

# 비전도성 유체를 이용한 Two-Phase Closed Thermosyphon(TPCT) 상변화 특성 연구

김정우\*, 선현준\*, 이찬용\*, 이권영\*  
\*한동대학교 기계제어공학부  
e-mail: kylee@handong.edu

## Study of Phase Change Characteristics in a Two-Phase Closed Thermosyphon(TPCT) Using Non-Conductive Fluids

Jungwoo Kim\*, Hyunjun Sun\*, Chanyong Lee\*, Kwon-Yeong Lee\*  
\*School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

### 요약

본 논문에서는 히트 파이프의 일종인 TPCT 실험장치를 통해 DI Water와 비전도성 유체(Novec 7100, 3M)의 열전달 성능을 비교분석 하였다. 실험 결과 Novec 7100의 열전달 성능은 DI Water에 비해 낮은 것을 확인할 수 있지만 Novec 7100의 경우 실험 matrix에서 geyser 현상이 발생하지 않았다. 또한 DI Water가 Filing Ratio(FR) 증가에 따라 dry out 허용 전력이 감소하는 경향과 반대로 Novec 7100은 FR이 증가함에 따라 더 나은 열적 성능을 보임을 확인할 수 있다. 본 연구는 비전도성 유체를 사용하는 TPCT 냉각시스템 내지 타 냉각시스템의 설계 및 운영에 중요한 시사점을 제공한다.

## 1. 서론

현대 기술 분야에서 에너지 효율과 효과적인 열 관리는 점점 더 중요한 도전 과제가 되고 있다. 특히 데이터 센터와 전 기자동차 배터리와 같은 분야에서 냉각 기술의 중요성이 두드러지고 있다. 데이터 센터는 전력 장비와 부속 구성 요소 외에도 냉난방공조 시스템(HVAC)이라는 주요 에너지 소비 부분으로 구성되어 있는데, HVAC 장비 자체가 전체 에너지의 34%를 차지한다고 보고된다[1]. 이는 데이터 센터의 가동을 위한 냉방과 실내 열 환경을 적정 온도 이내로 유지하기 위한 필요성 때문이다. 또한 내연기관 차량과 경쟁하기 위해 지속적으로 증가하는 전기자동차 배터리 용량에 대응하여 전기자동차 배터리 열 관리 기술의 필요성도 강조되고 있는데, 이는 발열이 배터리 작동 온도를 변화시켜 배터리의 충방전 성능, 내부 전기화학 반응, 수명 및 안전성에 큰 영향을 미치기 때문이다[2]. 이러한 배경하에, 비전도성 유체는 전기를 전도하지 않는 특성 때문에 전기적 손상 없이 직접적인 액침 냉각을 통해 효율적으로 열을 제거할 수 있어 다양한 냉각 응용 분야에서 주목받고 있다. An et al.은 비전도성 유체를 활용한 2-phase 액침 냉각 방식을 ANSYS Fluent 3D 수치 모델을

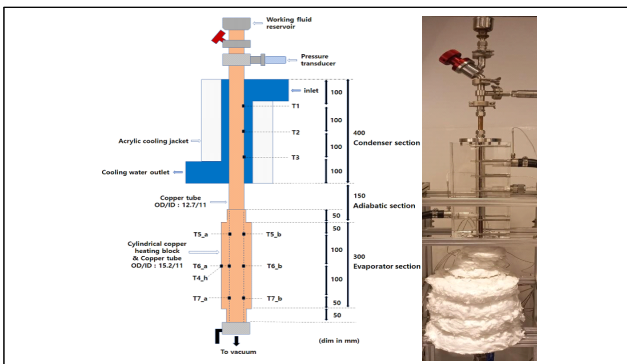
개발했다[3]. Zhoujian et al.은 리튬 이온 배터리의 열 관리를 위해 비전도성 유체인 Novec 7000을 냉각유체로 사용하는 직접 액침 냉각 기술에 대해 연구했다[4]. 그러나 기존에 그 특성이 잘 알려진 유체인 물과 달리 비전도성 유체의 열전달 특성에 대한 연구는 상대적으로 미비한 상황이다. TPCT 실험은 비전도성 유체의 열전달 특성을 연구하기 위한 좋은 방법이다. TPCT(Two-Phase Closed Thermosyphon)는 히트 파이프의 일종으로, 진공의 관을 통해 이어진 하단의 증발부와 상단의 응축부로 구성된 장치이다. 증발부의 액체는 열원에 의해 가열되고 증발되어 관의 중심부를 통해 응축부에서 냉각되어 응축된다. 응축된 액체는 중력을 통해 관 내표면을 타고 다시 증발부로 내려가 순환하는 형태이다[5]. TPCT의 핵심 원리는 파이프 내부의 작동 유체가 액체 상태와 증기 상태 사이에서 반복적으로 상변화하는 것에 있다.

본 연구에서는 히트파이프의 일종인 TPCT(Two-Phase Closed Thermosyphon) 장치를 활용하여 비전도성 유체의 냉각 가능 용량 및 열전달 특성을 파악하고 DI Water와의 비교를 통해 비전도성 유체가 냉각유체로써 갖는 특성을 탐구하고자 한다.

## 2. 실험 자재 및 방법

## 2.1 실험장치와 과정

본 연구의 TPCT 실험 장치는 그림 1과 같이 증발부, 단열부, 응축부의 세 부분으로 구성된다. 각 부분의 길이는 증발부  $L_e$  300mm, 단열부  $L_a$  150mm, 응축부  $L_c$  400mm 이다. 증발부는 실린더형 구리 히팅 블록을 사용하며, 히팅 블록 외경 ( $D_{h,o}$ )은 19mm, 증발부 관의 내경( $D_{e,i}$ )은 11mm, 외경( $D_{e,o}$ )은 15.2mm로 구리관을 설계하였다. 히팅 블록 내부의 구리관 표면에 100mm 높이마다 양 측면부에 K형 열전대를 각각 3개 부착하여 증발부 위치에 따른 온도를 측정하였다. 파워 서플라이에 연결되어 히팅 블록에 내장된 카트리지는 최대 15kW의 전력을 공급받는다. 실험에서는 dry out의 기준 온도를 200°C로 설정하고 입력 전력을 100W부터 25W씩 증가시키며 외부 온도를 측정하였다. 작동 유체의 증발부 내부와 유체의 부피 비(Filing RaTio, FR)는 0.25, 0.5, 0.75에 따라 실험을 진행하였다. 증발부에 사용된 세라믹 섬유 절연재는 열전도도가 0.049W/m·k이며, 외부 온도의 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 응축부는 구리관을 사용하며, 외경( $D_{c,o}$ )은 12.7mm, 내경( $D_{c,i}$ )은 11mm로 설계되었다. 응축부의 구리관은 아크릴 쿨링재킷으로 둘러싸여 있으며, 칠러(GR-C-00050A, Busung)와 연결되어 냉각수 온도를 제어한다. 냉각수 온도는 상온 온도 20°C로 설정하고, 쿨링재킷 출구에는 터빈 유량계(Yuyu inst.)를 설치하여 유량을 측정한다. 실험과정은 밀폐 상태를 만들기 위해 장치 상단과 하단의 밸브(상단 needle, 하단 ball)를 닫은 후 진행된다. 진공 펌프(RA0100F, Busch)를 사용하여 TPCT 장치 내부 압력을 0.03~0.04 bar로 설정하고, 냉각수 유량은 레이놀즈 수(Re) 20,000을 기준으로 계산된 0.5965kg/s로 설정한다. 작동유체는 DI Water와 비전도성 유체(Novec 7100, 3M)를 사용하였다. Novec 7100은 우수한 비전도적 특성 뿐 아니라 열적, 화학적으로 안정하여 산업 여러 분야에서 열전달 매체로 이용되고 있는 바 있다. 파워 서플라이(N8953A, Keysight)는 Matlab을 통해 입력 전력을 조절한다.



[그림 1] TPCT 실험장치

## 2.2 데이터 정리

측정된 데이터를 이용한 변수 계산 방법은 다음과 같다. 원형관에서의 전도 열전달 방정식을 사용하여 구리관 내표면 온도  $T_{e,i}$ 를 측정된 구리관 외표면 온도  $T_{e,o}$ 를 통해 계산할 수 있다.

$$T_{e,i} = T_{e,o} - \frac{Q \log\left(\frac{D_{e,o}}{D_{e,i}}\right)}{2\pi L_e k_{copper}}$$

전체 열저항( $R_{total}$ )은 열전달을 방해하는 지표이며 다음과 같이 계산할 수 있다.

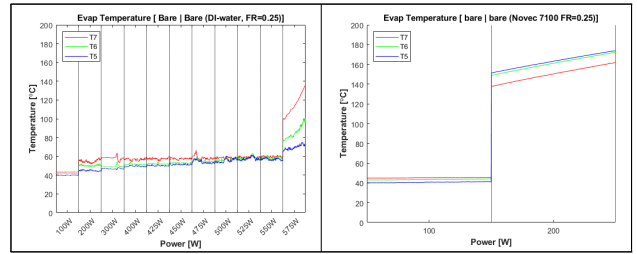
$$R_{total} = R_c + R_e = \frac{T_{avg,e,i} - T_{sat}}{Q} + \frac{T_{sat} - T_{avg,c,i}}{Q}$$

## 3. 결과 및 토의

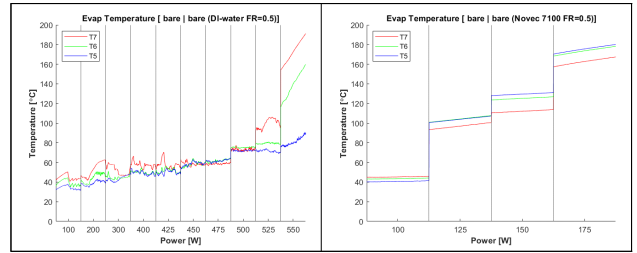
### 3.1 온도

TPCT 실험을 통해 DI Water와 비전도성 유체 Novec 7100의 열전달 성능 차이를 비교 분석하였다. 그림 2는 FR을 0.25로 설정하고 실험했을 때의 증발부 온도 그래프를 나타낸다. 먼저 입력 전력이 증가함에 따라 증발부의 온도가 천천히 상승하는 것을 볼 수 있다. 먼저 DI Water의 경우 550W까지 약 60°C의 안정적인 온도를 유지하다가 575W에서 dry out이 발생하며 온도가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. dry out 현상은 장치가 냉각할 수 있는 한계 이상의 전력이 가해짐에 따라 응축보다 증발이 더 일어나 증발부에 더 이상의 유체가 존재하지 않게 되어 증발부가 급격히 가열되는 현상이다. Novec 7100의 경우 100W에서는 일정한 온도를 유지했지만 200W에서 dry out이 발생하여 온도가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 200W로 입력 전력을 변경 후 온도가 급격히 상승하였기에, 세부적인 분석을 위해 FR 0.5 및 0.75에서 전력 증가 폭을 25W로 변경하여 실험을 진행하였다. 그림 3, 4는 FR 0.5와 0.75 상태에서 입력 전력 수준에 따른 온도 변화를 시각적으로 나타낸 그래프이다. DI Water의 경우, FR이 0.5일 때 최대 525W까지의 전력에 대해 안정적인 온도를 유지하는 것으로 나타났으며, FR이 0.75로 증가했을 때는 최대 500W까지 온도를 유지할 수 있었다. 이러한 결과는 DI Water의 경우 FR이 증가함에 따라 DI Water의 dry out 허용 전력이 소폭 감소하는 경향을 보여준다. 반면, Novec 7100의 경우 모든 FR 조건에서 150W까지는 높은 온도를 유지하였으나, 175W를 넘어서면서 온도가 지속적으로 상승하는 경향을 보였다. 특히 200W에서는 온도가 steady state에 도달하지 못하고

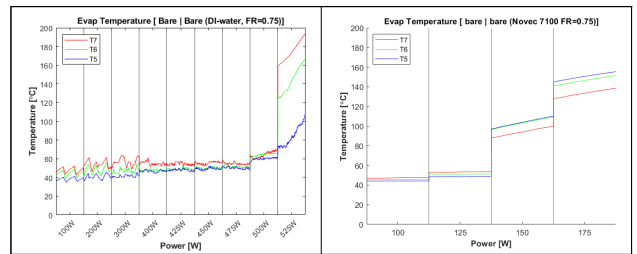
dry out으로 판별되는 200도에 도달하였다. 이러한 결과로 Novec 7100의 열전달 성능은 DI Water에 비해 현저히 낮은 것으로 확인되었다. 이는 표 1에 기술된 바와 같이 DI Water에 비해 Novec 7100의 비열이 약 4배 낮아 동일 유체 질량 대비 열적 성능이 떨어지는 것이 원인으로 분석된다. 또한 Novec 7100의 경우 FR이 0.25와 0.5일 때는 100W까지, 0.75일 때는 125W까지 낮은 표면 온도를 유지하는 것으로 나타났다. FR을 0.5에서 0.75로 증가했을 때 dry out 허용 전력이 550W에서 500W까지 소폭 감소하는 DI Water와는 반대되는 결과이다. 이는 Novec 7100의 경우 DI Water와 다르게 FR이 높을수록 더 나은 열적 성능을 보인다는 것을 시사한다. 한 가지 더 짚어볼 점은 geyser 현상에 대한 점이다. geyser 현상은 응축액이 증발부로 관을 따라 내려가지 못하고 응축부에 고착되어 증발부에 충분한 응축액이 공급되지 않으면 열이 지속적으로 냉각되지 못하여 증발부 온도가 상승하게 되는 현상으로, 이후 증기의 양이 충분히 많아지면 응축액 층이 파괴되며 증발부를 식히게 된다[6]. 따라서 geyser 현상이 발생하면 온도가 안정적으로 유지되지 못하고 불규칙하게 튀어 변동성이 커지게 된다. 그림 2,3,4를 살펴보면, DI Water의 경우 낮은 전력 구간에서 특히 geyser 현상이 발생하여 온도가 불규칙하게 튀는 구간이 존재하는데, Novec 7100의 경우 geyser 현상이 확인되지 않는다. geyser 현상이 발생하면, 열전달 시스템의 유체 흐름이 불안정해지고 이로 인해 증발부와 응축부 간의 열전달이 비효율적으로 이루어진다. 특히, geyser 현상은 증발부 온도의 급격한 변화를 유발하여 시스템의 안정성을 해쳐 최적의 냉각 조건을 유지하기 어렵게 만든다. 따라서 geyser 현상이 발생하지 않는 결과는 Novec 7100의 냉각유체로서의 활용에 긍정적인 결과이다. Novec 7100에서 geyser 현상을 확인할 수 없는 원인으로 여러 가지를 생각해볼 수 있는데, 먼저 표 1에 기술된 바와 같이 DI Water보다 Novec 7100의 점도가 낮은 것은 유체의 흐름에 미치는 영향과 관련이 있을 수 있다. 점도가 낮은 유체는 흐름 저항이 적어 열전달 시스템 내에서 더 쉽게 움직일 수 있으며, 이는 geyser 현상을 덜 일으키는 원인이 될 수 있다. 다만 일반적으로 geyser 현상은 입력 전력의 증가에 따라 증발부의 온도가 증가하여 응축액과의 온도차가 커지게 되면 열평형이 일어나는 온도에서 안정화되는데, Novec 7100의 경우 100W보다 낮은 구간에서 geyser 현상이 발생했을 가능성이 존재한다.



(가) DI Water (나) Novec 7100  
[그림 2] 전력 별 온도 그래프 (FR = 0.25)



(가) DI Water (나) Novec 7100  
[그림 3] 전력 별 온도 그래프 (FR = 0.5)



(가) DI Water (나) Novec 7100  
[그림 4] 전력 별 온도 그래프 (FR = 0.75)

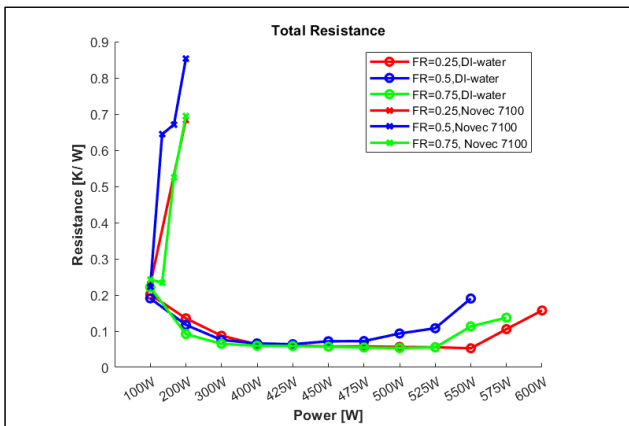
[표 1] DI Water와 Novec 7100 물성치 비교

	DI-Water	Novec 7100	단위
끓는 점	100	61	[°C]
밀도	1000	1510	[kg/m <sup>3</sup> ]
비열	4186	1183	[J/kg·k]
점도	0.894	0.58	[cP]
열전도율	0.598	0.069	[W/m·k]
표면장력	72	13.6	[mN/m]

### 3.2 열저항

그림 5는 DI Water와 Novec 7100의 입력 전력 별 열저항 그래프를 나타낸 것이다. DI Water의 경우 낮은 입력 전력 구간인 100~400W구간에서 열저항이 감소하는 형태를 보인다. 이 결과는 낮은 입력 전력에서 geyser 현상의 영향 때문에 열전달 계수가 상대적으로 낮아져 열저항이 높아지는 것이 원인으로 보인다. 입력 전력이 증가함에 따라 geyser 현상이 완화된 뒤 열전달 계수는 점차 증가하고 이에 따라 열저항이 감소

하는 경향을 나타낸다. 400W 이상 구간에서 DI Water는 열저항이 급격하게 증가하는 현상이 관찰된다. 이는 증발부에 작동 유체의 양이 증가하는 입력 전력을 충분히 처리하지 못해 열전달 계수가 급격히 감소하는 것이 주된 원인으로 보인다. Novec 7100의 경우 DI Water와 뚜렷한 차이를 보인다. Novec 7100의 경우 열저항이 낮아지는 구간 없이 dry out이 발생하는 입력 전력까지 열저항이 상승하는 형태이다. 100W 이상에서 Novec 7100의 geyser 현상을 확인할 수 없었기 때문에 이러한 형태가 확인된 것으로 파악된다.



[그림 5] 전력 별 열저항 그래프

#### 4. 결론

Novec 7100의 비등 열전달 성능은 DI Water에 비해 낮음을 확인할 수 있다. Filing Ratio(FR)의 영향 부분에서 Novec 7100은 FR이 증가함에 따라 더 나은 열적 성능을 보이는 것에 반해, DI Water는 FR 증가에 따라 dry out 허용 전력이 소폭 감소한다. 또한 실험 matrix의 최소 입력 전원인 100W에서 Novec 7100은 geyser 현상이 발견되지 않았다. Novec 7100은 낮은 전력 구간에서 geyser 현상이 발생하지 않아 입력 전력 별 열저항은 감소하는 구간 없이 dry out까지 계속 증가하는 형태를 보인다. 이러한 결과들은 TPCT 냉각시스템만이 아니라 비전도성 유체의 상변화를 이용하는 타 냉각시스템의 설계 및 운영에 있어 중요한 고려사항을 제시한다. 특히 비전도성 유체의 종류는 상당히 많은데, 냉각 유체로서의 비전도성 유체 종류 선택에 있어 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 주안점을 보여준다.

#### 참고문헌

[1] Chu, W.-X. & Wang, C.-C., "A review on airflow management in Data Centers," Applied Energy,

Volume. 240, pp. 84 - 119, April, 2019.  
 [2] Xu, J., Lan, C., Qiao, Y., & Ma, Y., "Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling," Applied Thermal Engineering, Volume. 110, pp. 883 - 890, January, 2017.  
 [3] An, X., Arora, M., Huang, W., Brantley, W. C., & Greathouse, J. L., "3D numerical analysis of two-phase immersion cooling for electronic components," 2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), pp. 609-614, June, 2018.  
 [4] Zhoujian, A.N.; Li, J.I.A.; Chengliang, Y.A.N.G.; Chao, D.A.N.G.; Mingchen, X.U., "Experimental investigation of lithium-ion power battery liquid cooling," Journal of University of Chinese Academy of Sciences, Volume. 35(2), pp. 254-260, March, 2018.  
 [5] Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B., & Wrobel, L. C., "Heat pipe based systems - advances and applications," Energy, Volume. 128, pp. 729 - 754, June, 2017.  
 [6] Lin, T. F., Lin, W. T., Tsay, Y. L., Wu, J. C., & Shyu, R. J., "Experimental investigation of geyser boiling in an annular two-phase closed thermosyphon," International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume. 38, pp. 295 - 307, January, 1995.