



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

전기 자동차 배터리 냉각용
알루미늄 평판형 멀티 미니채널
써모사이폰의 열적 특성



2019년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

이 재 영

공학석사 학위논문

전기 자동차 배터리 냉각용
알루미늄 평판형 멀티 미니채널
써모사이폰의 열적 특성

지도교수 김 종 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2019년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

이 재 영

이 논문을 이재영의 석사학위
논문으로 인준함

2019년 2월

주심 공학박사 김 종 수 ⑩

위원 공학박사 김 은 필 ⑩

위원 공학박사 김 종 수 ⑩

목 차

Abstract	ii
List of figures	v
List of tables	v
Nomenclatures	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 Li-ion battery 및 thermosyphon 개요와 냉각시스템 연구동향	3
1.2.1 Li-ion battery의 개요	3
1.2.2 Thermosyphon의 개요	5
1.2.3 배터리 냉각 시스템 연구동향	8
1.3 연구목적	11
제 2 장 실험장치 및 방법	12
2.1 Thermosyphon의 변수와 작동유체 선정	12
2.2 실험장치(Multi-mini channel thermosyphon)	16
2.3 실험 조건	18
2.4 실험 방법	20
제 3 장 실험결과 및 고찰	22
3.1 충전율에 따른 작동 특성	25
3.2 경사각에 따른 작동 특성	30
3.3 열유속에 따른 작동 특성	35
제 4 장 결론	38
참 고 문 헌	39

Thermal Characterization of an Aluminum Flat Plate Multi-mini Channel Thermosyphon for Electric Vehicle Battery Cooling

Jae Yeong Lee

Department of Refrigeration and Air conditioning Engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The design and development of pure and hybrid electric vehicles(PEV, HEV) is becoming a major focus area for the automotive industry due to their high energy efficiency. The effective operation of batteries plays a key role in the overall EV efficiency.

Thermosyphon is a kind of heat pipes that transfers heat through convective heat transfer using phase change phenomena of working fluid and, it operates by continuous gravity circulation of the working fluid. It consists of an evaporator section at the bottom of thermosyphon and condenser section at the upper place of thermosyphon. Thermosyphon has main advantage which can manufacture easily because there is no wick structure. The advantage makes it possible to make to various shapes of products.

The present research aims at proposing the flat plate multi-mini channel thermosyphon technology as a promising

candidate for the thermal management of electronics mounted aboard vehicles. This study evaluated the effect of a various orientation on thermal performance in an flat plate multi-mini channel thermosyphon. A flat plate thermosyphon filled with Novec-7100 (charging ratio 20, 40, 60 voL.%) has been characterized at heat power 6W and 14W. The thermosyphon is an extruded thin aluminum plate of size 170W x 210H x 16T [mm] and had 56 channels. Installation angles of inclination is pitching, rolling, and yawing are used. Results indicate that the thermosyphon operated in the pitching, rolling, and yawing position allow it to reach good performance in terms of start-up heat input, effective thermal conductivity and operation stability. The results were summarized as follow:

1. It is confirmed that it has a constant heat flux for operation. The effect of charging ratio variation showed the best performance at 20%.
2. The thermosyphon with $q=450\text{W}/\text{m}^2$ and $q=1000\text{W}/\text{m}^2$ showed smooth flow behavior with enough cooling performance. At the heat input of 6W and charging ratio is 20%, the temperature source and the sink was 40~45°C. And 14W and charging ratio is 20%, the temperature of heater(battery surface) was 60~65°C.
3. The experimental result according to the pitching inclination angle, the thermosyphon operates at more than

3° and the rolling inclination angle, the thermosyphon operates at more than 30° and the yawing inclination angle, the thermosyphon operates in the whole angles (0 to 90°).

4. In the multi-mini channel thermosyphon, the limiting condition of the inclination angle need to bend the condensation side by 3 to 5° to overcome it.



List of figures

Fig. 1.1 Battery Cell, Module, Pack	4
Fig. 1.2 Schematic of a closed, gravity assisted, two-phase thermosyphon ...	7
Fig. 1.3 Global EV demand forecast	9
Fig. 1.4 Battery Module with PCM/graphite thermal management	10
Fig. 1.5 Heat pipe battery thermal management system demonstration	10
Fig. 2.1 Multi-mini channel thermosyphon	17
Fig. 2.2 Schematic of experimental setup	19
Fig. 2.3 Pitching, Rolling and Yawing angles mode	23
Fig. 3.1 The effective thermal conductivity profile according to charging ratio ($q=450\text{W/m}^2$).....	27
Fig. 3.2 The effective thermal conductivity profile according to charging ratio ($q=1000\text{W/m}^2$)	29
Fig. 3.3 Battery temperature variation at the low heat flux($q=450\text{W/m}^2$) ...	32
Fig. 3.4 Battery temperature variation at the low heat flux($q=1000\text{W/m}^2$) .	34
Fig. 3.5 Effect of Inclination angle on k_{eff}	36
Fig. 3.6 Aspect ratio of channel	37

List of tables

Table 1 Battery pack system	4
Table 2 Environmental and safety properties	15
Table 3 Experimental condition	21

Nomenclatures

English

A : Area, mm²

B_o : Bond number

C : Thermal conductance, W/°C

D : Diameter, mm

g : Gravity force, *m/s*²

I : Current, A

k : Thermal conductivity, W/mK

L : Length, mm

N : Number of channel

Q : Heat input, W

q : Heat flux W/m²

R : Thermal resistance, °C/W

T : Temperature, °C

V : Voltage, V

Greek

ρ : Density, kg/m³

σ : Surface tension, N/m

Subscripts

cond : Condenser section

cool : Cold plate cooling section

evap : Evaporator section

g : Gas

l : Liquid



제 1 장 서론

1.1 연구 배경

고성능 및 소형화를 추구하는 전자공학의 부단한 진보 때문에 전자 부품들 가운데 열적관리는 계속적으로 증가하는 열유속과 국소 온도들을 처리하는 것이 요구된다. 전자부품들의 수명과 신뢰도는 그것들의 작동 온도에 민감하기 때문에, 높은 열전달율과 열확산 능력을 가진 효율적인 장치들이 필요하다. 최근 지구온난화와 화석연료 고갈이 문제가 되면서 에너지 문제 해결 방법으로 친환경적인 전기 자동차가 각광받고 있다. 전기 자동차 관련 국가 정책으로는 프랑스와 영국은 2040년부터 휘발유와 경유 차량 판매 전면 금지, 네덜란드는 2030년부터 내연기관차 판매금지, 노르웨이는 2025년부터 내연기관차 판매금지, 독일은 2020년까지 전기차 100만대 보급목표, 인도는 2030년부터 전기차만을 판매, 중국은 2020년까지 전기차 500만대 보급과 연간 생산능력 200만대 증가 목표, 국내는 2022년까지 전기차 35만대 보급목표 등 정책이 시행되고 있다. 전기자동차에는 리튬이온 배터리가 집적되어 있는데 이를 냉각하는 것이 필요하다.

일반적으로, 전기 자동차 성능은 배터리와 직접적인 영향이 있다. 지나치게 높거나 낮은 온도 그리고 불균일한 온도 분배는 배터리의 수명을 상당히 감소

시킬 수 있다. 그 결과 높은 비용과 전기 자동차의 신뢰도 하락을 초래한다. 그러므로 전기자동차의 성능 향상을 위해 배터리가 반드시 바람직한 온도 조건에서 작동 하도록 설계를 해야 한다. 또한, 최근에는 모듈과 팩을 얼마나 더 효율적으로 설계하고 구성하는지가 전기 자동차 배터리 업계의 화두로 떠오른다. 전기 자동차에 최종적으로 탑재되는 배터리는 팩 형태이기 때문에 팩의 스펙이 전기 자동차의 전반적인 디자인과 직결된다. 그러므로 전기 자동차 배터리 업계는 전기 자동차 대중화 시대를 위해서 배터리 성능은 물론이고, 다양한 디자인의 전기 자동차를 만들 수 있도록 팩의 형태도 유연하게 적용할 수 있는 배터리 디자인 경쟁도 중요하다. 또한 전기 자동차용 배터리는 자동차 내 제한된 공간에서 최대한의 성능을 발휘할 수 있도록 단위부피당 높은 용량을 지녀야 한다. 이에 히트파이프는 작은 온도차로도 별도의 동력 없이 열을 수송하는 고성능 열전소자로 리튬이온배터리의 수동냉각에 우수한 기술적 잠재력을 지니고 있어, 전기 자동차 배터리에 활용하려는 연구가 이루어지고 있다.

써모사이폰(thermosyphon)은 내부에 워(wick)이 없어 중력이 주요한 구동원이 된다. 높은 열전달률과 열확산 능력을 가지고 있다. 그리고 그것의 기하학 형태는 파워 모듈 또는 평판형 전자부품과의 결합시 적합하고 배터리의 공간 확보에 유리하다. 제조과정은 간단하고 저렴하다. 평판형 알루미늄 재질에 다수의 모세관 채널로 이루어진 써모사이폰을 멀티 미니채널 써모사이폰이라 지칭하며, 몇 개의 일부 채널이 손상되어도 냉각 성능에 문제가 없는 이것을 이용해 전기 자동차 배터리 냉각용 시스템에 적용하고자 한다.

1.2 Li-ion battery 및 thermosyphon 개요와 냉각시스템

연구동향

1.2.1 Li-ion battery의 개요

전기 자동차 배터리는 셀(cell)과 모듈(module), 팩(pack)으로 구성되어 있다. 배터리 셀은 각각이 에너지를 저장했다 내보내는 역할을 한다. 이 자체만으로 용량이 작기 때문에 이를 한데 묶은 모듈을 만들고, 이를 다시 크게 합쳐 팩을 만든다. 배터리의 원천은 셀에 있고, 이를 묶는 단위가 모듈-팩 순이라고 보면 된다. 예를 들면 셀 12개를 하나의 모듈로 묶고, 이런 모듈 8개를 다시 하나의 팩으로 묶어 탑재하는 식이다. 전기 자동차용 셀은 자동차 내 제한된 공간에서 최대한의 성능을 발휘할 수 있도록 단위 부피당 높은 용량을 가져야 한다. 여기에 일반 모바일 기기용 배터리에 비해 훨씬 긴 수명을 가지면서, 동시에 주행 중에 전달되는 충격을 견디고, 저온 및 고온에서도 작동될 만큼 높은 신뢰성과 안정성을 지녀야 한다. 여러 개의 셀은 열과 진동 등 외부 충격에서 좀 더 보호될 수 있도록 하나로 묶어 프레임에 넣는데, 이게 바로 모듈이다. 모듈에 배터리의 온도나 전압 등을 관리해 주는 배터리 관리시스템(BMS)과 냉각장치 등을 추가한 것이 팩이다. 배터리 업계는 그 동안 셀에 대한 기술 경쟁에 주력해왔다. 근간이 되는 셀의 효율을 높이는데 연구개발(R&D)의 방향이 맞춰져 있었다. 하지만 이제 셀에 대한 기술 발전이 상당 부분 이뤄지면서, 점차 모듈과 팩에 대한 성능 효율성 증가로 방향이 바뀌어가고 있다. 전기 자동차에 최종적으로 탑재되는 형태는 팩 형태이기 때문에, 팩의 스펙이 전기 자동차의 전반적인 디자인과 긴밀한 관계를 가지고 있다. 전기 자동차에 탑재되는 배터리 팩이 얼마나 얇게 하는가에 따라 전기 자동차의 디자인이 유연하게 바뀔 수 있다. 배터리 셀의 에너지 밀도를 높이는 것은 기본이고, 이제는 모듈과 팩 디자인 경쟁이 치열해지고 있다.

Table 1 Battery pack system

구분	정의
배터리 셀(Cell)	전기에너지를 충전, 방전해 사용할 수 있는 리튬이온 배터리의 기본 단위, 양극, 음극, 분리막, 전해액을 사각형의 알루미늄 케이스에 넣어 제조.
배터리 모듈(Module)	배터리 셀(Cell)을 외부충격과 열, 진동 등으로부터 보호하기 위해 일정한 개수로 묶어 프레임에 넣은 배터리 조립체(Assembly).
배터리 팩(Pack)	전기차에 장착되는 배터리 시스템의 최종형태. 배터리 모듈에 BMS(Battery Management System), 냉각시스템 등 각종 제어 및 보호 시스템을 장착하여 완성됨.



Fig. 1.1 Battery Cell, Module, Pack

1.2.2 Thermosyphon의 개요

써모사이폰은 외력(중력 또는 원심력)에 의존하는 힘이 없는 히트파이프이며 내부에 적은 양의 작동유체를 함유하고 있는 단순한 구조의 관이다. 열을 써모사이폰의 하부에 가열하면 관 내부의 액체는 증발하게 되며, 증발된 증기는 상부로 상승하며, 이때 상승한 증기는 관 외부의 냉각유체에 열을 전달하고 응축이 된다. 응축된 액체는 중력에 의해 써모사이폰의 내 표면을 따라 하부로 유동하게 된다. 그리고 써모사이폰의 특징은 다음과 같다.

- 높은 열전달율 (잠열)
- 온도 분포의 균일화 (증기류에 의한 열확산)
- 경량, 간단한 구조 (중공 용기)
- 빠른 열응답 특성 (증기 유속에 의한 열이동)
- 가동부가 없음 (모세관력, 중력 등에 의한 작동유체 귀환)
- 무중력에서 작동
- 열류의 반도체성
- 가열부와 냉각부의 분리 가능

이러한 우수성 때문에 써모사이폰은 증발부의 핵 비등, 액막 증발, 응축 열전달 등 써모사이폰의 유동형태에 따른 작동원리, 내부유동 등의 작동특성 및 기초 원리와 유동형태에 기초한 열전달계수의 예측 및 열전달계수를 촉진하기 위한 연구, 그리고 써모사이폰의 응용분야에 적용하기 위한 응용연구 기술개발들에 관하여 집중적으로 연구가 진행되어 왔다. 그 동안의 연구결과 써모사이폰이 주어진 작동범위에서 작동성능을 확보하기 위하여 단일성분의 작동유체를 사용하는 것이 요구되었으나, 최근에는 열전달 촉진을 위한 가열벽면의 구조나 온도제어를 용이하게 하기 위하여 두 종류의 유체를 혼합하여 사용하

는 써모사이폰에 대한 연구들이 진행되고 있다. 초기의 공학분야는 통신위성 및 과학위성의 동력원으로 사용되는 핵 발전로나 열전자 변환기에서 열유속의 변화로 효과적인 열 방출에 이용되어 왔으며, 최근에는 고출력 전자 장비의 냉각, 전동기의 냉각, 산업용 열교환기, 급속 가열기, 냉동 및 공기조화장치, 가정용 냉난방 장치, 지상 및 우주에서의 열 제어 계통, 음향기기의 증폭기 등은 물론 생명공학에까지 무수한 이용 사례를 볼 수 있다. 이와 같은 다양한 응용 예와 에너지 이동의 고 효율성을 가진 써모사이폰은 국내에서는 아직 실용화가 많이 이루어지지 않고 있다. 그리고 써모사이폰의 경사각 변화에 대한 열전달 성능의 변화에 연구보고가 많이 이루어지고 있으며 또한, 다양한 작동 유체의 종류에 대한 연구보고가 요구되고 있다. 이 외에 써모사이폰의 기하학적 형태, 용기의 재질, 유체의 물성, 봉입율, 열유속 및 내부압력 등 써모사이폰의 작동에 관련된 많은 변수들에 관하여 정립하는 것이 요구되고 있다.

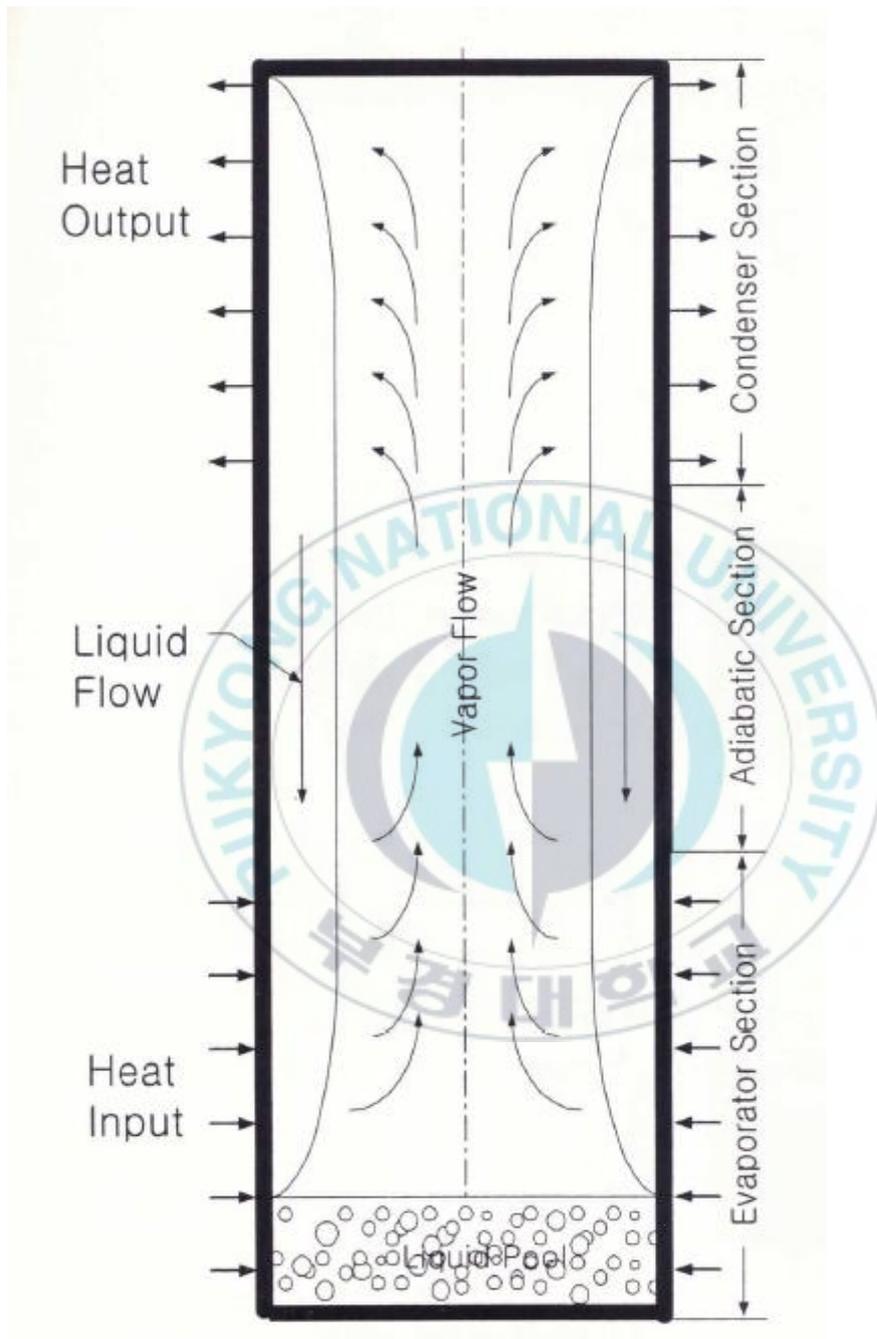


Fig. 1.2 Schematic of a closed, gravity assisted, two-phase thermosyphon

1.2.3 배터리 냉각 시스템 연구동향

Fig. 1.3에서 확인할 수 있듯이 전 세계적으로 2020년에는 전기자동차가 전체 자동차 중 20% 정도 보급될 것으로 전망된다. 전기자동차 보급의 증가에 따라 각 완성차 회사에서는 더 많은 주행거리를 가진 차량을 보급하기 위해 동일 체적에 더 많은 배터리를 집적하고 있다. 기존의 배터리 팩의 냉각 방식에는 공랭과 수랭을 적용하여 대응하고 있다. 하지만 공랭식은 냉각을 위한 체적이 증가하게 되며 이는 곧 팩 전체의 체적 증가로 이어진다. 수랭의 경우 좁은 유로로 인한 냉매의 압력손실을 보완하기 위해 냉매 순환 펌프에서 많은 전력을 필요로 하며, 전력 소모로 인한 주행거리 감소의 단점을 가진다.

이에 단점을 보완하기 위해 상변화 물질(phase change material, PCM)을 적용한 배터리 냉각 기술이 연구되었다. 2004년에는 S.Al-Hallaj et al.이 Fig. 1.4와 같은 녹는점(melting point)이 41~ 44°C인 PCM과 흑연 폼(graphite foam)을 이용하여 18650 배터리를 냉각하기 위한 팩을 개발하였다. 이러한 냉각 시스템은 팩 전체의 질량이 증가하게 되는 단점이 존재하며, 이를 극복하기 위해 2014년에 Charles-Victor Hemery에 의해 배터리를 케이스로 감싸 PCM을 접촉시키는 방법이 연구되었다. 하지만 PCM을 냉각하기 위해 공랭 구조가 필요하였고, 체적이 증가하는 단점이 발생하였다. 이러한 이유로 히트파이프와 냉각 채널을 이용하여 좁은 체적에 많은 배터리를 집적하기 위한 다양한 연구가 시도되었다.

히트파이프는 앞서 언급한 것과 같이 열전달을 위한 동력을 필요로 하지 않는다. 2013년에 Z. Rao et al.은 이러한 장점으로 OHP를 적용한 배터리 냉각 시스템에 대한 연구를 수행하였다. Q. Wang et al.은 2014년에 Fig. 1.5와 같이 일반적인 히트파이프를 이용한 배터리 냉각 시스템을 설계하였다. 실험을 통하여 배터리 당 공급된 열량이 10W 이하에서는 배터리 표면 온도가 40°C 이하로 유지됨을 확인하였다.

연구 동향에서 확인할 수 있듯이 히트파이프를 적용한 냉각 시스템은 기존의 냉각 방식 대비 동일하거나 우수한 효과를 나타낸다. 또한 전력 소모의 최소화, 동일 체적에 더 많은 배터리를 집적할 수 있는 장점 등으로 기존 냉각 방식 대비 효율이 우수하다.

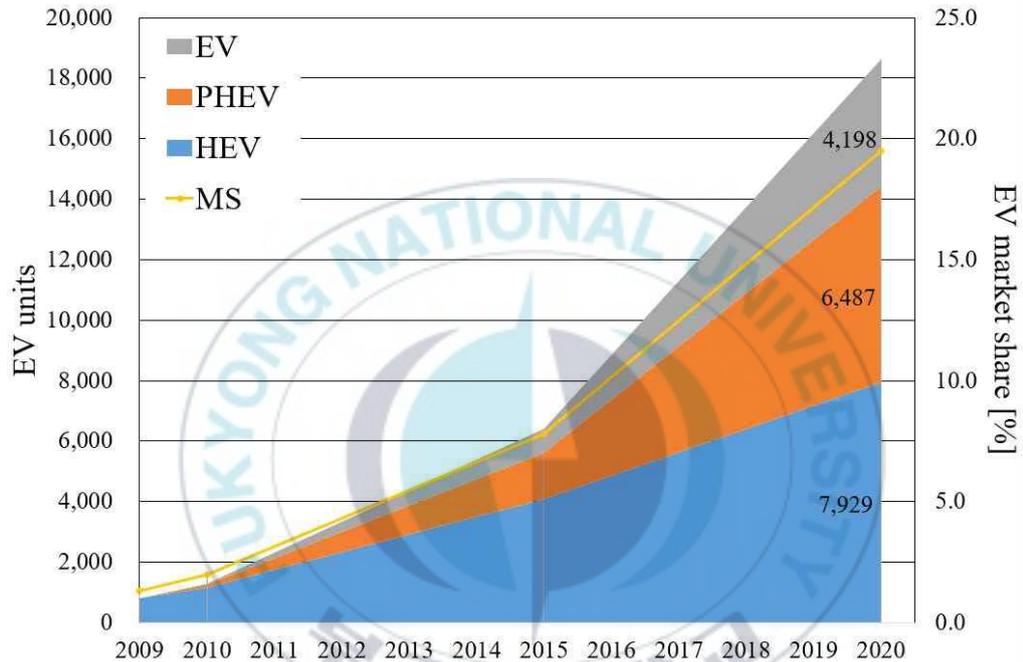


Fig. 1.3 Global EV demand forecast



Fig. 1.4 Battery Module with PCM/graphite thermal management

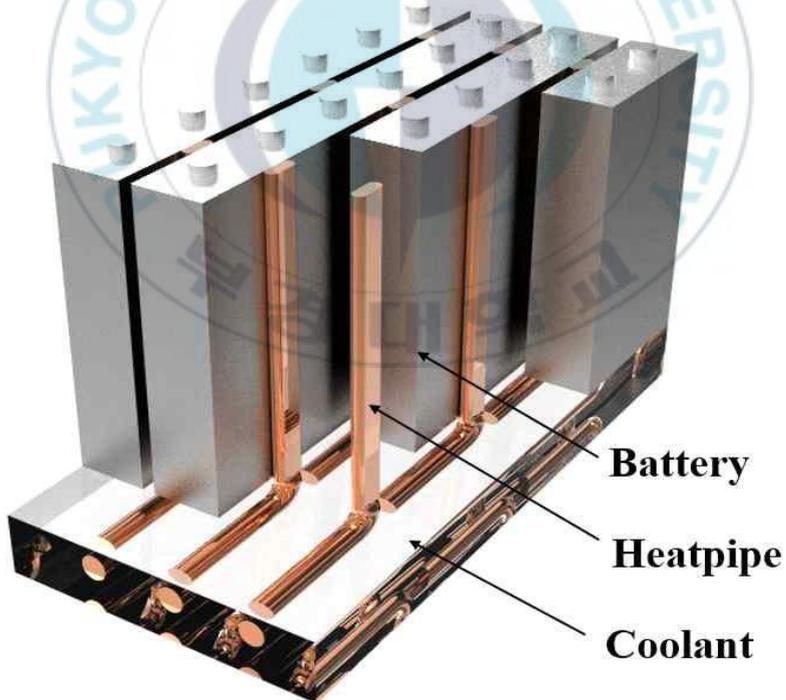
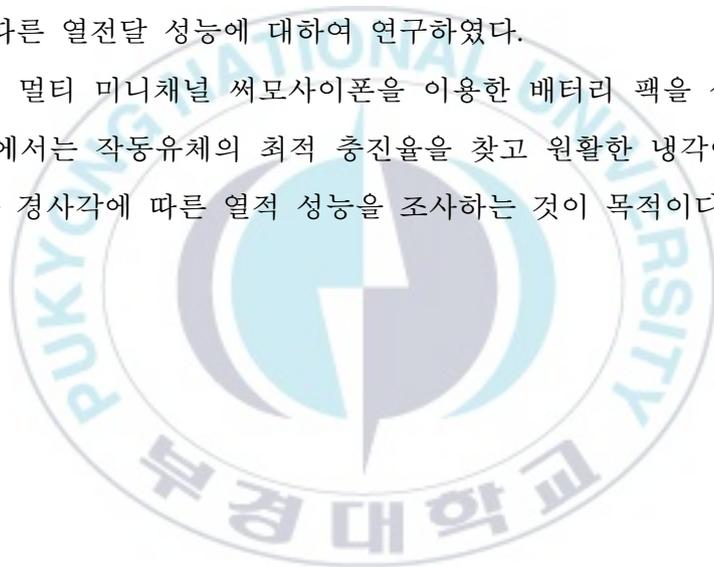


Fig. 1.5 Heat pipe battery thermal management system demonstration

1.3 연구 목적

배터리의 열을 냉각채널로 이동시키기 위한 열전달 장치인 히트파이프는 앞서 배터리 냉각시스템 연구 동향에서 작성한 것과 같이 우수한 열전달 성능을 가지고 있다. 하지만 OHP는 여러 개의 채널이 하나로 연결되어 있어 채널 일부가 손상되면 채널 안의 모든 작동유체가 소실되어 냉각 역할을 제대로 하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 평판형 멀티 미니채널 써모사이폰을 전기 자동차 배터리 냉각시스템에 적용을 위해 OHP의 단점을 극복하고 작동유체 하나를 선정하여 충진율, 열유속, 작동 경사각의 3가지 변수를 조사하여 각 변수에 따른 열전달 성능에 대하여 연구하였다.

최종적으로 멀티 미니채널 써모사이폰을 이용한 배터리 팩을 설계하기 위해서 본 연구에서는 작동유체의 최적 충진율을 찾고 원활한 냉각이 이루어지는 지 열유속과 경사각에 따른 열적 성능을 조사하는 것이 목적이다.



제 2 장 실험장치 및 방법

2.1 Thermosyphon의 변수와 작동유체 선정

써모사이폰이 안정된 상태에서 작동할 때의 열 이송 경로와 써모사이폰 내부 작동유체의 상변화 및 유동상태는 Fig. 2.1에 도시되어 있다. 그리고 Fig. 2.2는 증발부에서 작동유체의 유동현상을 나타낸다.

증발부에 열부하를 가하면 용기 하단으로부터 액상의 작동유체가 비등을 일으켜 기화되고, 증기가 응축부로 이송된다. 응축부의 냉각된 벽면 위에서 작용하는 중력 등의 체적력에 의해 관 벽을 따라 증발부로 되돌아오게 된다. 이 과정이 연속적으로 진행됨에 따라 용기의 하단으로부터 상단으로 열전달이 이루어지게 된다. 이러한 열전달 과정에서는 작동유체를 구동하는데 외부로부터 일의 공급은 없으며, 이 부분이 써모사이폰이 기존의 대류 열전달 장치와 다른 점이다. 써모사이폰의 열전달 과정이 기-액 상변화에 의존하기 때문에 양단 사이의 온도차가 적으며, 따라서 써모사이폰의 열전도는 동일한 형상의 고체 물질에 비하여 수천 배의 열전도를 갖는다. 그러나 써모사이폰의 열전달 특성은 내부 작동유체의 비등 메커니즘과 액막 및 증기 유동에 의해 크게 영향을 받게 되며, 따라서 써모사이폰의 길이, 직경, 설치 경사각, 작동유체 충전율, 열유속, 증기압, 작동유체의 물성 등이 열전달율을 결정하는 중요한 인자가 된다. 그 동안 이렇게 써모사이폰의 작동에 영향을 미치는 관련 인자들과 열전달 메커니즘 및 유동사이의 상관 관계에 대해 많은 연구들이 진행되어 왔다. 이들에 대한 연구를 간략히 설명하면 다음과 같다. 먼저 증발부의 기화 열전달 메커니즘은 액체 풀에서 핵 비등이, 그리고 환상 액막이 존재하는 구간에서는 대류비등이 발생한다. 가시화 연구에 의하면 봉입율이 5% 미만인 경우에는 대류비등이 지배적 비등 메커니즘이다. 그러나 이 이상의 충전율에서는

핵비등이 지배적인 비등 메커니즘이다. 한편 증발부 벽면 위에서 응축액막이 하강하면서 일부가 기화한다. Andros와 Florschütz의 가시화 연구에 의하면 벽면 위에서 하강하는 액막유동 형태는 열유속의 크기에 따라 다르다. 액막 유동율이 큰 경우에는 액막 두께가 원주방향으로 균일한 유동을 이루고 있으나 작은 액막 유동율에서는 증발부 벽면을 균일하게 적시지 못하고 수 개의 줄기형상의 흐름을 이루며, 이것을 리브릿 유동이라 부른다. 그 외에 기-액 계면에서 액막 유동율의 불안정에 의하여 파형 유동이 발생되고 액막의 일부가 액적 상태로 증기 유동장내로 흡입되는 현상이 발생하며, 열전달율을 저하시키는 요인이 된다. 이와 같이 써모사이폰 내부에서는 2상 유동 형태에 따라 작동 성능이 변화하는 다양한 모델이 연구되었다. 응축부의 열전달 메커니즘은 증발부에 비하여 단순하다. 응축된 액체는 응축부 벽면을 따라 중력에 의해 액막을 이루며 하강하며, 일반적으로 Nusselt의 응축모델을 적용하여 근접된 결과를 얻고 있으며, 기하학적 조건들과 열유속을 고려하여 수정계수를 도입한 여러 형태의 상관식들이 이용되고 있고, 역류 응축에 대한 많은 연구들이 수행되었다.

기포가 성장하여 적절한 크기에 도달하면 기포는 표면으로부터 이탈된다. 이때 기포를 이탈시키는데 관련된 힘의 성분은 부력, 유체역학적 항력, 표면장력, 관성력 등이 있다. 한편 이탈에 필요한 기포의 크기에 관련되는 인자들은 공동의 크기에 따라 서로 차이가 있다. 작은 공동에서는 액체의 관성력과 부력이 큰 공동에서는 기포의 성장속도 감소로 부력과 표면장력에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 여기에 기포의 성장률과 형태는 표면과 열 접촉각의 영향을 받는다. 이를 기초로 부력과 표면장력의 평형으로부터 기포의 이탈 크기를 결정할 수 있으며, 여러 연구자들의 연구결과가 있다. 대부분의 연구결과들은 식(1) Bond Number, (Bo)의 함수로 표현하고 있다.

$$Bo = g \frac{(\rho_l - \rho_v) D^2}{\sigma} \dots\dots\dots (1)$$

g : 중력가속도 [m/s^2]

σ : 표면장력 [N/m]

ρ : 작동유체의 밀도 [kg/m^3]

D : 직경 [m]

작동유체는 Novec-7100을 사용하였다. Table. 2를 보면 다른 CFC, HCFC 냉매에 비해서 오존층 파괴지수(ODP)가 0이고 지구 온난화지수(GWP)가 현저히 낮으며 대기중 수명시간(lifetime)도 짧아 환경문제에 있어서 매우 적합하다. 인체에 유해물질도 해당되지 않아 Novec-7100을 사용하였다.

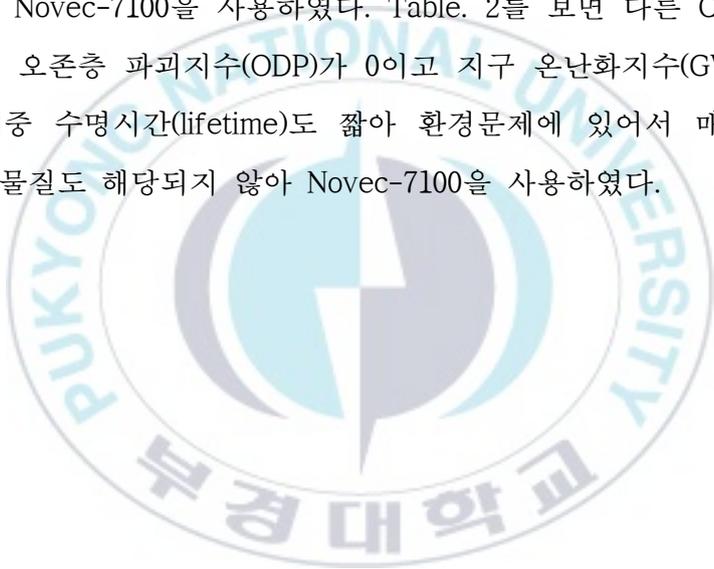


Table 2 Environmental and Safety Properties

Properties	Novec 7100	CFC-113	HCFC-141b
Ozone Depletion Potential-ODP	0.00	0.80	0.10
Global Warming Potential-GWP	320	6000	700
Atmospheric Lifetime (years)	4.1	85	9.2
Flash Point	None	None	None
Flammability Range in Air	None	None	7.6-17.7 ⁴
Exposure Ceiling (ppm)	None	None	None
Acute Toxicity(4hr.LC ₅₀ [Rat])	>100,000	55,000	62,000

2.2 실험 장치

2.2.1 평판형(flat type) 멀티미니 채널 써모사이폰

Fig. 2.1은 본 연구에서 배터리 냉각을 위해 적용한 평판형 멀티 미니 채널 써모사이폰이다. 배터리 팩 내부에서 써모사이폰이 차지하는 체적을 최소화하기 위해 두께 1.6mm의 평판형을 선택하였다. 증발부의 길이는 배터리의 규격과 동일하게 70mm로 설정하였으며, 응축부의 길이는 140mm로 설정하였다. 따로 단열부를 설정하지 않아 증발부와 응축부 두 부분으로 구성되어 있다.

- 채널 재질 : 알루미늄 (Aluminum)
- 채널 크기 : 2.6 mm x 0.6 mm (가로 x 세로)
- 채널 수 : 56개
- 증발부 길이 : 70 mm
- 응축부 길이 : 140 mm
- 써모사이폰 폭 : 170 mm

멀티 미니 채널 써모사이폰과 외부 공기와의 대류를 차단하고 히터와의 접촉 저항을 최소화하기 위해 써멀 컴파운드(thermal compound)를 도포하고 히터에 멀티 미니채널 써모사이폰을 접촉한 후 외부를 단열재로 단열처리 하였다.

Bond number 식(1)을 통해 Chandratilleke 식(2)로 만족하는 것을 볼 수 있다. Chandratilleke 식(2)는 모세관의 수력직경이 임계직경보다 작으면 부력의 영향 대비 표면장력의 영향을 크게 받기 때문에 작동유체가 플러그류를 유지할 수 있다. $d_h : 0.95\text{mm} < d_{cr} : 1.94\text{mm}$

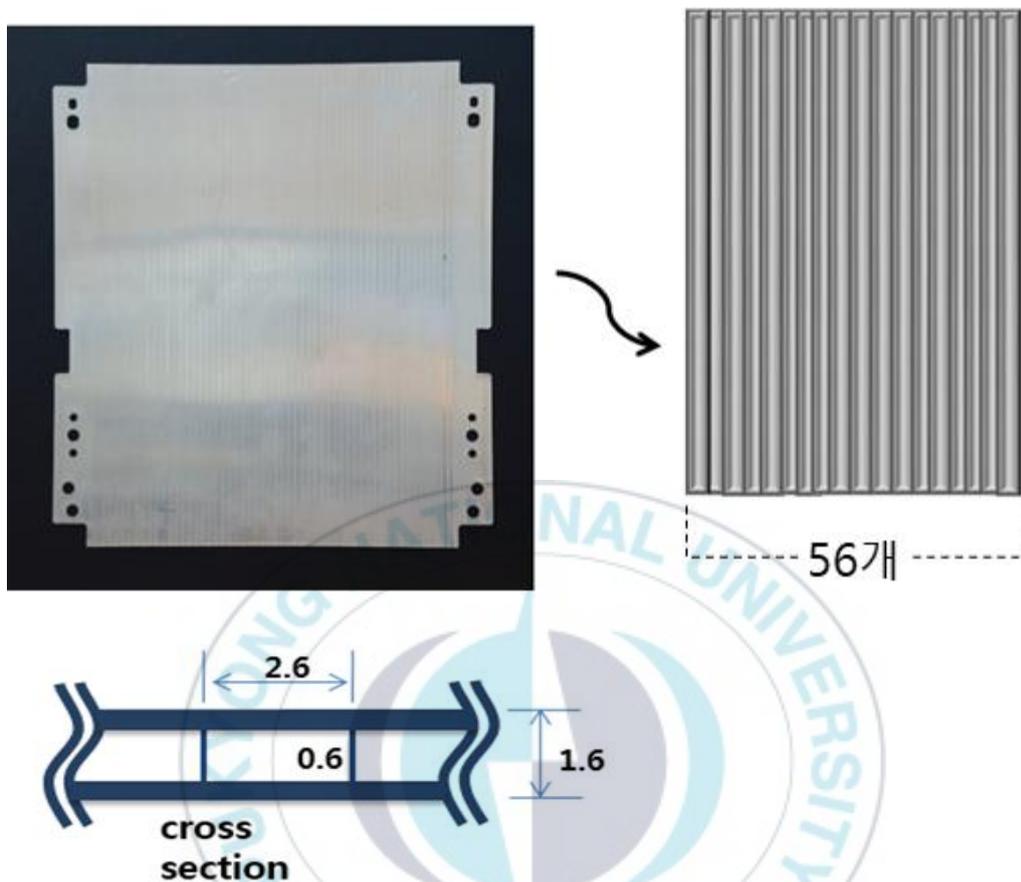


Fig. 2.1 Multi-mini channel thermosyphon

$$d_h < d_{cr} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{liquid} - \rho_{gas})}} \text{ [m]} \dots \dots \dots (2)$$

- g : 중력가속도 [m/s²]
- σ : 표면장력 [N/m]
- ρ : 작동유체 밀도 [kg/m³]
- d_h : 수력직경 [m]
- d_{cr} : 임계직경 [m]

2.2.2 실험 장치

작동특성은 Fig. 2.1의 멀티 미니채널 써모사이폰에 온도 계측장치를 부착하여 공급열량과 시간에 따른 온도를 측정하여 실험을 진행하였다. 또한 추가적으로 열 공급 장치, 파워 미터, 데이터 수집 장치로 구성된다. Fig. 2.2은 전체 실험장치의 구성을 개략적으로 보여준다. 모든 실험에 사용된 멀티 미니채널 써모사이폰은 각 채널이 close loop 구조를 가지고 총 56개의 채널로 구성되어 있다.

배터리 발열에 따른 냉각 성능 실험에서 배터리를 열원으로 사용하는 경우 폭발 등의 위험이 존재한다. 따라서 평판 배터리의 발열을 평판형(flat type) 실험에서는 평판형 히터(70 x 210 mm, DC 12 V, 50 W)를 열 공급 장치로 사용하였다. 평판형 히터는 직류 전원 공급 장치(DC power supply)에 의해 가열된다.

냉각장치는 따로 없으며, 증발부를 전체 크기의 1/3으로 설정하였으며, 단열부는 따로 두지 않고 증발부와 응축부 2개로 구성하였다. 응축부의 냉각 방식은 실외 기준 20~ 21℃ 기준 조건의 자연대류 방식을 채택하였다.

온도 계측 장치로는 T-type 열전대(thermocouple)와 요코가와 MX-100을 사용하였다. Fig. 2.2와 같이 멀티 미니채널 써모사이폰의 중심에 위치한 채널을 기준으로 증발부와 응축부를 각각 균등하게 4등분 하여 총 5 지점의 온도를 측정하였다. 본 연구에서 사용한 T-type 열전대의 오차는 $\pm 0.75\%$, MX-100의 오차는 $\pm 0.05\%$ 이다.

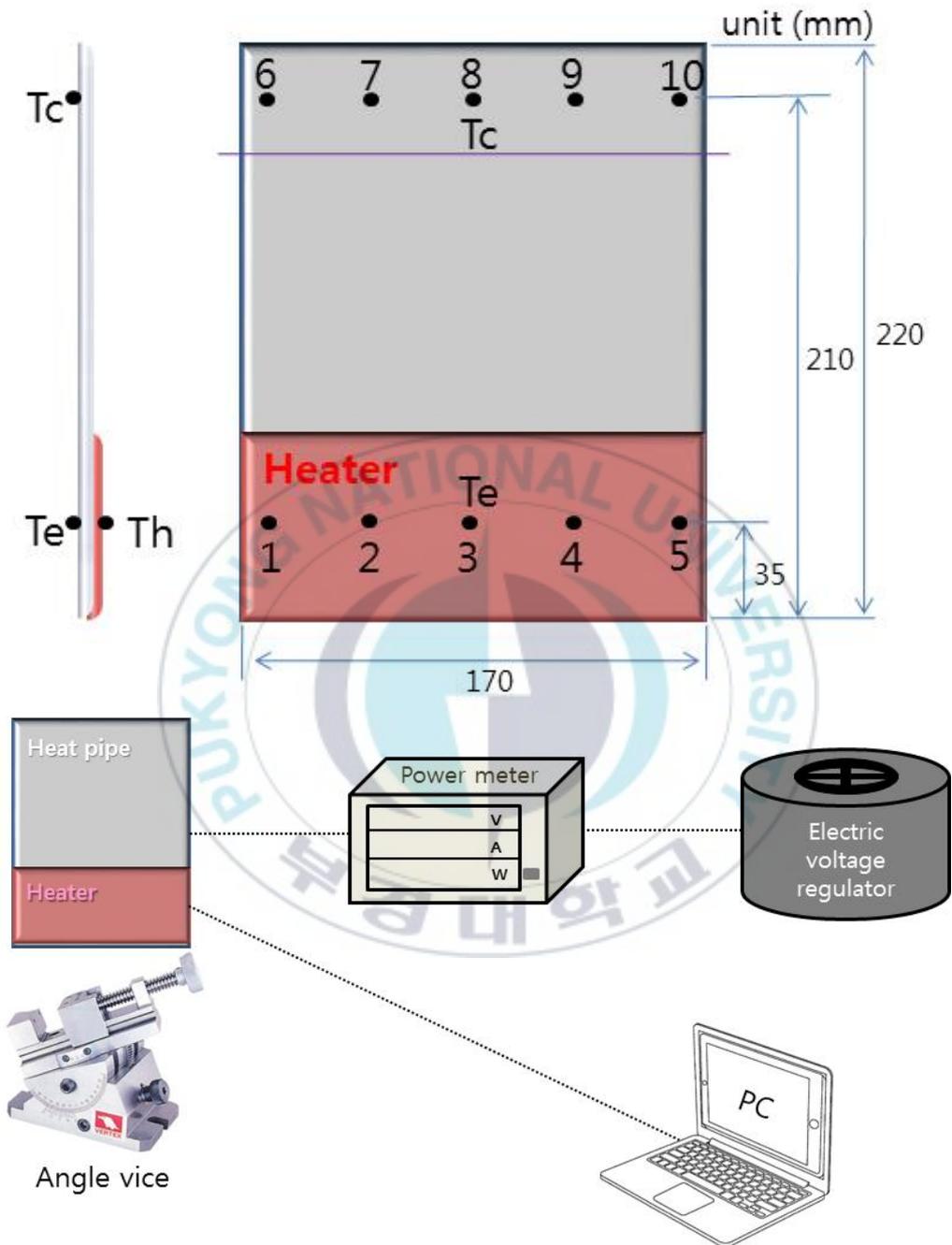


Fig. 2.2 Schematic of experimental setup

2.2.3 실험 조건

공급열량의 경우 일반적인 리튬이온배터리의 급속 방전시의 발열량인 입열량 6W를 기준으로 하였으며, 열폭주 현상의 방지를 위해 입열량 14W의 경우 작동특성을 확인하였다. 써모사이폰은 내부 작동유체의 끓는점(boiling point)을 낮춰 작동을 원활하게 하기 위해 관 내부에 진공을 설정한다. 본 연구에서는 작동 특성을 비교하기 위해 관 내부의 진공도를 10^{-2} torr로 설정하여 실험을 진행하였다.

- 공급열량 : 6W, 14W
- 진공도 : 10^{-2} torr

각 변수에 따른 최적 충전량 조건을 찾기 위해 충전율, 경사각, 열유속 3가지 변수에 대한 실험을 진행하였다. 충전율에 따른 작동특성은 20%, 40%, 60%의 총 3가지를 비교하였으며, 경사각은 피칭, 롤링, 요잉 $0\sim 90^\circ$ 의 경우를 비교하였으며, 입열량은 6W, 14W로 실험을 진행하였다. 응축부의 냉각온도는 $20\sim 21^\circ\text{C}$ 로 고정하였으며, 길이에 대한 변화는 없다. 각 경우에 따른 작동특성 비교를 위한 실험조건은 Table. 3에 나타내었다.

Table 3 Experimental condition

Parameter		Specification
Material		Aluminum
Working fluid		Novec-7100
Charging ratio [% vol.]		20, 40, 60
Type		Thermosyphon
Total size [mm]		170 x 210 x 1.6
Inner channel	Number	56
	Size [mm]	2.6 x 0.6
Heater	Input power [W]	6, 14
	Size [mm]	170 x 70

2.2.4 실험 방법

앞서 장치 설명과 같이 증발부는 히터를 통해 가열하고 상단의 응축부를 자연대류를 통해 열을 제거한다. 각각의 온도 측정 부분은 Fig 2.2와 같으며 실험 순서는 다음과 같다.

1. 멀티미니 채널 써모사이폰의 측정부위에 열전대를 설치하고 각 채널에 접지한다.
2. 히터의 접촉 가열면에 써멀 컴파운드를 도포하여 멀티미니 채널 써모사이폰을 접촉시킨 후 자연대류 손실 방지를 위해 단열재로 단열한다.
3. DC 전원 공급 장치를 통해 조건에 맞는 열량을 공급한다.
4. 일정한 공급 열량으로 앵글바이스를 이용하여 조건에 맞는 경사각을 조절한다.
5. MX-100을 이용하여 1초당 1회 온도를 기록한다.
6. 정상상태에 도달할 때까지 계속 가열하며 정상상태 도달 시 10분 후 실험을 정지한다.

정상상태의 기준은 실험에서 측정 종료 지점부터 1분 전까지의 온도 평균이, 종료 지점부터 10분 전을 기준으로 1분 전의 온도 평균과 동일한 경우로 실험을 진행하였다. 멀티미니 채널 써모사이폰의 성능의 기준인 유효 열전도율을 계산하기 위해서 실험 종료 지점부터 10분 전까지의 증발부 및 응축부 측정온도의 평균값을 사용하였다.

Fig. 2.3은 각 피칭(pitching), 롤링(rolling), 요잉(yawing) 경사각을 나타낸 것이다. 각 경사각에 대한 용어는 Fig 2.3을 통해서 설명한다.

- 피칭(pitching) : 위 그림에서 빨간색 축 중심의 회전운동
차량의 앞, 뒤가 시소처럼 상하로 움직이는 모습
- 롤링(rolling) : 위 그림에서 녹색선 축 중심의 회전운동
곡선 주행 시 바깥쪽으로 차가 기울어지는 모습
- 요잉(yawing) : 위 그림에서 파란색 축 중심의 회전운동
차량 앞, 뒤가 물고기 헤엄치듯이 좌/우로 움직이는 모습

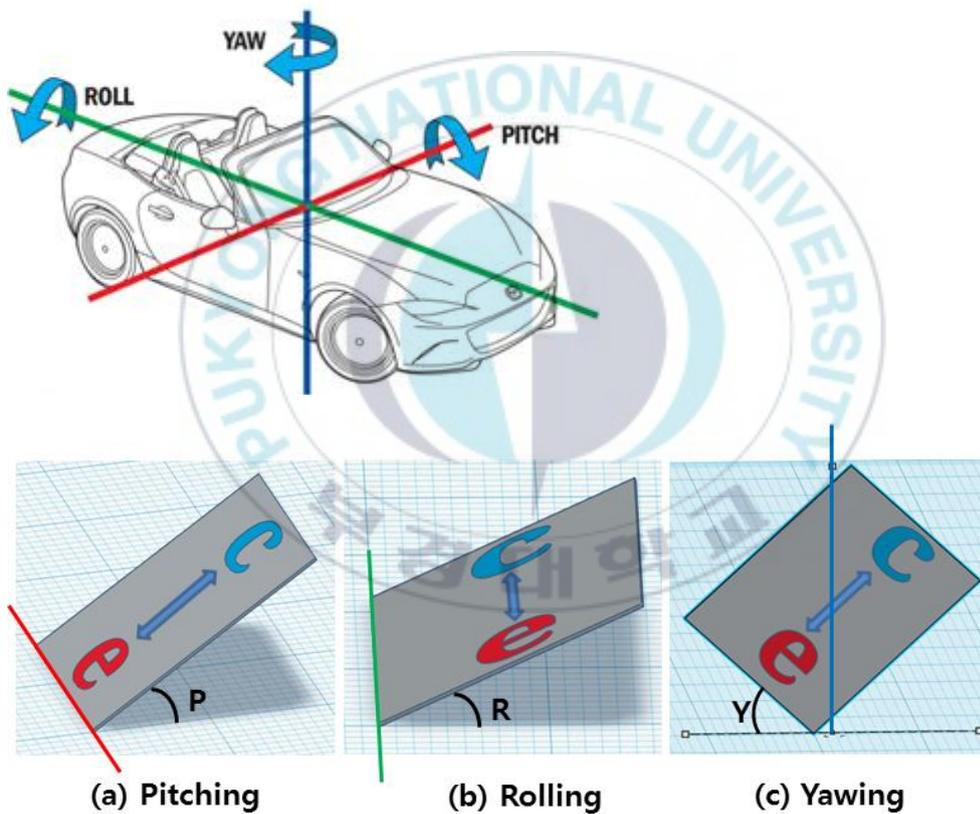


Fig. 2.3 Pitching, Rolling and Yawing angles mode

열 성능 지표는 식(3) 유효 열전도율 값을 계산하여 사용하였다.

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L}{A_c \cdot \Delta T_{ec}} W/(m \cdot K) \dots \dots \dots (3)$$

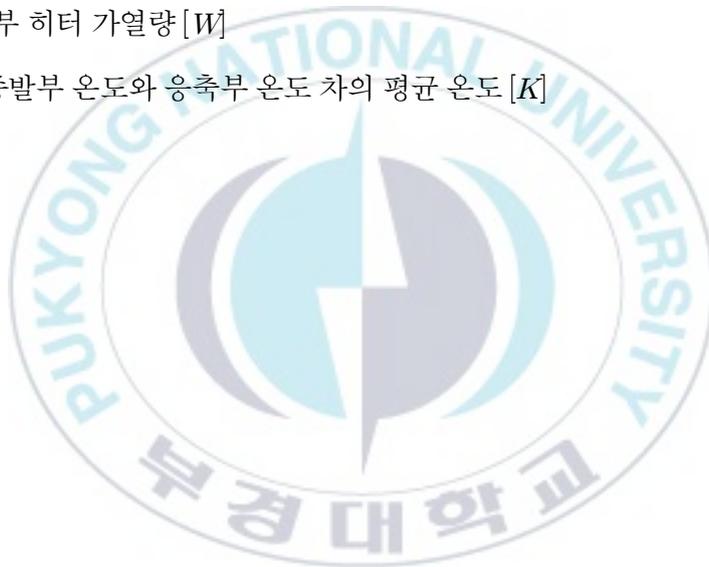
k_{eff} : 유효 열전도율 [$W/(m \cdot K)$]

A_c : 써모사이폰의 단면적 [m^2]

L : 증발부와 응축부 온도 측정점간 거리 [m]

Q : 증발부 히터 가열량 [W]

ΔT_{ec} : 증발부 온도와 응축부 온도 차의 평균 온도 [K]



제 3 장 실험결과

3.1 충전율에 따른 작동 특성

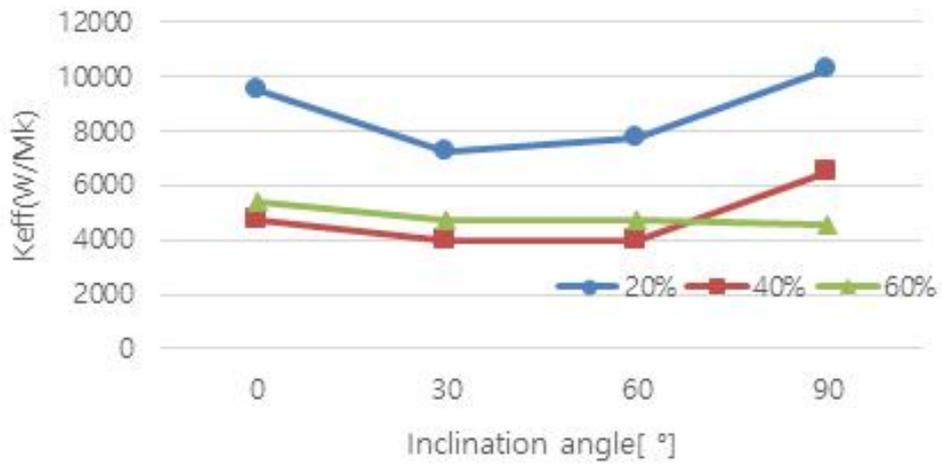
작동유체의 최적 충전율에 따른 작동특성과 시스템 전체의 냉각 성능을 비교하였다. 충전율의 경우 설계된 멀티 미니채널 써모사이폰의 형상에 따라 최적 값이 다르므로 20%, 40%, 60% 3가지로 각각 비교하였다. 냉각 성능을 작동시점 기준으로 봤을 때, 피칭의 경우 Fig. 3.1(a)로부터 충전율 20% 일 때, 유효 열전도율 값은 9000~ 10500W/(mK)이고 충전율 40%, 60%일 때, 유효 열전도율 값은 3500~ 5000W/(mK)이다. 롤링의 경우 Fig. 3.1(b)로부터 충전율 20% 일 때, 유효 열전도율 값은 10000~ 11000W/(mK)이고 충전율 40% 일 때, 유효 열전도율 값은 6000W/(mK)이고 충전율 60% 일 때, 4000~ 5000W/(mK)이다. 요잉의 경우 Fig. 3.1(c)로부터 충전율 20% 일 때, 유효 열전도율 값은 7500~ 10000W/(mK)이고 충전율 40%, 60%일 때, 유효 열전도율 값은 4000~ 6000W/(mK)이다. 충전율 20%가 다른 충전율 40%, 60%보다 유효 열전도율 값이 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. Fig. 3.2도 마찬가지로 (a), (b), (c)를 통해 충전율 20%가 다른 충전율 40%, 60%보다 유효 열전도율 값이 월등히 높은 것을 알 수 있다. 실험에서 충전율에 따른 열성능 차이가 나는 이유는 작동유체의 높이만큼 증발부, 하단부에 압력이 상승하여 핵 비등을 약화시키고 충전액 수위가 증가한 만큼 충전율 40%, 60%는 충전율 20%의 경우보다 응축면적이 축소되기 때문이다.



(a) Pitching, ($q=450W/m^2$)



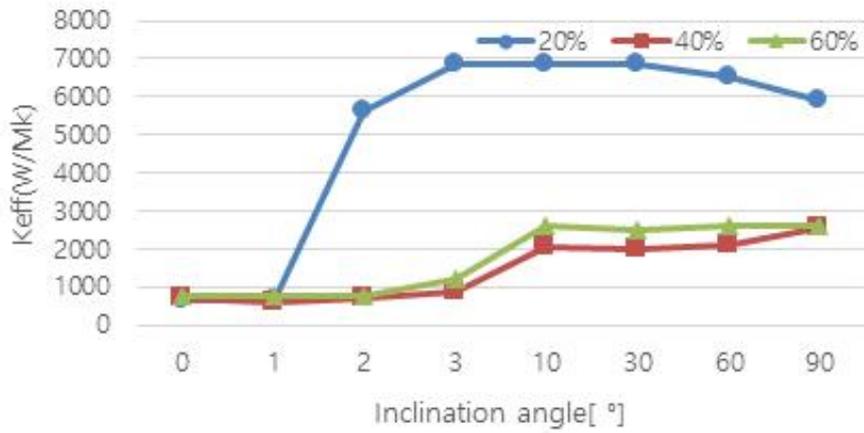
(b) Rolling, ($q=450W/m^2$)



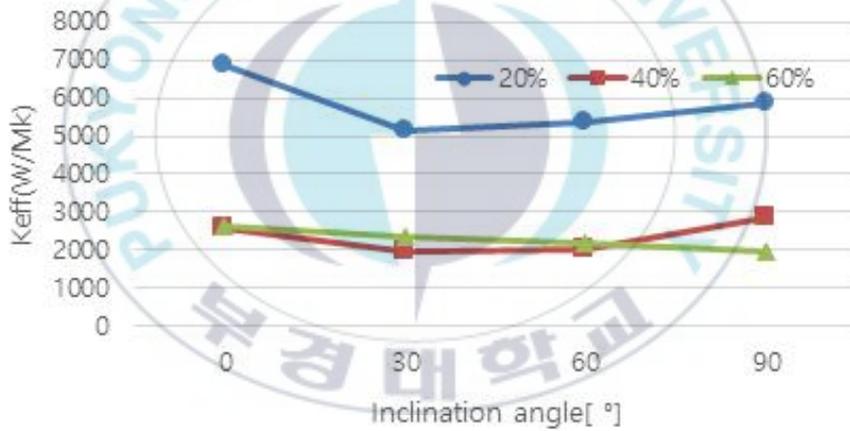
(c) Yawing, ($q=450\text{W/m}^2$)

Fig. 3.1 The effective thermal conductivity profile according to charging ratio ($q=450\text{W/m}^2$)

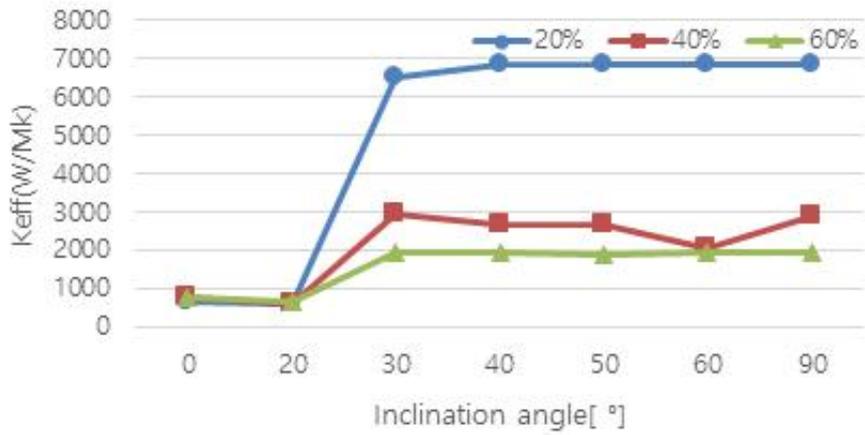




(a) Piting, (q=1000W/m²)



(b) Rolling, (q=1000W/m²)



(c) Yawing, ($q=1000\text{W/m}^2$)

Fig. 3.2 The effective thermal conductivity profile according to charging ratio ($q=1000\text{W/m}^2$)

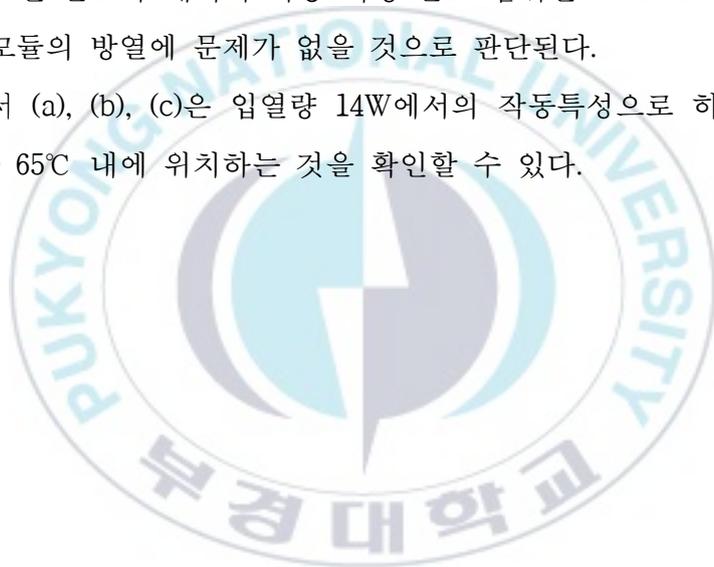


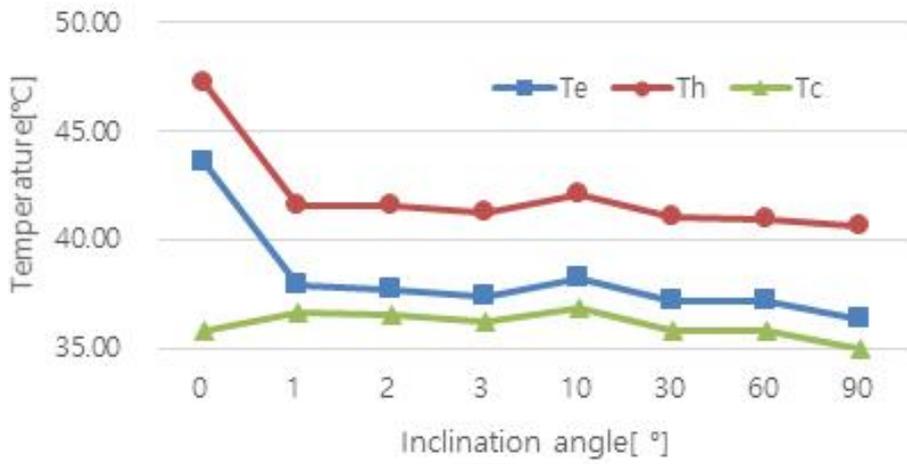
3.2 열유속에 따른 작동 특성

평판형 멀티 미니채널 써모사이폰의 작동특성 실험을 통해 작동유체의 증진율에 대한 최적 변수를 이용하여 입열량 6W와 14W에서의 냉각 특성을 확인하였다. 증발부 온도는 Fig. 2.2에서 T1~T5의 측정온도 평균값, 응축부 온도는 T6~T10의 측정온도 평균값, 히터 온도는 T11의 측정온도 값을 사용하여 특성을 비교하였다.

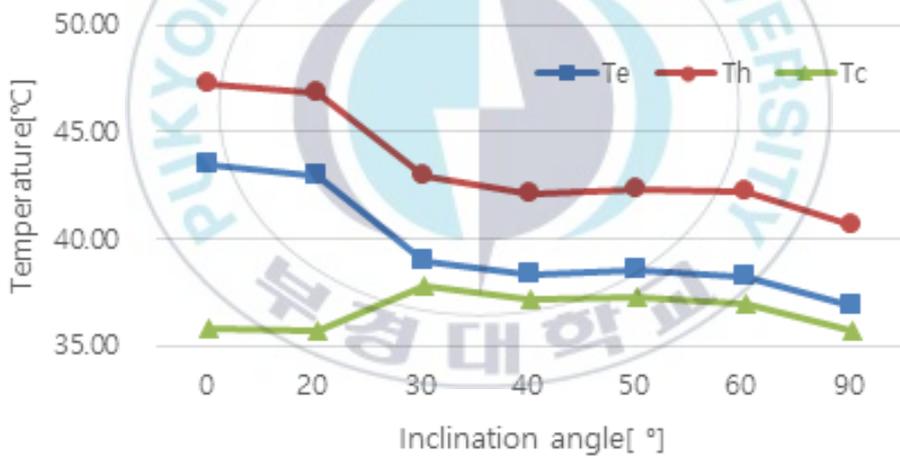
Fig. 3.3에서 (a), (b), (c)은 입열량 6W의 결과로서 각 피칭, 롤링, 요잉에 대해 히터의 표면 온도가 배터리 작동 적정 온도 범위인 0~ 50°C 내에 위치하므로 배터리 모듈의 방열에 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 3.4에서 (a), (b), (c)은 입열량 14W에서의 작동특성으로 히터의 표면 온도가 약 60~ 65°C 내에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

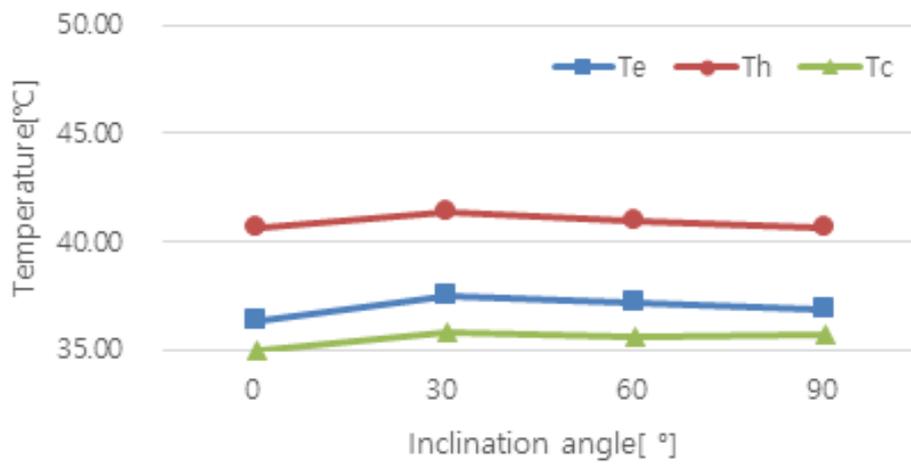




(a) Pitching, (CR=20%)

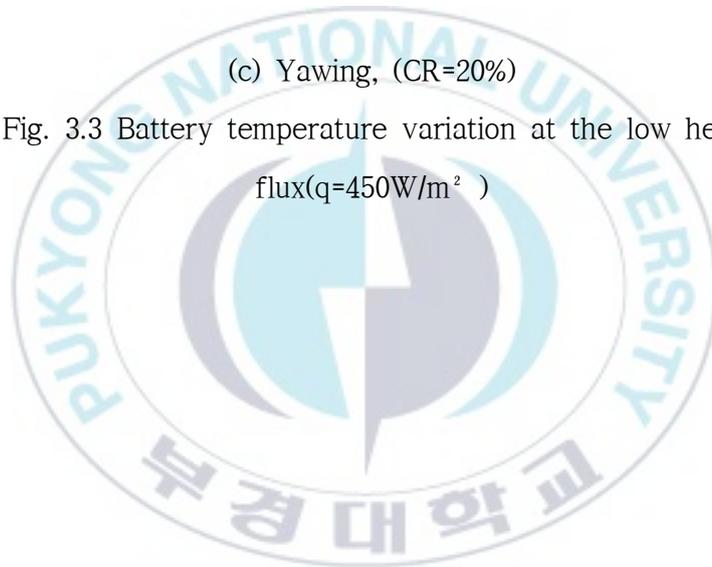


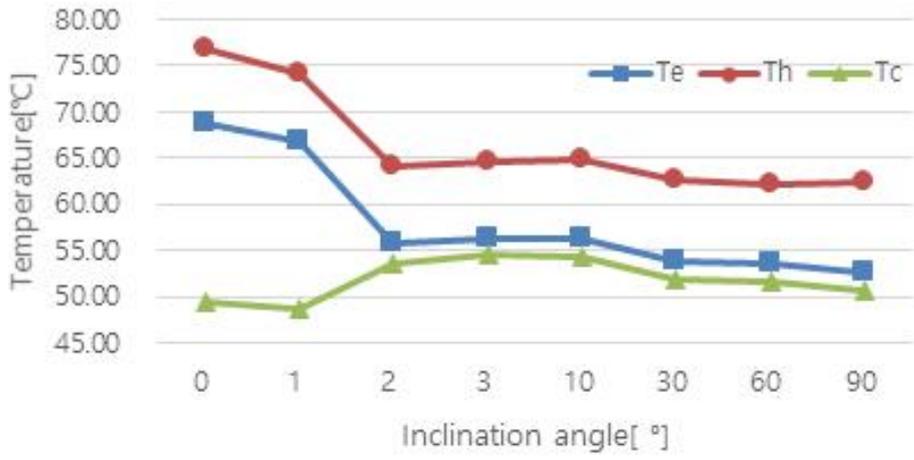
(a) Rolling, (CR=20%)



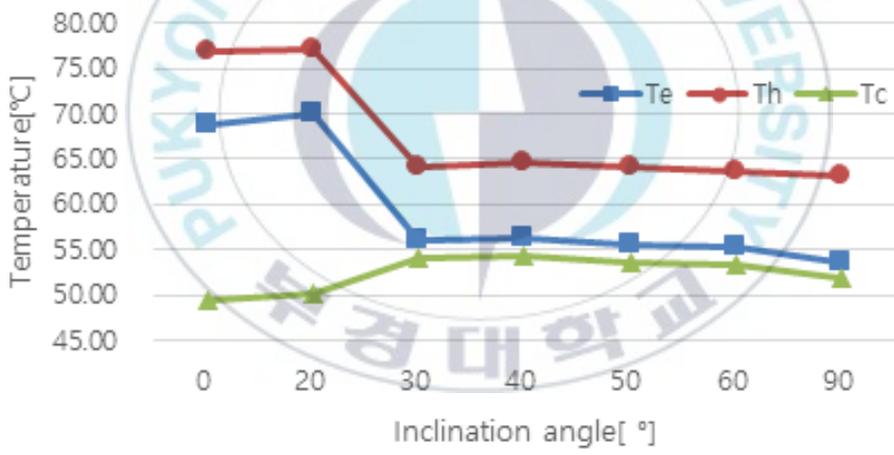
(c) Yawing, (CR=20%)

Fig. 3.3 Battery temperature variation at the low heat flux($q=450\text{W/m}^2$)

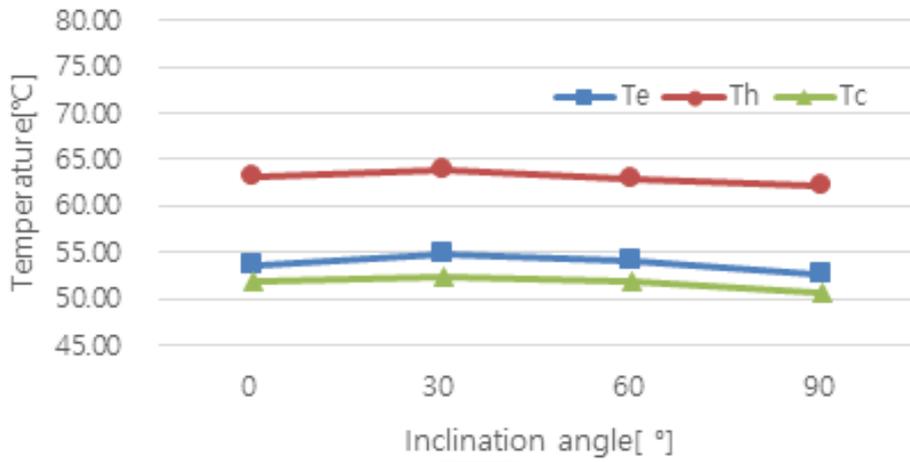




(a) Pitching, (CR=20%)



(b) Rolling, (CR=20%)



(c) Yawing, (CR=20%)

Fig. 3.4 Battery temperature variation at the high heat flux ($q=1000\text{W/m}^2$)

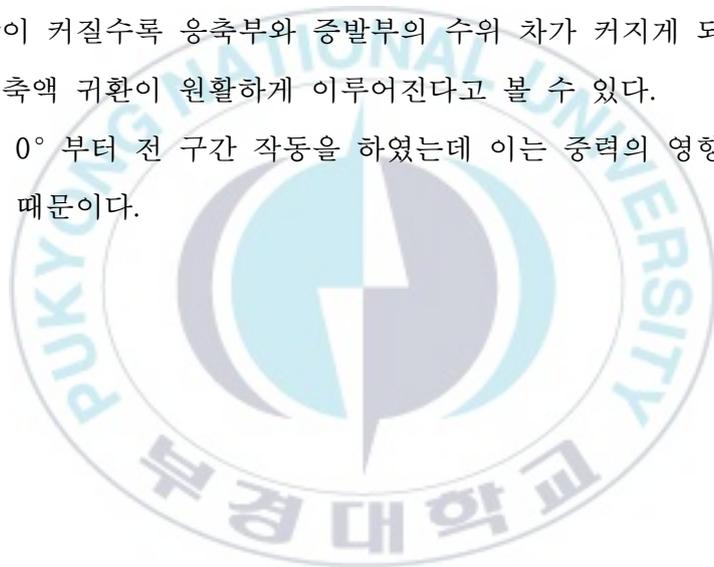


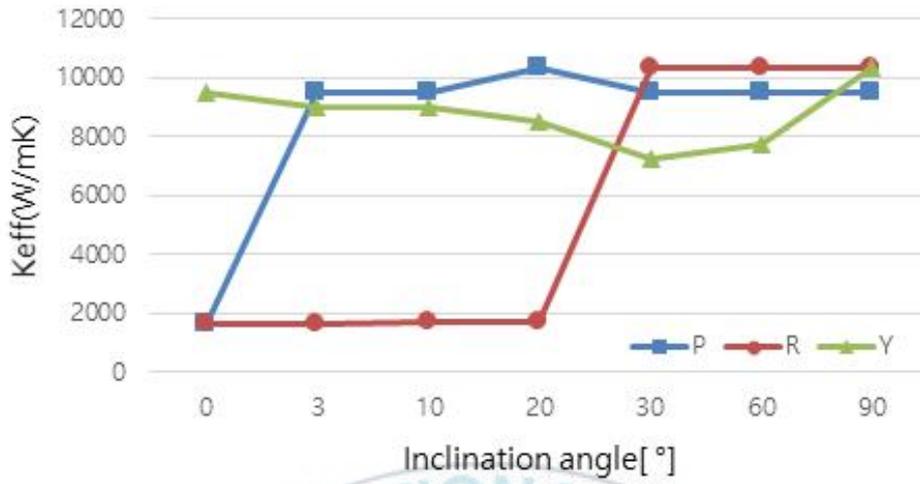
3.3 경사각에 따른 작동 특성

작동 경사각은 Fig. 2.3을 기준으로 하여 피칭, 롤링, 요잉에 대한 특성을 분석하였다. Fig. 3.5(a), (b)를 통해 피칭에서는 3° 에서부터 작동하기 시작하였다. 이는 써모사이폰의 특성상 중력이 주요 구동원이므로 수평에서는 작동하지 않고 작동하기 위한 최소 경사각이 3° 임을 확인할 수 있었다.

롤링은 30° 에서부터 작동하였는데 피칭 경사각에서 보면 수평상태에서 좌우로 회전하는 것이기 때문에 롤링 $0\sim 90^\circ$ 구간은 수평구간이라 볼 수 있다. 하지만 Fig. 3.6에서 각 채널의 aspect 비가 약 4.3으로 매우 편평한 형태의 경우 롤링 경사각이 커질수록 응축부와 증발부의 수위 차가 커지게 되고 일정 각도 이상부터 응축액 귀환이 원활하게 이루어진다고 볼 수 있다.

요잉에서는 0° 부터 전 구간 작동을 하였는데 이는 중력의 영향을 충분히 받는 조건이기 때문이다.





(a) CR=20% (q=450W/m²)



(b) CR=20% (q=1000W/m²)

Fig. 3.5 Effect of Inclination angle on k_{eff}

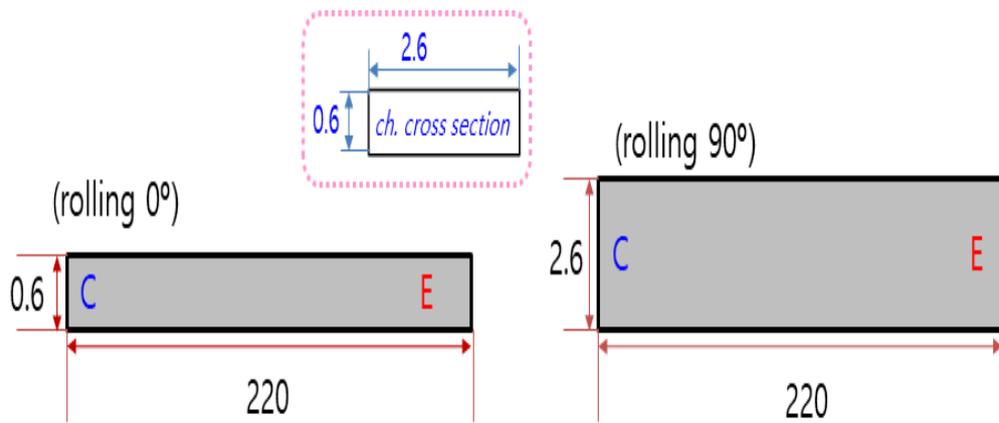
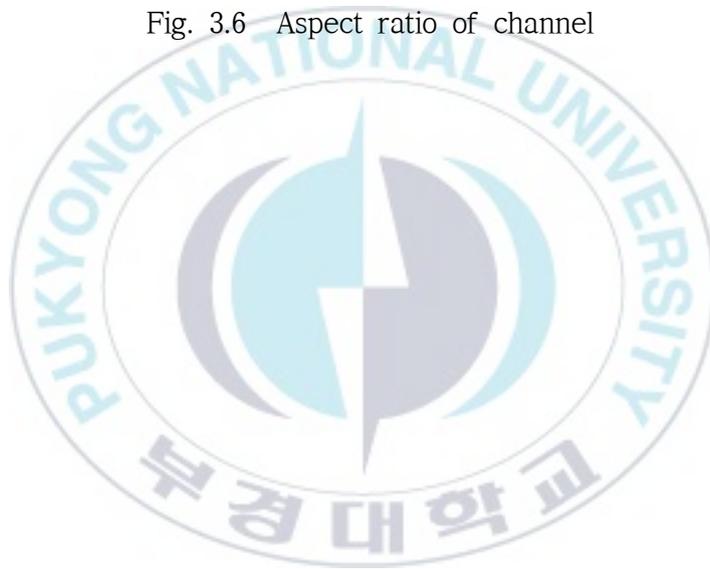


Fig. 3.6 Aspect ratio of channel



제 4 장 결론

본 연구는 전기 자동차의 배터리 팩의 열 집중현상을 해소하고 배터리의 고 집적화 조건에 맞는 멀티 미니채널 써모사이폰을 사용하여 각 형 배터리팩에 적용하였다. 최적 냉각 성능을 얻기 위해 멀티 미니채널 써모사이폰의 최적 충전율을 분석하였으며, 경사각에 따른 열 성능을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 증발부가 하단에 위치하는 본 연구의 멀티 미니채널 써모사이폰 형상에서는 최적 충전율은 20%로 측정되었다. 작동유체가 40% 이상 충전되는 경우 자중의 영향으로 하단의 증발부에 작동유체가 액으로 밀집되어 핵비등 발생이 충분히 이루어지지 않고 응축부 면적이 감소되어 작동을 원활히 못하는 것을 확인하였으며, 수직 경사각 뿐만 아니라 90° 내의 모든 경사각에서도 적용되는 것을 알 수 있었다.

(2) 충전율 20%의 멀티 미니채널 써모사이폰은 열유속이 450W/m² 일 때, 배터리 표면 온도가 40~ 45℃로 유지되었고, 열유속 1000W/m² 일 때, 60~ 65℃로 유지되었다. 이는 배터리 표면 온도 조건 범위 내로 실제로 배터리 팩 냉각에 있어서 적용이 가능하다고 볼 수 있다.

(3) 충전율 20%, 열유속 450W/m² , 1000W/m² 기준으로 각 피칭, 롤링, 요잉에 대하여 멀티 미니채널 써모사이폰이 작동하기 위한 최소 조건은 피칭일 때, 3° 이상, 롤링일 때, 30° 이상, 요잉은 0° 부터 작동하였다.

(4) 멀티 미니채널 써모사이폰에서 경사각의 한계조건은 응축부 쪽을 3~ 5° 밴딩하여 중력의 영향을 극복하는 것이 필요하다.

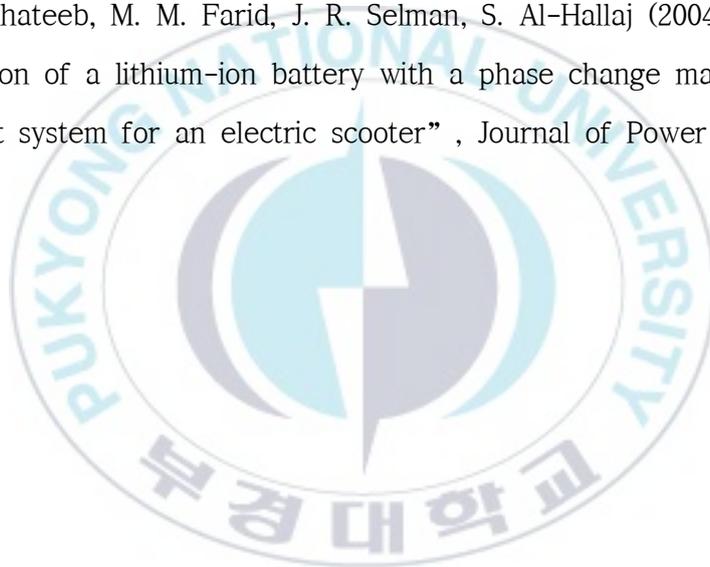
참고문헌

- [1] Z. Rui, Z. Sijie, L. Jie, G. Junjie (2015), “A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system” , Journal of Power Sources 299 557-577.
- [2] G. Burban, V. Ayel, A. Alexandre, P. Lagonotte, Y. Bertin, C. Romestant (2013), “Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications” , Applied Thermal Engineering 50, 94-103.
- [3] V. Manno, S. Filippeschi, M. Manmeli, C. Romestant, V. Ayel, Y. Bertin (2015), “Thermal-hydraulic characterization of a flat plate pulsating heat pipe for automotive applications” , Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 3(4):413-425.
- [4] 예석수 (2001), “내부 마이크로 그루브형 써모사이폰의 열전달 성능에 관한 연구” , 부경대학교 공학박사학위 논문.
- [5] 정원식 (2018), “진동형 히트파이프를 이용한 전기차 원형 배터리 냉각 기술” , 충북대학교 공학박사학위 논문.
- [6] D.A. Reay, P.A. Kew (2006), “Heat pipes” , 5th ed
- [7] 이상현 (2010), “하이브리드카/전기차 전망 및 국내 완성차업체의 경쟁력 비교 분석” , 하나금융경영연구소 연구보고서.

[8] National Instruments (2012), “Calculating Thermocouple Measurement Error in DMM/Switch Temperature Measurement Systems” , Tutorial of National Instruments.

[9] Q. Wang, B. Jiang, Q. F. Xue, H. L. Sun, B. Li, H. M. Zou, Y. Y. Yan (2015), “Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes” , Applied Thermal Engineering 88, 54-60.

[10] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selman, S. Al-Hallaj (2004), “Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter” , Journal of Power Source 128, 292-307.



감사의 글

부경대학교 냉동공조공학과 대학원을 학석사 연계과정으로 들어갈 생각을 품고 2016년 3월에 김종수 교수님 연구실로 들어갔습니다. 그리고 2019년 1월인 지금 석사 졸업을 하게 되었습니다. 어느새 3년이란 시간이 흘러버렸습니다. 김종수 교수님, 3년이란 짧지 않은 시간동안 못난 제자 끝까지 지도해주셔서 감사했습니다. 이런 저런 사고도 많이 치고 미흡한 모습 많이 보여드렸는데도 품어주신 점 감사드립니다. 같은 실험실 선배인 김도빈, 김성복, 오인택 선배님 어떤 질문이든 친절하게 답해주셔서 감사드립니다. 실험실에 혼자 있을 때 도와주신 다른 실험실 선배, 동기, 후배들에게 감사드립니다. 권용하 박사님에게도 저에게 신경 많이 써주셔서 감사드립니다. 뒤늦게 들어온 김민석 형님한테도 의지가 많이 되었습니다. 모두들 정말 감사드립니다.

2019년 02월
이 재 영 올림

