 따른 맥동을 비교하였다. Fig. 4.12의 작동 후 AI 산화가 발생한 OS PHP에서와 유사한 내부 유동을 볼 수 있다. 흰색 점선으로 표시된 바와 같이 맥동 유동이 안정적으로 일정하게 유지되며, 노란색 점선으로 표시된 것처럼 증발 영역의 공동에서 증기 플러그가 반복적으로 생성 및 성장하여 이전 맥동하고 있던 증기 플러그와 합쳐져 맥동하는 것을 확인할 수 있다. 맥동은 끊임없이 지속적으로 증발 영역과 단열 영역 사이에서 발생한다. Fig. 4.16은 Fig. 4.12의 2번 증기 플러그와 Fig. 4.15의 노란색 점선으로 표시한 증기 플러그의 맥동하는 계면의 속도를 나타낸 그래프이다. 여기서, 변위는 8 ms 단위로 편집한 유동 영상에서 이전 증기 플러그와의 위치를 계산하여 나타내었으며, Fig. 4.16과 같이 계면의 속도가 OS PHP 보다 MS PHP에서 맥동의 속도가 크게 나타난다. 또한, Figs. 4.15(a-c) 에서 나타낸 바와 같이  $Q_{in}$  가 증가함에 따라 맥동의 위치가 높아지며  $Q_{in}$  가 75 W에서는 거의 응축 영역까지 맥동한다.  $Q_{in}$  의 증가에 의해 맥동의 위치 및 진동 크기가 변하여도 증발 영역에서는 슬러그 또는 플러그가 지속적으로 생성된다.

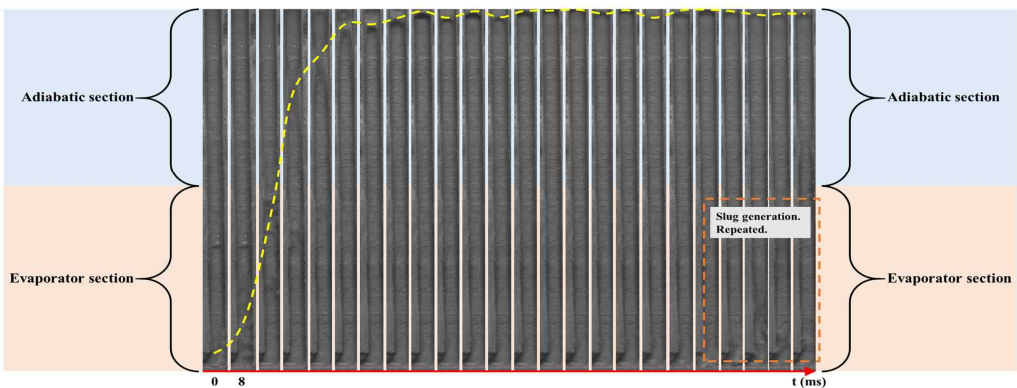
OS PHP에서와 달리 MS PHP에서는 맥동 및 증기 플러그 생성이 끊임없이 지속된다. OS PHP에서는 증기 플러그 생성되어 맥동이 시작된 후 짧은 시간에 증발 영역부터 dry-out 현상이 발생하여 운전을 멈추게 된다. 하지만, MS PHP의 경우에는 Wenzel state와 같이 기포가 이탈된 공동으로 물이 지속적으로 공급되어 dry-out을 방지하고 증기 플러그는 계속해서 생성될 수 있다.



(a) 65 W

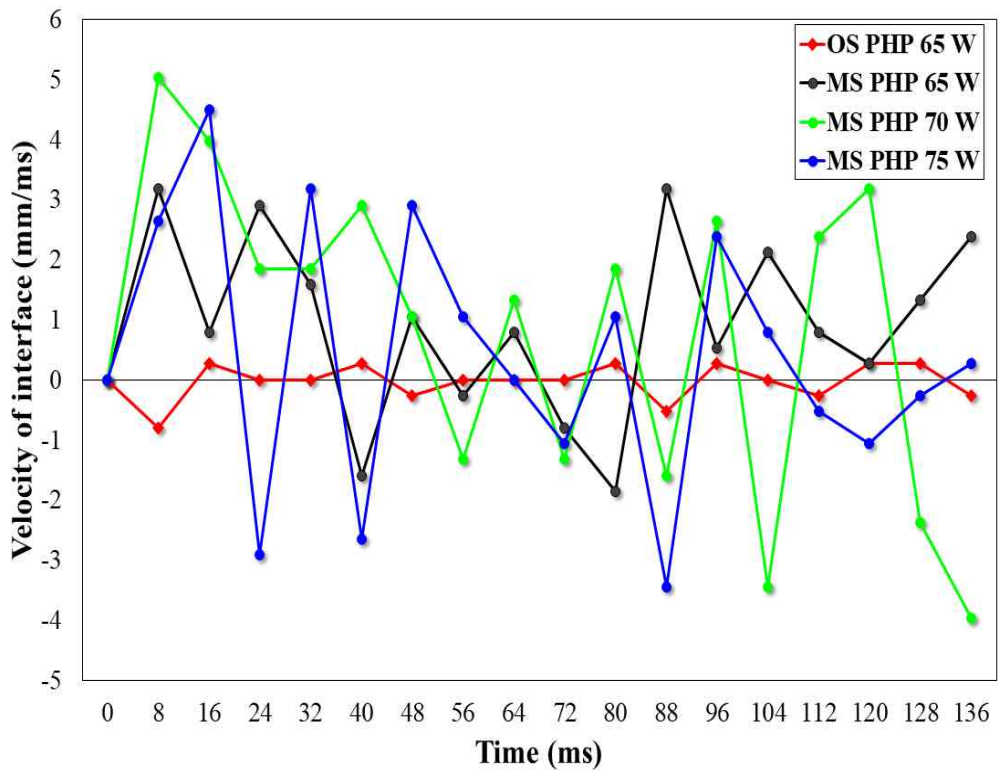


(b) 70 W



(c) 75 W

**Fig. 4.15 Comparison of pulsations of MS PHP under (a)  $Q_{in} = 65 \text{ W}$  (b)  $Q_{in} = 70$   
 (c)  $Q_{in} = 75 \text{ W}$ .**



**Fig. 4.16** Temporal variations of meniscus displacement in OS and MS PHP.

#### 4. OS 및 MS PHP의 dry-out 비교

Fig. 4.17은 OS 및 MS PHP의 dry-out 현상이 발생할 때의 내부 유동을 비교하였다. Fig. 4.17(a)와 같이 OS PHP의 경우에는 작동 시간 및  $Q_{in}$  가 증가할수록 증발 영역의 아랫부분에서부터 점진적으로 윗부분까지 dry-out 영역이 확대되어 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.17(b)와 같이 시간적 변화를 보았을 때, dry-out 영역이 유지되어 열 성능을 감소시키는 OS PHP와 달리 MS PHP에서는 작동 시간 증가에 따라 dry-out 현상이 일시적으로 발생하더라도 표면의 친수 특성으로 인해 건조한 표면으로 물을 공급해주며, 윗부분의 버블들이 결합 및 성장을 하여 내부 흐름이 재생된다.

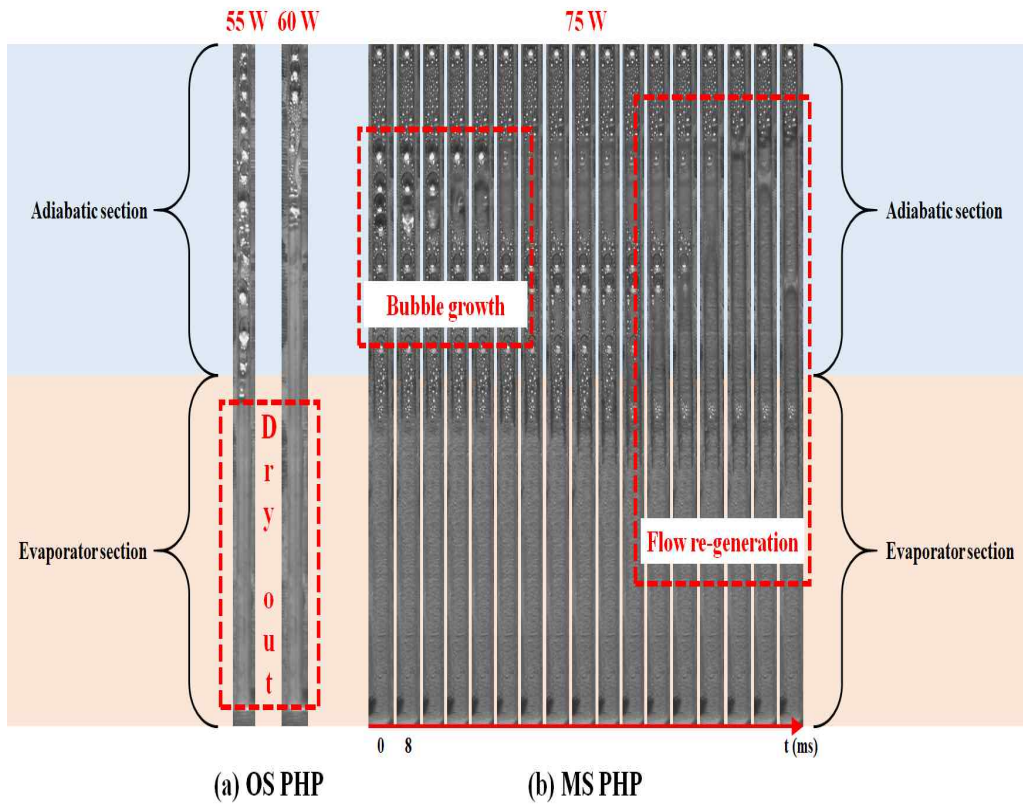
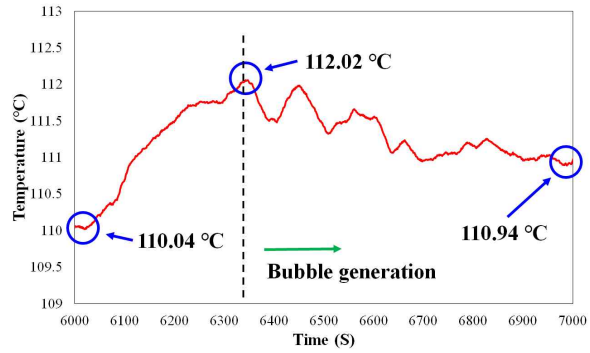


Fig. 4.17 Comparison of internal flows of OS and MS PHPs at dry-out condition.

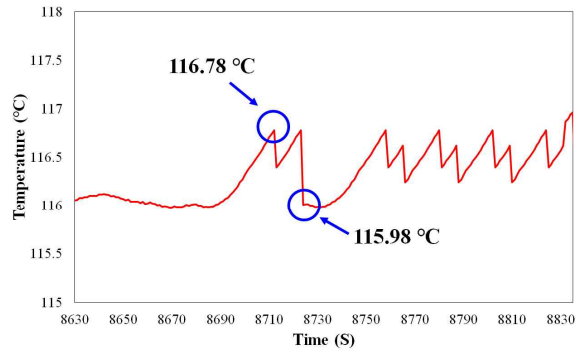
## 제 3 절 PHP 온도 및 열 성능

### 1. 온도 변화

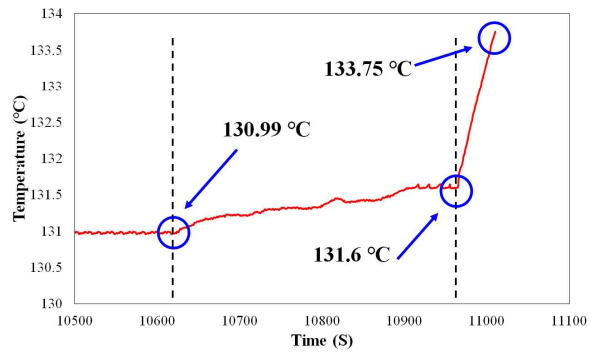
Fig. 4.18에 OS PHP에 대한 다양한 작동 모드 동안의  $T_{e,avg}$  에 대한 내부 유동의 영향을 보여주기 위해 0 day의 시간에 따른  $T_{e,avg}$  그래프를 나타내었다. Fig. 4.18(a)와 같이 작동 시작 후 맥동이 생성되기 직전까지는  $T_{e,avg}$  가  $110.04^{\circ}\text{C}$  부터  $112.02^{\circ}\text{C}$  까지, 불안정하게 증가하며, 상변화가 일어나면서 버블이 생성되어  $T_{e,avg}$  는 불규칙하게 진동하면서  $110.94^{\circ}\text{C}$  까지, 감소한다. 그 후,  $Q_{in}$  를 높이면 Fig. 4.18(b)와 같이  $T_{e,avg}$  가  $115.98^{\circ}\text{C}$  와  $116.78^{\circ}\text{C}$  사이에서  $0.8^{\circ}\text{C}$  의 온도차를 가지며 규칙적으로 진동한다. 이러한 온도 변화는 증발 영역에서의 규칙적인 기포 발생 및 맥동 유동을 나타낸다. 즉,  $T_{e,avg}$  의 온도 그래프에서 나타나는 진동 주기가 채널 내에서 버블들의 진동이 빠르고 느림을 의미하고, 진동 주기가 짧을수록 맥동이 빠르게 발생한다.  $Q_{in}$  가 증가하여 증발 영역에 상변화에 의한 열을 흡수/전달하는 액체의 공급이 원활하지 않는 조건이 되면, Fig. 4.11(c)와 같이 균일 맥동 조건에서 보이던 온도 변화가  $1^{\circ}\text{C}$  미만의 온도 변화가 사라지고  $T_{e,avg}$  가 급격히 증가하며, PHP 내부는 dry-out 상태에 도달하게 된다.



**(a) Initial flow motion (60 W)**



**(b) Start up pulsations (70 W)**



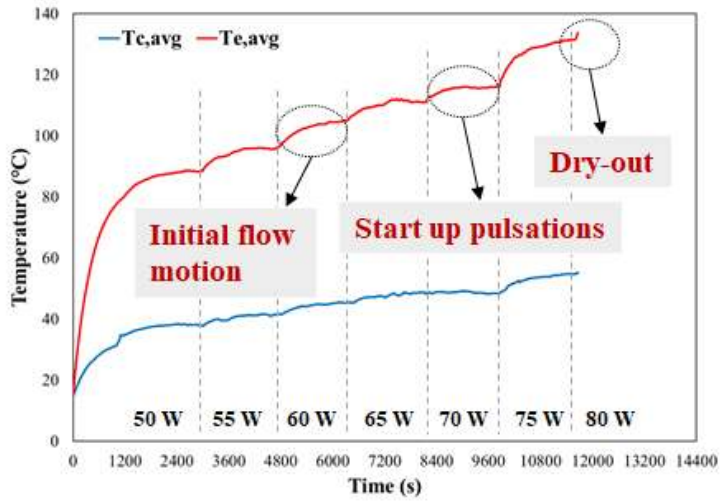
**(c) Dry-out (80 W)**

**Fig. 4.18 Variations of operating temperatures for OS PHP at 0 day during (a) Initial flow motion, (b) start up pulsations and (c) dry-out.**

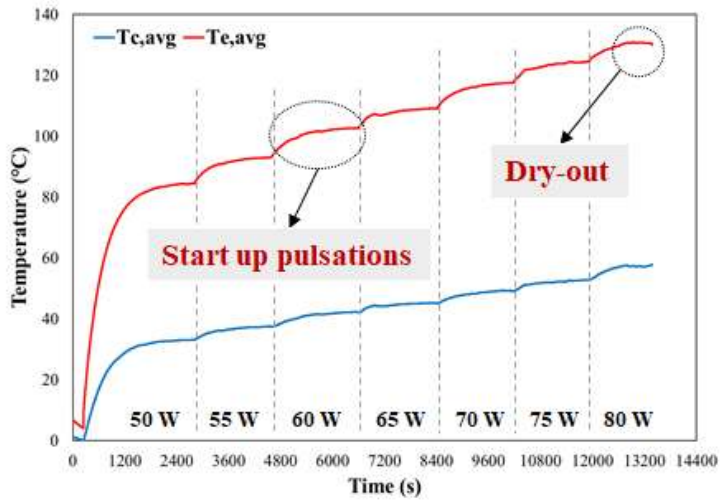
Figs. 4.19와 4.20은 OS PHP의 시간에 따른  $T_{e,avg}$  과  $T_{c,avg}$  의 온도 그래프이다. 공통으로  $Q_{in}$  가 증가함에 따라  $T_{e,avg}$  및  $T_{c,avg}$  의 온도는 증가한다. Fig. 4.19(a)는 초기 동작 시 온도 변화를 나타내며 60 W에서 채널 전체에 기포가 발생하고 70 W에서 다수의 액체 슬러그 및 증기 플러그를 갖는 슬러그 흐름의 맥동이 시작된다. 70 W이상의  $Q_{in}$  에서는  $Q_{in}$  가 증가할수록 진동이 더 강해지고 증발 영역은 환상 (annular) 흐름 후 80 W에서 dry-out 상태에 도달하여  $T_{c,avg}$  는 약 133°C 까지 급격히 상승한다. Dry-out은 증발 영역에서 열을 제거해줄 수 있는 액체가 존재하지 않아 표면의 온도를 상승을 유발하기 때문에  $T_{c,avg}$  의 급격한 상승으로부터 dry-out이 발생하였음을 알 수 있다. 실험 장치의 고장을 방지하기 위해 dry-out 현상이 발생한 80 W 조건에서 실험을 중단하였다. Fig. 4.19(b)에서와 같이 1 day에서는 초기 작동과 비교하여 낮은 60 W  $Q_{in}$  에서 슬러그 흐름이 시작된다. 초기 작동 시 PHP 채널 내에 얇은 산화피막 형성으로 인해 일부 표면에 미세 구조가 형성되고 젖음성이 친수성으로 변화되어 물의 증발을 촉진하고, 상대적으로 낮은  $Q_{in}$  에서 유동 발생을 유발하였다.

작동 시간이 증가할수록 식 1.2.1과 같은 화학 반응으로 생성되는 비응축성 수소 가스의 양이 증가한다. 많은 양의 수소 가스가 증발 영역에서 압축되어 내부 유동의 흐름을 방해한다. 따라서, 증발 영역이 건조해지고 단열 영역과 응축 영역에서 유동이 기포가 정체되는 현상이 관찰된다. 이에 Fig. 4.20(a)에서와 같이 5 day 실험에서는 응축 및 단열 영역에 정체되어있는 액체에서 상변화가 일어난다. Dry-out 영역이 증발 영역의 아랫부분에서부터 점진적으로 윗부분까지 확대되어 최대  $Q_{in}$  가 65 W로 급격히 감소한다. Fig. 4.20(b)에서와 같이 7 day의 경우에는 OS 채널 내부의 액체와 증기 배열이 유지되기 때문에 5 day의 유동 패턴과 유사한 내부 유동이 관찰되지만, 열 성능의 경우에는 최대  $Q_{in}$  가 60 W로 감소한다. 즉, OS PHP의 경우에는 작동 시간이 증가할수록 운전 가능한  $Q_{in}$  범위가 줄어들며, dry-out 현상이 낮은  $Q_{in}$  에서도 발생하게 된다.



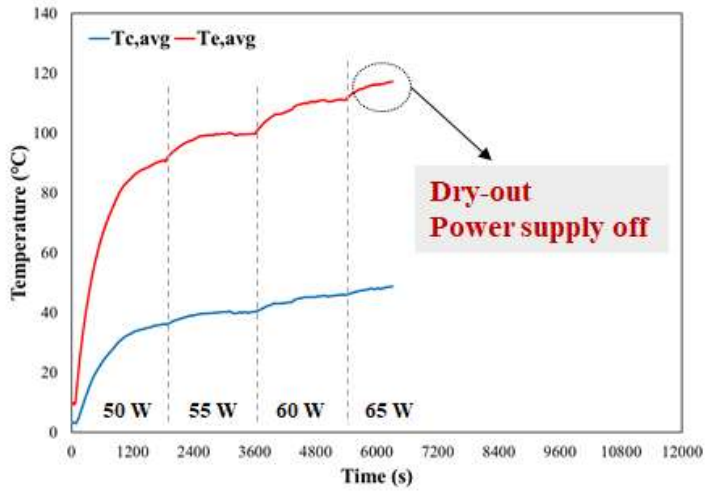


(a) 0 day

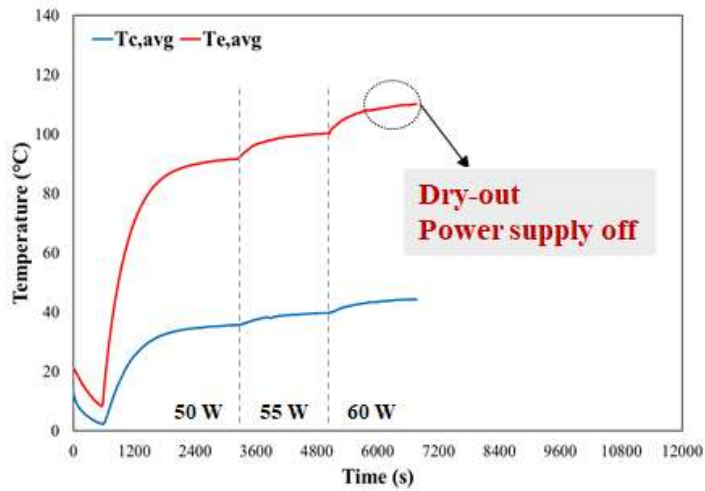


(b) 1 day

Fig. 4.19 Temperature variations under various  $Q_{in}$  of OS PHP after (a) 0 day and (b) 1 day.



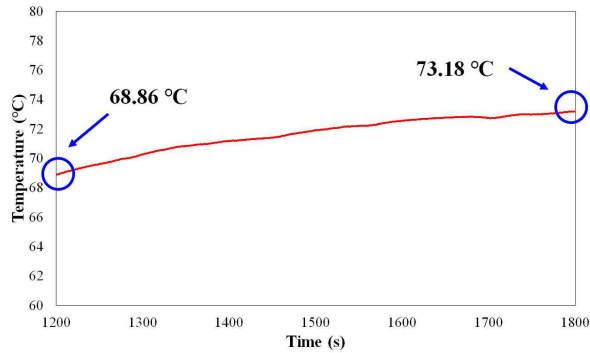
(a) 5 day



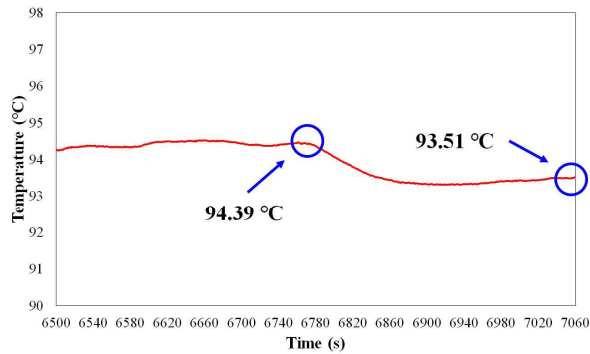
(b) 7 day

Fig. 4.20 Temperature variations under various  $Q_{in}$  of OS PHP after (a) 5 day and (b) 7 day.

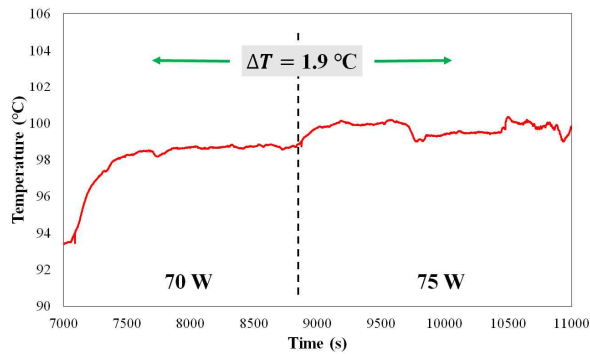
Fig. 4.21는 MS PHP에 대한 0 day에서의 다양한 작동 모드 동안의  $T_{c,avg}$  에 대한 내부 흐름의 영향을 보여준다. 작동 시작 후 유동이 시작되는 시점은 Fig. 4.21(a)와 같이 약  $68.86^{\circ}\text{C}$  부터 여러 공동에서 버블이 생성되며, 약  $110^{\circ}\text{C}$  부터 생성되는 OS PHP에 비하여 약  $41^{\circ}\text{C}$  낮은 온도에서 일어나며,  $73.18^{\circ}\text{C}$  까지 안정적으로 증가한다.  $Q_{in}$  를 높이면 OS PHP에서와 유사한 온도 맥동을 보이는 슬러그 유동을 지나 annular 유동이 발생한다. 이때 Fig. 4.21(b)와 같이  $T_{c,avg}$  의 온도가 지속적으로 감소하여  $94.39^{\circ}\text{C}$  에서  $93.51^{\circ}\text{C}$  까지 감소한다. 이러한 온도 변화는 증발 발생 영역의 수가 증가하여 야기되는 빠른 상변화로 인해 증발 영역의 열 흡수가 증가하는 것을 나타낸다. Fig. 4.21(c)와 같이  $Q_{in}$  를 단계적으로 더 증가하더라도 dry-out에 의한 유동 정지는 발생하지 않고, 온도 변화가  $1.9^{\circ}\text{C}$  미만으로 유지되며 PHP가 작동한다.



**(a) Initial flow motion (50 W)**



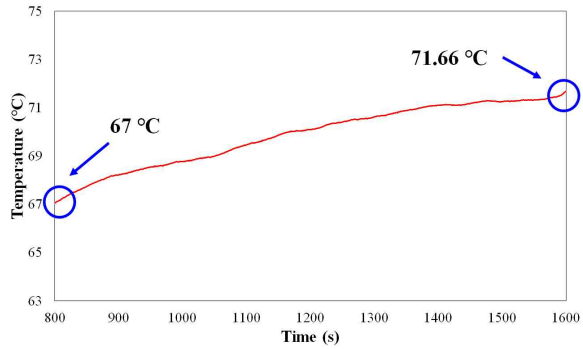
**(b) Annular flow (65 W)**



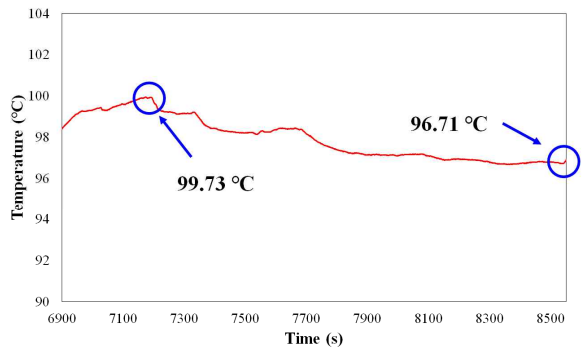
**(c) Normal operating regimes (70 - 75 W)**

**Fig. 4.21 Variations of operating temperatures for MS PHP at 0 day during (a) Initial flow motion, (b) annular flow and (c) normal operating regimes.**

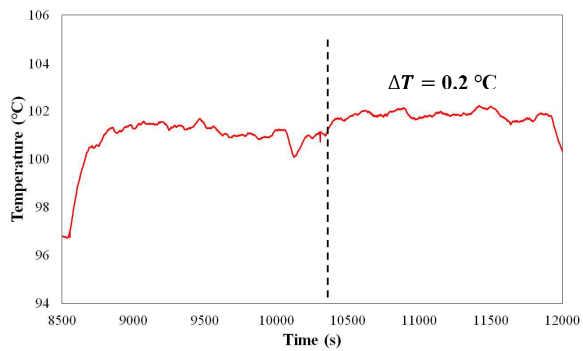
Fig. 4.22는 MS PHP에 대한 1 day에서의  $T_{c,avg}$  에 대한 내부 흐름의 영향을 보여준다. Fig. 4.22(a)에서 보는 바와 같이 여러 공동을 통해 버블이 생성되는 시점이 0 day에서보다 약  $2^{\circ}\text{C}$  낮은 약  $67^{\circ}\text{C}$ 부터 생성되며, 0 day에서와 같이  $71.66^{\circ}\text{C}$ 까지 안정적으로 증가한다.  $Q_{in}$  이 증가하여 annular 유동이 발생하면, Fig. 4.22(b)와 같이  $T_{c,avg}$  의 온도가 지속적으로 감소하여  $99.73^{\circ}\text{C}$ 에서  $96.71^{\circ}\text{C}$ 까지 약  $3.02^{\circ}\text{C}$  감소한다. 이러한 온도 변화는 이전 작동보다 증발 및 상변화가 빠르게 일어나 열 성능이 향상되는 것을 나타낸다. Fig. 4.22(c)와 같이  $Q_{in}$  를 70 W 보다 증가시켜도 온도 변화가  $0.2^{\circ}\text{C}$  미만으로 유지되며 PHP가 작동한다. 이는 마이크로 나노 구조를 가지는 Wenzel 상태의 특성으로 인해 증발 영역의 표면의 유체가 전체적으로 증발하지 않고 남아있을 수 있어 dry-out을 방지할 수 있음을 의미한다.



**(a) Initial flow motion (50 W)**



**(b) Annular flow (70 W)**



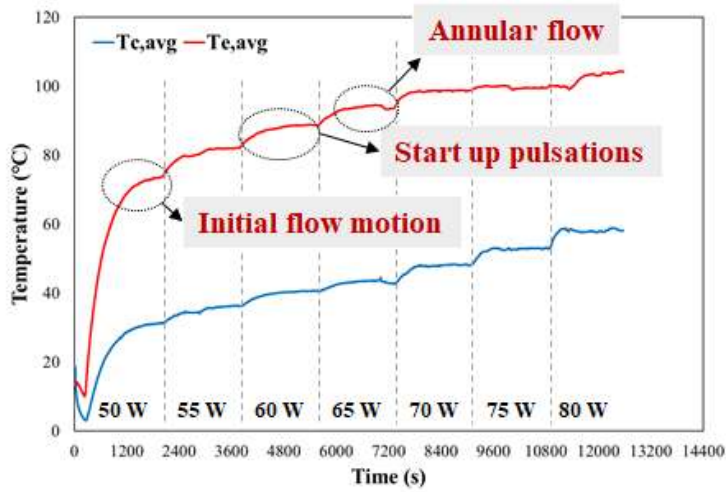
**(c) Normal operating regimes (75 – 80 W)**

**Fig. 4.22 Variations of operating temperatures for MS PHP at 1 day during (a) Initial flow motion, (b) annular flow and (c) normal operating regimes.**

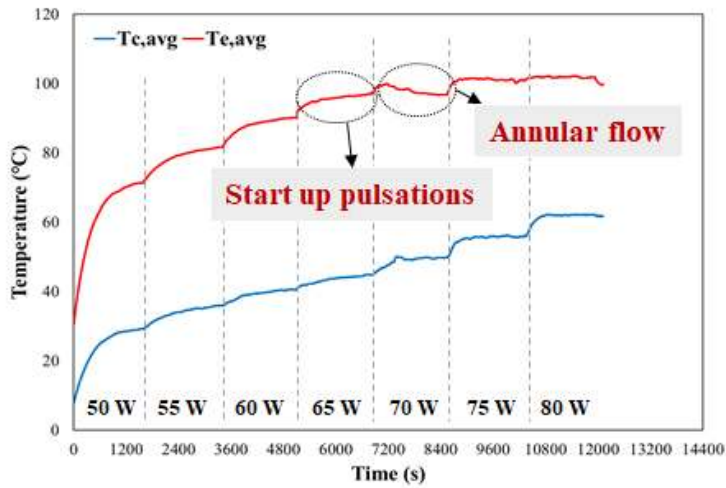
Figs. 4.23와 4.24은 MS PHP의 시간에 따른  $T_{e,avg}$  과  $T_{c,avg}$  를 보여준다. Fig. 4.23(a)와 같이 초기 작동 시에는 유동 발생이 OS PHP와 비교하여 낮은  $Q_{in}$  에서 관찰된다. 기포 발생, 슬러그 유동, 맥동 및 annular 유동은 각각 50, 60 및 65 W에서 관찰된다. 유동 패턴이 슬러그 유동에서 환상 유동으로 변환되면,  $T_{c,avg}$  가 급격하게 떨어진다. 이러한 이유는 증발 발생 영역의 수가 증가하여 야기되는 빠른 상변화로 인해 증발 영역의 열 흡수가 증가하기 때문이다. 또한, OS PHP와 달리 80 W의  $Q_{in}$  까지 dry-out 현상 없이 안정적인 annular 흐름을 유지한다.

Fig. 4.23(b)의 1 day 결과에서는 65 W에서 지연된 맥동 시작을 제외하고는 초기 작동과 유사한 온도 변화가 확인된다. Fig. 4.24(a)의 5 day에서도 초기 작동과 비교하여 큰 변화가 관찰되지 않는다. 작동 시간이 증가하더라도 annular 유동이 발생 때  $T_{c,avg}$  의 온도는 급격히 감소하고, 높은  $Q_{in}$  에서도  $T_{c,avg}$  의 온도는 증가하지 않고 유지된다.

작동시키기 전인 표면 개질 시, 미반응을 보이는 Al 이 잔류하는 위치에서 소량의 수소 가스가 생성될 수 있다. 따라서, Fig. 4.24(b)와 같이 7 day에서 내부 유동이 약해지고 약간의 dry-out으로 인해 증발 영역의 온도가 상승하게 된다. Dry-out 영역이 유지되어 지속적인 작동에 영향을 미치는 OS PHP와 달리 MS PHP에서는 표면의 친수 특성으로 dry-out 영역으로 액체가 공급되고 dry-out 현상은 잠시 발생한 후 사라지고 내부 유동은 재생된다.



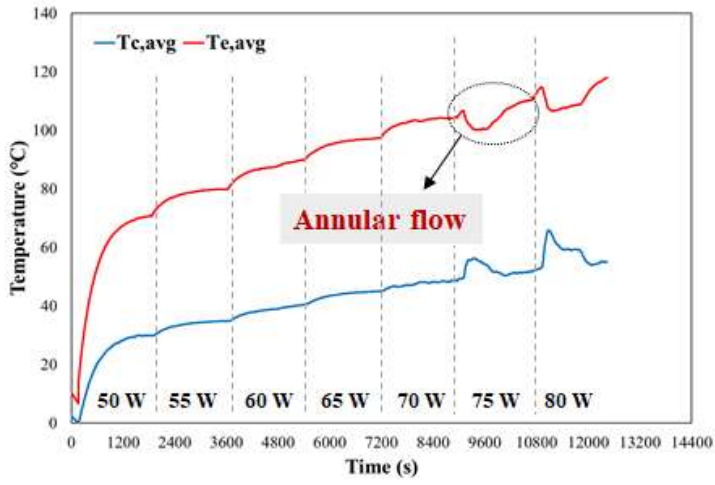
(a) 0 day



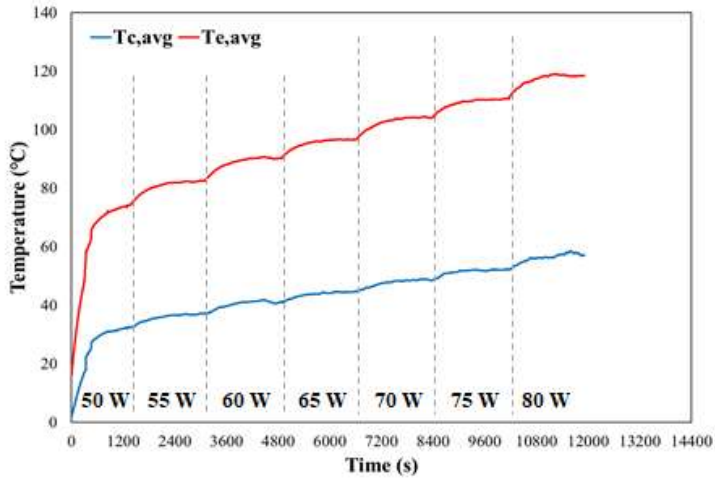
(b) 1 day

Fig. 4.23 Temperature variations under various  $Q_{in}$  of MS PHP after (a) 0 day and (b) 1 day.





**(a) 5 day**



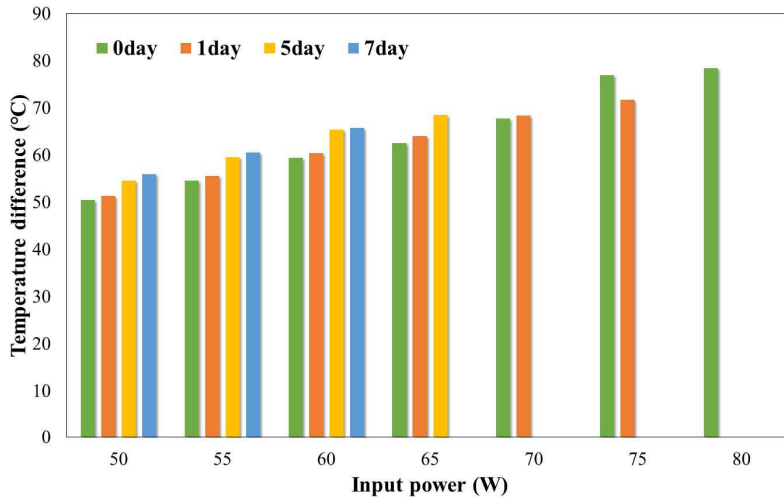
**(b) 7 day**

**Fig. 4.24** Temperature variations under various  $Q_{in}$  of MS PHP after (a) 5 day and (b) 7 day.

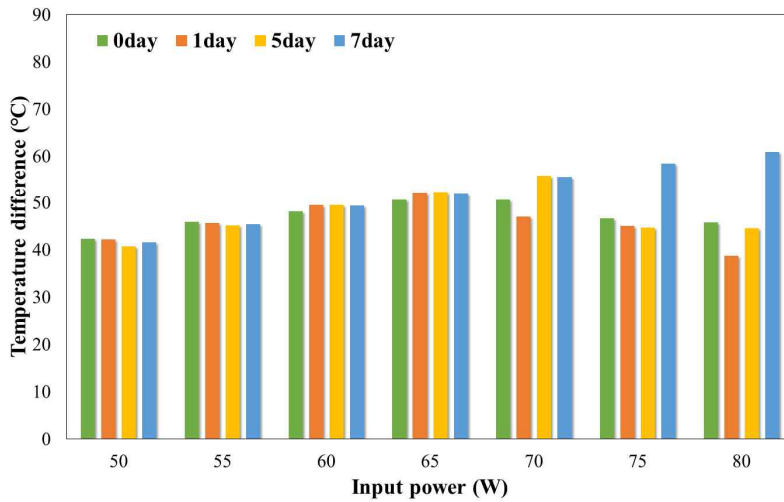
## 2. 열 저항 및 열 성능

PHP의 열 성능은 일반적으로 식 3.3.1의  $T_{c,avg}$  와  $T_{c,avg}$  의 평균 온도차를  $Q_{in}$  로 나눈 값으로 정의되는  $R_{th}$  로 평가한다. 이에  $R_{th}$  는  $T_{c,avg}$  와  $T_{c,avg}$  의 온도차에 비례하며,  $Q_{in}$  와 반비례한다. 즉, 온도차가 작을수록,  $Q_{in}$  가 클수록  $R_{th}$  는 감소하며, 열 성능은 우수하다. Fig. 4.25는 OS와 MS PHP의 각각  $T_{c,avg}$  와  $T_{c,avg}$  의 온도차를 나타낸 그래프이다. Fig. 4.25(a)와 같이 OS PHP의 경우에는 전체적으로  $Q_{in}$  가 증가함에 따라 온도차도 차도 증가한다. 또한, 낮은  $Q_{in}$  인 50 W 조건에서, 작동 시간이 길어질수록 온도차가 50.45℃에서 55.95℃까지, 약 10.9% 증가하며 이는 열전달 성능을 저하시킨다. 높은  $Q_{in}$  에서도 비슷한 경향성을 보이며, 65 W부터는 증발 영역의 dry-out에 의해 작동 범위가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.25(b)와 같이 MS PHP의 경우에는 50 W 조건에서, 작동 시간이 길어지더라도 온도차가 42.33℃부터 40.71℃까지, 최대 3.8% 감소한다. 또한, OS PHP와 다르게 작동 범위가 일정하게 유지되며, 경향성 또한 비슷하다. 다만, 7 day에서는 약간의 dry-out 발생으로 인해 높은  $Q_{in}$  에서 온도차가 증가하는 경향성을 보인다.



(a) OS PHP



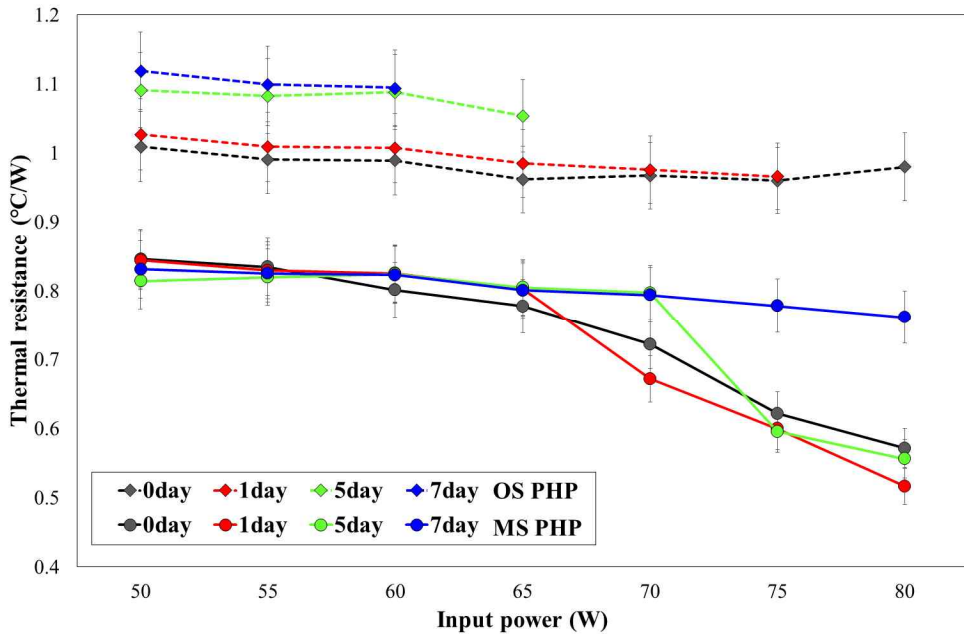
(b) MS PHP

Fig. 4.25 Comparisons of temperature difference for OS and MS PHP.

OS와 MS PHP의  $R_{th}$  를 Fig. 4.26에 비교하였다. 두 경우 모두  $Q_{in}$  가 증가함에 따라  $R_{th}$  가 감소하는 경향성을 보인다. 실험 작동이 계속됨에 따라 OS PHP의  $R_{th}$  는 지속적으로 상승하는 반면에, MS PHP의 7 day에서 높은  $Q_{in}$  를 제외하고는 성능이 유지된다. OS PHP는 0 day에서  $R_{th}$  는 1.01 °C/W에서 0.96 °C/W 범위에서 나타난다. 이때, 75 W의  $Q_{in}$  에서 맥동 시작 후 활발하게 유동이 생성되어 최소  $R_{th}$  는 0.96 °C/W 까지 감소한다. Dry-out으로 인해 80 W의  $Q_{in}$  에서  $R_{th}$  는 0.98 °C/W로 점차 상승한다. 1 day에서 OS PHP의  $R_{th}$  는 1.03 °C/W에서 0.97 °C/W 범위에서 나타나며, 최대 작동 가능한  $Q_{in}$  는 75 W이다. 5 day에서 OS PHP의  $R_{th}$  는 1.09 °C/W와 1.05 °C/W의 범위를 가지며, 최대  $Q_{in}$  는 65 W이다. 7 day에서 OS PHP의  $R_{th}$  는 1.12 °C/W에서 1.10 °C/W까지 관찰되며, 최대  $Q_{in}$  는 60 W로 나타났다. 이처럼 OS PHP는 작동이 계속됨에 따라 작동  $Q_{in}$  의 범위가 점차 줄어들었으며, 50 W 를 기준으로  $R_{th}$  가 약 10.9% 증가하였다.

MS PHP는 0 day에서 0.85 °C/W에서 0.57 °C/W의  $R_{th}$  를 가지며, 최소  $R_{th}$  는  $Q_{in}$  가 80 W에서 0.57 °C/W이다. 이때, annular flow 발생 시점인 65 W부터  $R_{th}$  가 급격하게 감소하는데, 이러한 이유는  $T_{e,avg}$  와  $T_{c,avg}$  의 온도차가 급격하게 감소하기 때문이다. Annular flow가 발생하면 증발 영역에서 액체의 증발이 가속되어  $T_{c,avg}$  의 온도는 낮아지고, 증발 영역의 플러그 및 슬러그가 응축 영역으로 빠르게 이동하여 열전달이 발생하기 때문에  $T_{c,avg}$  의 온도는 증가하여 결국에는 두 영역의 온도차가 줄어들게 된다. 이러한 변화는  $R_{th}$  를 감소시킨다.

1 day에서 MS PHP의  $R_{th}$  는 0.85 °C/W와 0.52 °C/W 사이에서 관찰되며, 최소  $R_{th}$  는  $Q_{in}$  가 80 W 조건에서 0.52 °C/W 이다. 1주일 작동 중 1 day에서 MS PHP는 가장 낮은  $R_{th}$  를 가지며, OS PHP에서 가장 낮은  $R_{th}$  보다 45.8% 감소하였다. 5일째에 MS PHP 0.82 °C/W에서 0.56 °C/W까지  $R_{th}$  를 가지며, 최소  $R_{th}$  는 80 W에서 0.56 °C/W이다. 7 day에서 MS PHP의  $R_{th}$  는 0.83 °C/W와 0.76 °C/W 범위에서 관찰되었으며, 간헐적인 dry-out으로 이전과는 달리  $R_{th}$  곡선의 기울기 감소는 나타나지 않는다.



**Fig. 4.26 Comparisons of thermal resistance for OS and MS PHP.**

PHP가 작동할 수 있는  $Q_{in}$  는 PHP의 크기에 영향을 받기 때문에 PHP의 운전 범위는 열 유속을 사용하여 비교하는 것이 더욱 적합하다. Fig. 4.27은 본 실험 장치 PHP의 열 유속을 보여준다. 열 유속은 다음 방정식으로 계산된다.

$$q'' = \frac{Q_m}{A} \quad (4.2.2)$$

여기서,  $Q_{in}$  은 증발 영역의 입력 전력이며,  $A$ 는 증발 영역의 면적이다.

PHP에서는 dry-out이 발생하여  $R_{th}$  가 급격히 증가하는 PHP의 운전 한계 조건을 임계 열 유속 (critical heat flux, CHF)으로 표시한다. OS PHP의 7 day 경우에는 60 W에서 CHF 에 해당하는데, 이때의 열 유속은  $3.43 \text{ W/cm}^2$  이다. MS PHP의 경우에는 OS PHP의 CHF보다 더 높아 80 W까지 작동 범위가 길며, 80 W에서의 열 유속은  $4.57 \text{ W/cm}^2$ 이다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 표면 개질을 통해, 열 유속 또는 작동 시간과 관계없이 열 저항을 낮출 수 있다. 또한, CHF가 운전 시간이 증가함에 따라 OS PHP에서는 점차 감소하지만, 초친수성 표면이 증발 영역의 액체 상태의 물을 지속적으로 공급할 수 있는 MS PHP에서는 작동 시간이 증가하여도 CHF가 유지된다. 결론적으로 MS PHP는 OS PHP와 비교하여 열 성능을 향상시킬 뿐 아니라 지속적인 운전이 가능하도록 CHF도 유지하도록 내구성도 향상시킨다.

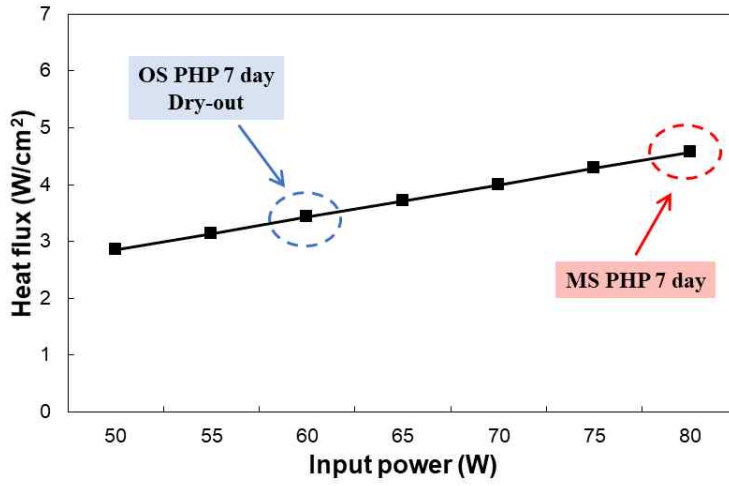


Fig. 4.27 Heat flux corresponding to the input power for PHP used in this study.

## 제 5 장 결 론

Al과 DI-water가 고온에서 반응하여 수소 가스가 생성되고 비응축성 가스인 수소는 PHP의 작동을 멈추게 하고, 열전달 성능 및 PHP 내구성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 일반적으로 DI-water를 작동 유체로 사용한 PHP의 재료로는 Al을 사용하지 않는다.

본 논문에서는 안정적이고 주변에서 쉽게 구할 수 있는 DI-water를 작동 유체로 하는 Al PHP의 문제를 해결하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위하여 Al 채널 표면에 부식성 마이크로 나노 구조를 형성하는 방법으로 표면을 개질하고 그 효과를 조사하였다. SEM, EDS 및 액적 거동은 Wenzel 상태를 유도하는 마이크로 나노 구조로 인해 표면 젖음성이 초친수성으로 바뀌는 것을 확인하였다. 표면 개질을 통해, 미리 형성된 Al(OH)<sub>3</sub>을 통해서 Al과 DI-water의 화학 반응 중에 생성물인 비응축성 수소 가스를 효과적으로 방지할 수 있음을 보여준다.

일주일 동안 OS 및 MS 두 종류의 PHP를 실험하였으며,  $Q_{in}$  는 50 W부터 80 W까지 5 W씩 증가하여 온도를 측정하고 내부 유동을 가시화하여 열 성능과 내구성을 비교하였다. 본 실험 결과는 다음과 같다.

- OS PHP의 경우, 1 day에서 0 day보다 맥동이 시작하는  $Q_{in}$  가 감소하였으며, 시간이 더 빠르게 일어났다. 이는 알루미늄의 얇은 산화피막의 형성으로 인해 cavity로 작용하는 미세 구조의 생성과 표면 젖음성이 친수성으로 변화되기 때문이다. 하지만, 작동 시간이 증가함에 따라 다량의 수소 가스의 생성으로 인해 유동이 전체적으로 멈춰버리는 현상이 발생했다. MS PHP의 경우, 맥동 유동의 시작이 OS PHP보다 낮은  $Q_{in}$  에서 일어났으며, 유체의 맥동 및 annular 유동으로 인해 증발 영역의 온도가  $Q_{in}$  를 증가시키더라도 유지된다.



- OS PHP는 작동 시간이 증가함에 따라 dry-out 현상이 발생하는  $Q_{in}$  가 감소하였으며, 7 day에서는 최대  $Q_{in}$  가 60 W로 CHF는  $3.43 \text{ W/cm}^2$ 으로 나타났다. 즉, 작동 시간이 증가함에 따라 내부 유동을 방해하는 비응축성 수소 가스로 인해 작동 범위 및 CHF가 감소하였다.
- OS PHP의 경우, 최소  $R_{th}$  가 0 day에서  $0.96 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 이었으며, MS PHP의 경우에는 최소  $R_{th}$  가 1 day에서  $0.52 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 로  $R_{th}$  가 표면 개질에 의해 최대 45.8%를 감소하였다.
- MS PHP는 작동 시간이 증가함에 따라 운전 범위 및 CHF는 일정하게 유지가 되었다. 다만, 7 day에서는 약간의 dry-out 현상이 일어났지만, 표면의 친수 특성으로 인해 액체를 건조 영역으로 끌어당겨 dry-out이 빠르게 사라져 작동 시간이 증가하더라도 CHF가 유지된다.

본 연구를 통해, 작동 유체로 DI-water를 약 55% 사용하며, 2-turn을 가지는 AI PHP에 대해 내구성 및 성능을 효과적으로 향상 시킬 수 있는 표면 개질 방법을 제안하는 바이다. 향후 전자 장치 및 우주 기술의 냉각 장치를 개발하는데 있어서 도움이 될 수 있을 것이라 기대한다.

## 참고문헌

- [01] Faghri, A. (2012). Review and advances in heat pipe science and technology. *Journal of heat transfer*, 134(12).
- [02] Akachi, H. (1996). Pulsating heat pipes. In *Proceedings 5th International Heat Pipe Symp.*,
- [03] Han, X., Wang, X., Zheng, H., Xu, X., & Chen, G. (2016). Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 692-709.
- [04] Burbani, G., Ayel, V., Alexandre, A., Lagonotte, P., Bertin, Y., & Romestant, C. (2013). Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications. *Applied thermal engineering*, 50(1), 94-103.
- [05] Mochizuki, M., Nguyen, T., Mashiko, K., Saito, Y., Nguyen, T., & Wuttijumnong, V. (2011). A review of heat pipe application including new opportunities. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2(1), 013001.
- [06] Xu, Y., Xue, Y., Qi, H., & Cai, W. (2021). An updated review on working fluids, operation mechanisms, and applications of pulsating heat pipes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110995.
- [07] Kim, W., & Kim, S. J. (2020). Effect of a flow behavior on the thermal performance of closed-loop and closed-end pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 119251.

- [08] Zhang, Y., & Faghri, A. (2008). Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes. *Heat transfer engineering*, 29(1), 20-44.
- [09] Thompson, S. M., Cheng, P., & Ma, H. B. (2011). An experimental investigation of a three-dimensional flat-plate oscillating heat pipe with staggered microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17-18), 3951-3959.
- [10] Liu, X., & Chen, Y. (2014). Fluid flow and heat transfer in flat-plate oscillating heat pipe. *Energy and buildings*, 75, 29-42.
- [11] Mehta, K., Mehta, N., & Patel, V. (2021). Experimental investigation of the thermal performance of closed loop flat plate oscillating heat pipe. *Experimental Heat Transfer*, 34(1), 85-103.
- [12] Pastukhov, V. G., & Maydanik, Y. F. (2016). Development of a pulsating heat pipe with a directional circulation of a working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 109, 155-161.
- [13] Deng, Z., Zheng, Y., Liu, X., Zhu, B., & Chen, Y. (2017). Experimental study on thermal performance of an anti-gravity pulsating heat pipe and its application on heat recovery utilization. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1368-1378.
- [14] Jang, D. S., Lee, J. S., Ahn, J. H., Kim, D., & Kim, Y. (2017). Flow patterns and heat transfer characteristics of flat plate pulsating heat pipes with various asymmetric and aspect ratios of the channels. *Applied Thermal Engineering*, 114, 211-220.

- [15] Ebrahimi, M., Shafii, M. B., & Bijarchi, M. A. (2015). Experimental investigation of the thermal management of flat-plate closed-loop pulsating heat pipes with interconnecting channels. *Applied Thermal Engineering*, 90, 838-847.
- [16] Kim, B., Li, L., Kim, J., & Kim, D. (2017). A study on thermal performance of parallel connected pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 126, 1063-1068.
- [17] Creatini, F., Guidi, G. M., Belfi, F., Cicero, G., Fioriti, D., Di Prizio, D., ... & Marengo, M. (2015, October). Pulsating Heat pipe only for Space (PHOS): Results of the REXUS 18 sounding rocket campaign. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 655, No. 1, p. 012042). IOP Publishing.
- [18] Xue, Z. H., & Qu, W. (2017). Experimental and theoretical research on a ammonia pulsating heat pipe: New full visualization of flow pattern and operating mechanism study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 149-166.
- [19] Xu, D., Li, L., & Liu, H. (2016). Experimental investigation on the thermal performance of helium based cryogenic pulsating heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 70, 61-68.
- [20] Wang, J., Ma, H., & Zhu, Q. (2015). Effects of the evaporator and condenser length on the performance of pulsating heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 91, 1018-1025.
- [21] Kim, J. and S.J. Kim, Experimental investigation on the effect of the condenser length on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 2018. 130: p. 439-448.

- [22] Goshayeshi, H. R., Safaei, M. R., Goodarzi, M., & Dahari, M. (2016). Particle size and type effects on heat transfer enhancement of Ferro-nanofluids in a pulsating heat pipe. *Powder Technology*, 301, 1218-1226.
- [23] Sun, C. H., Tseng, C. Y., Yang, K. S., Wu, S. K., & Wang, C. C. (2017). Investigation of the evacuation pressure on the performance of pulsating heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 85, 23-28.
- [24] Xue, Z., & Qu, W. (2014). Experimental study on effect of inclination angles to ammonia pulsating heat pipe. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(5), 1122-1127.
- [25] Paudel, S. B., & Michna, G. J. (2014, August). Effect of inclination angle on pulsating heat pipe performance. In *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels* (Vol. 46278, p. V001T05A006). American Society of Mechanical Engineers.
- [26] Wang, X. H., Zheng, H. C., Si, M. Q., Han, X. H., & Chen, G. M. (2015). Experimental investigation of the influence of surfactant on the heat transfer performance of pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 586-590.
- [27] Rahman, M. L., Afrose, T., Tahmina, H. K., Rinky, R. P., & Ali, M. (2016, July). Effect of using acetone and distilled water on the performance of open loop pulsating heat pipe (OLPHP) with different filling ratios. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1754, No. 1, p. 050015). AIP Publishing LLC.

- [28] Ahmad, H., Kim, S. K., & Jung, S. Y. (2020). Analysis of thermally driven flow behaviors for two-turn closed-loop pulsating heat pipe in ambient conditions: An experimental approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119245.
- [29] Ahmad, H., & Jung, S. Y. (2020). Effect of active and passive cooling on the thermo-hydrodynamic behaviors of the closed-loop pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119814.
- [30] Ahmad, H., Kim, S. K., Park, J. H., & Jung, S. Y. (2022). Development of two-phase flow regime map for thermally stimulated flows using deep learning and image segmentation technique. *International Journal of Multiphase Flow*, 146, 103869.
- [31] Taft, B. S., Williams, A. D., & Drolen, B. L. (2012). Review of pulsating heat pipe working fluid selection. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 26(4), 651-656.
- [32] Kim, J., & Kim, S. J. (2020). Experimental investigation on working fluid selection in a micro pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 205, 112462.
- [33] Xie, K., Ji, Y., Yu, C., Wu, M., & Yi, H. (2019). Experimental investigation on an aluminum oscillating heat pipe charged with water. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114182.
- [34] Zhang, X. M. (2004). Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol, and water as working fluids. *Experimental Heat Transfer*, 17(1), 47-67.

- [35] Wang, X., & Jia, L. (2016). Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipe with refrigerants. *Journal of Thermal Science*, 25(5), 449-453.
- [36] Bastakoti, D., Zhang, H., Cai, W., & Li, F. (2018). An experimental investigation of thermal performance of pulsating heat pipe with alcohols and surfactant solutions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 1032-1040.
- [37] Bao, K., Wang, X., Fang, Y., Ji, X., Han, X., & Chen, G. (2020). Effects of the surfactant solution on the performance of the pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115678.
- [38] Xing, M., Wang, R., & Yu, J. (2020). The impact of gravity on the performance of pulsating heat pipe using surfactant solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151, 119466.
- [39] Fumoto, K., Kawaji, M., & Kawanami, T. (2009, January). Effect of self-wetting fluids on pulsating heat pipe thermal performance. In *International Conference on Micro/Nanoscale Heat Transfer* (Vol. 43918, pp. 381-387).
- [40] Kim, H.-T. and K.-H. Bang, Heat transfer enhancement of nanofluids in a pulsating heat pipe for heat dissipation of LED lighting. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 2014. 38(10): p. 1200-1205.
- [41] Wu, Q., et al., Effect of C60 nanofluid on the thermal performance of a flat-plate pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. 100: p. 892-898.

- [42] Jung, C., & Kim, S. J. (2021). Effects of oscillation amplitudes on heat transfer mechanisms of pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 165, 120642.
- [43] Jo, J., Kim, J., & Kim, S. J. (2019). Experimental investigations of heat transfer mechanisms of a pulsating heat pipe. *Energy conversion and management*, 181, 331-341.
- [44] Xu, R., Zhang, C., Chen, H., Wu, Q., & Wang, R. (2019). Heat transfer performance of pulsating heat pipe with zeotropic immiscible binary mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 31-41.
- [45] Hao, T., Ma, X., Lan, Z., Li, N., Zhao, Y., & Ma, H. (2014). Effects of hydrophilic surface on heat transfer performance and oscillating motion for an oscillating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 50-65.
- [46] Kang, J. H., Lee, J. W., Kim, J. Y., Moon, J. W., Jang, H. S., & Jung, S. Y. (2021). Effect of Mesh Wettability Modification on Atmospheric and Industrial Fog Harvesting. *Frontiers in Physics*, 9, 259.
- [47] Kim, J. Y., Kang, J. H., Moon, J. W., & Jung, S. Y. (2022). Improvement of water harvesting performance through collector modification in industrial cooling tower. *Scientific reports*, 12(1), 1-9.
- [48] Giacomello, A., Meloni, S., Chinappi, M., & Casciola, C. M. (2012). Cassie-Baxter and Wenzel states on a nanostructured surface: phase diagram, metastabilities, and transition mechanism by atomistic free energy calculations. *Langmuir*, 28(29), 10764-10772.



- [49] Koishi, T., Yasuoka, K., Fujikawa, S., & Zeng, X. C. (2011). Measurement of contact-angle hysteresis for droplets on nanopillared surface and in the Cassie and Wenzel states: a molecular dynamics simulation study. *ACS nano*, 5(9), 6834-6842.
- [50] Siedel, S. (2012). Bubble dynamics and boiling heat transfer: a study in the absence and in the presence of electric fields (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- [51] Griffith, P., & Wallis, J. D. (1958). The role of surface conditions in nucleate boiling. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, Division of Industrial Cooperation.