

# 상변화 냉각시스템의 정량적 성능지수 연구

장명언<sup>\*,1)</sup> · 송혜은<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 지상기술연구원

## A Study on Quantitative Performance Index for Phase-Change Cooling Systems

Myeong-Eon Jang<sup>\*,1)</sup> · Hye-Eun Song<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 18 March 2020 / Revised 18 May 2020 / Accepted 22 May 2020)

### Abstract

In this paper, I introduce Phase-Change Cooling for thermal management of high power devices that can be applied to High Power Laser and Electric Propulsion Systems which are composed of multiple distributed superheat sources. Phase-Change Cooling can be good used to efficient cooling of their heat sources. Phase-Change Cooling has extremely high efficiency of two-phase heat transport by utilizing heat of vaporization, relatively low flow rates and reduced pumps power. And I suggest TPI(Thermal Performance Index) which is a quantitative performance index of Phase-Change Cooling for thermal management. I quantify the performance of Phase-Change Cooling by introducing TPI. I present the test results of TPI's changing refrigerant, heat sink and flow rate of the Phase-Change Cooling system through the experiments and analyze these results.

Key Words : Thermal Performance Index(열성능지수), Phase-Change Cooling(상변화 냉각)

### 기 호 설 명

- $Q$  : 발열량 (kW)
- $\dot{m}$  : 유체의 질량 유량 (kg/min)
- $\dot{m}_v$  : 기체의 질량 유량 (kg/min)
- $\Delta T$  : 입구/출구 온도차
- $C_p$  : 비열 (kJ/kg·K)       $h_{lv}$  : 잠열 (kJ/kg)

### 1. 서론

다종의 분산 고발열원으로 구성된 고출력 레이저나 전기추진시스템은 고온의 다중 발열원이 생성된다. 여기서 발생하는 높은 열을 냉각시키기 위해 수냉시스템이나 냉동시스템을 많이 사용하고 있는데, 수냉시스템은 구성품의 부피와 중량이 크고, 냉동시스템은 구성품의 부피와 중량뿐만 아니라 소모동력도 매우 크기 때문에 효율성 측면에서는 불리하다. 따라서 이러한 열부하 문제를 개선하기 위한 효율적인 냉각 기술

\* Corresponding author, E-mail: jangmyeong@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

이 절실히 필요로 한데, 상변화 기반의 열부하 냉각시스템이 효율적인 방안으로 많이 연구되고 있다<sup>[1-8]</sup>.

Mudawar는 Fig. 1과 같은 월등한 상변화 냉각 효과를 제시하면서, 하이브리드 차량 전장품의 상변화 스프레이 냉각 연구를 수행하여 스프레이 방식의 상변화 냉각 능력(열유속)을 제시하였다<sup>[1]</sup>.

Lee는 국방 분야에서 사용되는 레이저나 마이크로프로세스 등의 전력장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가까운 미래에 발열밀도가 1,000 W/cm<sup>2</sup>를 넘어설 것이며, 이에 대한 유용한 해결책으로 Microgap Channel의 상변화 냉각을 제시하면서 Channel 사이즈, 유량, 발열밀도에 따른 다양한 연구 결과를 제시하였는데,

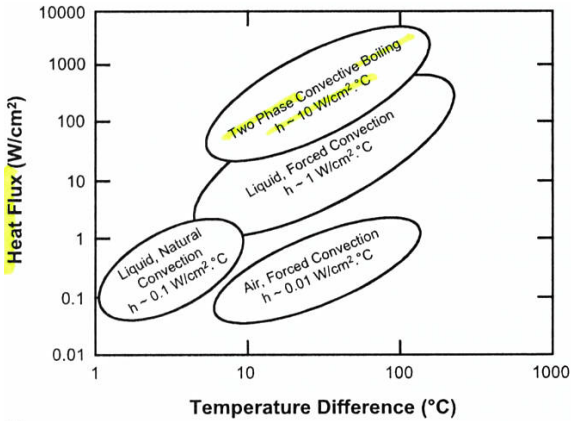


Fig. 1. Capabilities of existing cooling technologies using fluids and operating pressures<sup>[1]</sup>

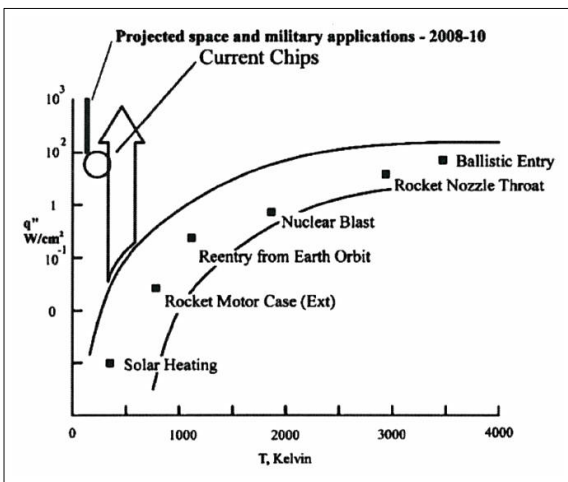


Fig. 2. Projected cooling demands<sup>[2]</sup>

실험대상으로 2.54 mm × 2.54 mm 시편을 5×5로 배열하여 미세 거동에 대한 연구를 수행하였다<sup>[2]</sup>.

Aranzabal은 실제 전기차에 적용되는 IGBT Power Module의 열관리를 위해 상변화 냉각을 FEM 시뮬레이션을 수행하여 상변화 냉각의 성능을 제시하였다<sup>[3]</sup>.

하지만, 지금까지 상변화 냉각에 대한 많은 연구들이 상변화 냉각에 대한 다양한 접근방법을 제시하고 상변화 냉각의 유용성을 소개하고 있지만, 상변화 냉각 성능을 정량적으로 나타내는 연구는 지금까지 수행된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 실제 고발열 전력장치의 열부하 관리에 사용할 수 있는 상변화 냉각 기술을 소개하고, 상변화 냉각시스템의 성능을 정량화하기 위하여 TPI(Thermal Performance Index) 성능지수를 제안하며, 실험장치를 제작하여 다양한 조건에서 상변화 냉각시스템을 실험하여 TPI 성능지수를 산출 및 비교 분석하였다.

## 2. 상변화 냉각

### 2.1 냉각시스템 특징 비교

고출력 전력장치에서 발생하는 고온의 발열을 냉각하는 방법으로 Fig. 3의 P-H 선도에서 보는 바와 같이 3가지로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 물을 사용하는 수냉시스템(Single phase cooling), 고압 압축가스를 이용한 냉동시스템(Conventional vapor cycle cooling), 이들 2가지의 중간적인 특성을 가지면서 고효율 냉각이 가능한 상변화 냉각시스템(Phase-Change Cooling)이 있다.

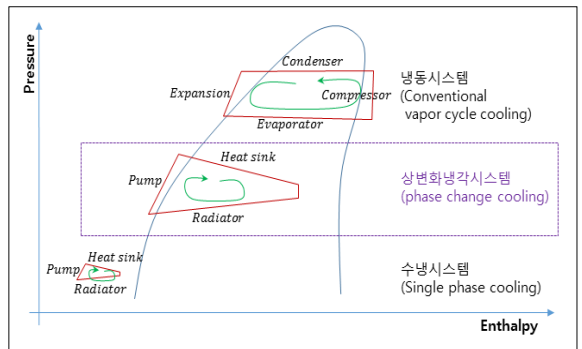


Fig. 3. Cooling methods and characteristics of cooling systems

이들 냉각시스템의 특성을 비교해 보면, 수냉시스템은 주로 액체 상태의 물을 순환시켜 냉각하는 방식이며, 펌프를 이용하여 저압에서 운용한다.

냉동시스템은 냉매의 압축-응축-팽창-증발 과정을 거치는 방식이며, 기체상태의 냉매를 컴프레서를 이용하여 고압으로 압축해서 사용하기 때문에 전력이 많이 소모된다.

상변화 냉각시스템은 시스템 내부의 냉매가 상변화 온도가 되었을 때, 상변화물질(PCM, Phase-Change Material)의 상이 액체에서 기체로 변하면서 열을 흡수하여 냉각하는 방식이며, 냉매를 펌프로 순환시킨다는 점에서 수냉시스템과 유사하다고 할 수 있지만, 수냉시스템이 액체의 현열만을 이용하는 것에 비해, 상변화 냉각시스템은 액체가 기체로 변화할 때의 잠열을 주로 이용하기 때문에 훨씬 우수한 냉각 성능을 발휘하며, 적은 유량과 동력으로 고효율의 냉각이 가능하다는 장점이 있다. 하지만, 유동패턴에 따라 핵비등(Nucleate Boiling)과 대류증발(Convective Vaporization)에 의한 영향이 복합적으로 작용하여 단순 거동 예측이 어려운 단점이 있고, 특히 임계열유속(Critical Heat Flux) 이상의 작동 환경에서는 전열면의 온도가 급상승하므로 임계열유속 이하에서 작동되도록 해야 한다.

## 2.2 상변화 냉각시스템 구성

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 상변화 냉각시스템을 구성하고, Fig. 5와 같은 실험장비를 구축하였다. 다양한 모드에서 실험하기 위하여 다소 복잡한 루프로 구성했는데, 실험할 수 있는 모드는 방열 방법에 따라 다음과 같이 구분된다.

- Condenser 모드 : Condenser만을 사용
- Chiller 모드 : Chiller만을 사용
- 복합 모드 : Condenser와 Chiller 모두 사용

본 연구에서는 TPI 성능지수를 비교 분석해야 하므로 Chiller 모드는 사용하지 않고, Condenser 모드만을 사용하여 실험하였다.

실험장비 중에 열원모사장치(Heat loader)는 상변화 냉각 특성을 연구하기 위하여 실제 고출력 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 모듈(Infineon사 FS900R08A2 P2\_B31)과 유사하게 열유속 및 열분포 모사가 되도록

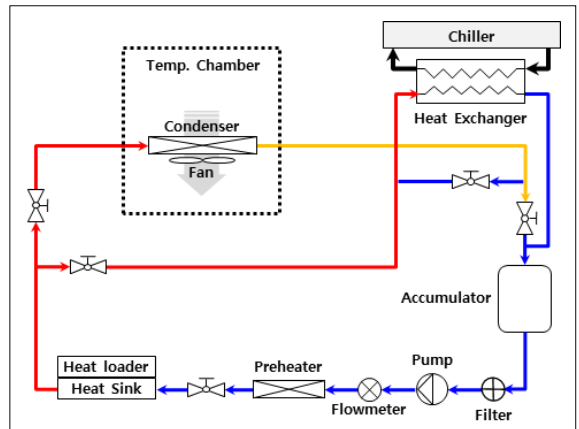


Fig. 4. Block diagram of phase-change cooling system

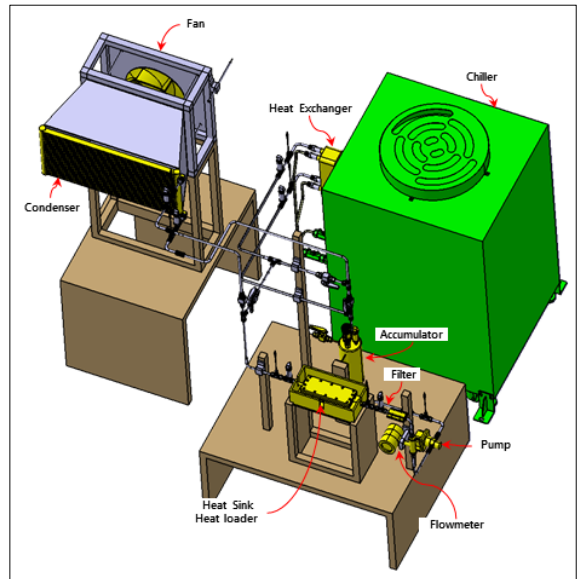


Fig. 5. Experiment equipment of phase-change cooling system

구성했으며, 운용장비 운용환경(외기온도:  $-32\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 43\text{ }^{\circ}\text{C}$ )을 모사하기 위하여 Condenser와 냉각팬을 환경챔버(Temp. Chamber) 내에 장착하여, 실험 시에 대상으로 하는 온도를 환경챔버에서 설정하여 Condenser의 방열이 운용환경과 동일한 조건에서 이루어질 수 있도록 구성하였다.

상변화 냉각시스템은 냉매가 액체에서 기체로 상변화 하면서 발열체를 냉각시키므로 증발 압력과 온도

가 냉매의 특성에 따라 유동적으로 변화될 수 있도록 냉매의 순도를 유지해야 냉매의 특성을 잘 추종하면서 실험할 수 있다. 따라서 냉각시스템에 냉매를 처음 주입할 때도 시스템 내부를 진공으로 만든 후 냉매를 주입해야 하며, 관로에 누설이 생기지 않도록 관리해야 한다.

2.3 상변화 냉각 열량관계식

상변화 냉각은 현열(Sensible Heat)과 잠열(Latent Heat)을 이용하기 때문에 열량관계식은 식 (1)과 같이 현열량( $\dot{m} C_p \Delta T$ )과 잠열량( $\dot{m}_v h_{lv}$ )을 합산하여 계산할 수 있다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T + \dot{m}_v h_{lv} \tag{1}$$

여기에서  $C_p$ 는 비열(kJ/kg·K)이고,  $h_{lv}$ 는 잠열(kJ/kg)이다. 상변화 냉각 해석에서는 위의 식을 이용하여 건도(Quality, 냉매의 기체질량/총중량)를 계산할 수 있다. 즉, 현열량은 히트싱크(Heat Sink) 입력단과 출력단의 냉매 온도차와 정압 비열로 계산하는데, 냉매의 비열은 히트싱크 입력단의 압력에 따른 비열을 이용하며, 히트싱크 내부의 압력 변화는 무시한다. 히트싱크 출력단은 액체와 기체가 혼합된 다상의 유체가 흐르며, 이때 잠열량에 의해 냉매가 기화되기 때문에 히트싱크 출력단의 온도에 따른 잠열을 이용하여 상변화된 기체의 유량을 계산하고, 이 기체유량을 유입유량으로 나누어 건도를 계산한다. 잠열량은 외부로 누설된 열량이 없다고 가정하여 부가한 발열량에서 현열량을 제외한 모든 열량이 상변화를 일으킨 것으로 고려한다.

상변화 냉각은 건도가 100 %에 가까워질 때 발열체의 온도가 급상승하여 발화 등 냉각시스템의 안전에 심각한 영향을 미치게 되며, 이를 방지하기 위해 최소유량을 산출하여 최소유량 보다 많은 유량을 반드시 흘려줄 필요가 있다<sup>[9]</sup>.

3. 상변화 냉각시스템 성능지수

3.1 냉동사이클 성능지수

일반적인 냉동시스템은 다음과 같은 열량과 일량의 관계로 나타낼 수 있다.

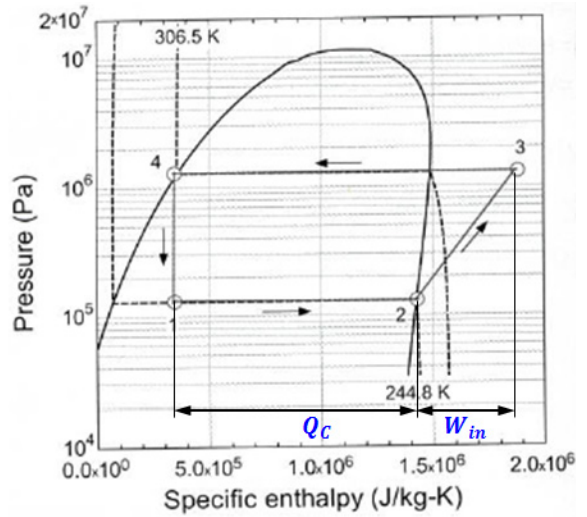
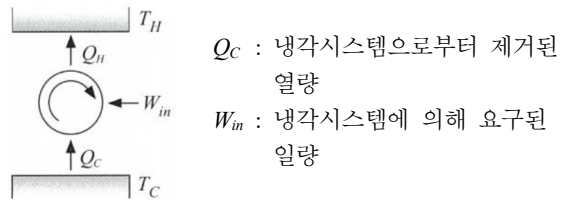


Fig. 6. P-H diagram of refrigeration cycle



$Q_C$  : 냉각시스템으로부터 제거된 열량  
 $W_{in}$  : 냉각시스템에 의해 요구된 일량

여기서 냉동시스템의 성능지수는 식 (2)와 같은 COP (Coefficient of Performance, 성적계수)를 사용하는데, 냉동시스템에 투입된 일의 양 대비 뽑아낸 열량의 비로 정의된다<sup>[10]</sup>. 이를 P-H선도에서 표시하면, Fig. 6과 같다.

$$COP = \frac{Q_C}{W_{in}} \tag{2}$$

3.2 상변화 냉각사이클 성능지수 제안

냉동사이클의 성능지수인 COP와 유사한 개념으로 상변화 냉각시스템의 성능지수는 식 (3)과 같이 TPI (Thermal Performance Index)를 제안한다. TPI는 상변화 냉각시스템에 의해 요구된 실제 일에 대하여 이 시스템에서 제거된 열량의 비로 정의한다. 이를 P-H선도에서 표시하면, Fig. 7과 같다.

TPI는 COP와 동일한 수식을 사용하지만, COP가 냉동시스템에서만 사용하는 성능지수이고 액상 유체의 압축을 위해 압축기(Compressor)로 일을 수행하여 동

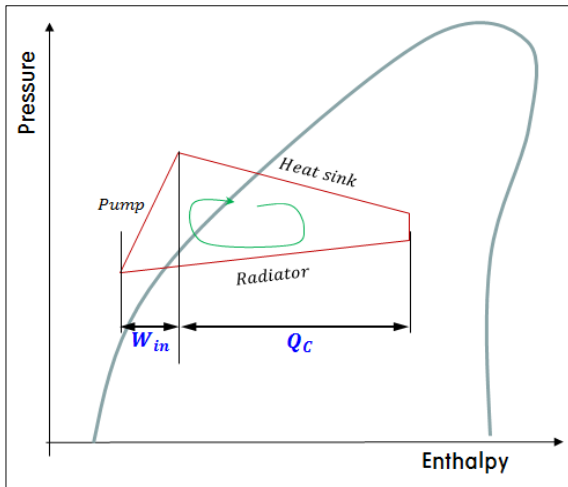


Fig. 7. P-H diagram of phase-change cooling cycle

력을 많이 소모한 반면, TPI는 액상 유체의 유동을 위해 펌프(Pump)로 일을 수행하여 동력이 적게 소모된다는 점에서 차이가 있으며, 이 때문에 동일한 성능지수를 사용하는 것은 혼란을 일으킬 수 있어 별도의 성능지수로 표현하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

$$TPI = \frac{Q_c}{W_{in}} \quad (3)$$

#### 4. 상변화 냉각 성능실험

##### 4.1 상변화 냉각 성능실험 방법

사용한 냉매는 냉각 성능, 운용 온도 및 압력, 친환경 조건을 감안하여 R-134a, R-245fa를 대상으로 하였으며, 정수를 사용한 수냉시스템도 냉각성능을 비교하기 위해 실험하였다. 상변화 냉각시스템과 수냉시스템의 실험장비도 약간 변경이 필요한데, 수냉시스템의 유량이 상변화 보다 많이 필요하여 펌프를 용량이 큰 것으로 변경하였으며, 상변화 냉각시스템에서 냉매를 포화상태로 유지하기 위해 폐쇄회로로 유로를 구성하였으나, 수냉시스템에서는 시스템 안전을 위해 개방된 수조를 최고지점에 설치하여 유로를 개방회로로 변경하였다.

히트싱크의 종류에 따른 성능을 비교하기 위하여 Fig. 8과 같이 실제 IGBT에 부착되어 있는 원형 Pin-fin Type의 히트싱크와 더불어 4종의 히트싱크(마른모형

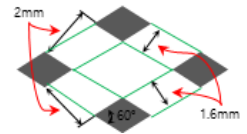
##### ● 원형 Pin-fin Type

- Pin 평균 직경 : 2.3 mm
- Pin 개수 : 662개
- 실제 IGBT Power module에 적용



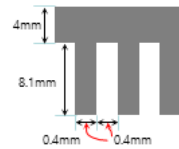
##### ● 마른모형 Pin-fin Type

- Pin 평균 표면적 : 62.7 mm<sup>2</sup>
- Pin 개수 : 662개
- 원형 Pin-Fin과 Pin 개수 및 표면적 동일



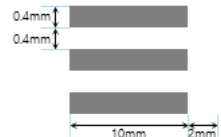
##### ● Mini-channel Type

- 채널 폭 : 0.4 mm
- Fin 두께 : 0.4 mm
- 절삭 가공할 수 있는 최소 두께로 제작



##### ● 절단 Mini-channel Type

- 채널 폭 : 0.4 mm
- Fin 두께 : 0.4 mm
- 흐름방향으로 10 mm 마다 2 mm 절단



##### ● Counterflow-channel Type

- 채널 가로길이 : 2 mm
- 채널 세로길이 : 4 mm
- 채널 수 : 21개 (상부 10개, 하부 11개)

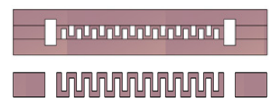
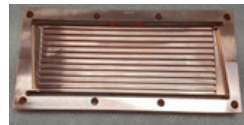


Fig. 8. Types and shapes of heat sink



Pin-fin Type, Mini-channel Type, 절단 Mini-channel Type 및 Counterflow-channel Type)를 실제 IGBT와 동일한 크기로 제작하여 실험하였다. 여기에서 Mini-Channel Type의 형상은 현재 가공할 수 있는 최소 두께로 제작하였으며, Mini-Channel Type의 형상(채널 폭과 두께 등)에 대한 최적화는 히트싱크 내부 유동 조건에 따라 너무나 많은 변수가 나오기 때문에 별도의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

실험조건은 균용장비 운용환경 중 가장 높은 온도인 43 °C로 하고, Condenser Fan 속도 1,120 rpm(=공기유속 6 m/s)로 설정하고, 냉매 유량은 본 냉각시스템의 최대 발열량(5 kW)에 대한 최소유량(약 1.5 kg/min) 보다 약간 많은 2 kg/min과 이 유량의 1.5배인 3 kg/min로 선정하였는데, 여기서 냉매 최소유량은 발열량에 따라 달라지며, 앞서 언급한 바와 같이 상변화 냉각의 특성상 최소유량 보다 많은 유량을 흘려주어야 한다. 수냉시스템의 물의 유량은 냉매 보다 5배 많은 10 kg/min, 15 kg/min으로 각각 실험하였는데, 이는 상변화 냉각시스템 실험결과와의 비교를 위해 동일한 발열체 규정온도(70 °C)를 만족시킬 수 있으면서 동력소모가 적은 펌프를 사용하기 위해 선정한 유량이다.

각 조건에 따른 TPI의 상대 비교를 위해 발열체가 도달한 최대온도를 기준으로 산출하였는데, 즉, 히트싱크 발열체의 측정점 6개 지점(가운데 직렬로 3개, 바깥쪽 직렬로 3개) 중 최고온도가 규정된 온도(70 °C)에 도달할 때에 열원모사장치에서 소모되는 전력을 측정

하여 발열량  $Q_C$ 를 산출하고, 이때 펌프의 소모전력  $W_m$ 를 측정하여, 결과값인  $TPI(=Q_C/W_m)$ 를 산출하였다.

#### 4.2 냉각 성능실험 결과

위의 상변화 냉각 성능실험 방법을 이용하여 냉매별, 히트싱크별, 유량별 각각의 조건에서 TPI를 산출했으며, 산출된 TPI 결과는 Table 1과 같다.

TPI 실험 결과, 냉매를 사용하는 상변화 냉각시스템이 물을 사용하는 수냉시스템 보다 훨씬 좋은 냉각 성능을 보였으며, 히트싱크 중에서는 Mini-channel Type의 히트싱크가 가장 좋은 성능을 보였고, 유량은 작을 수록 좋은 성능을 보였다.

또한, 가장 좋은 TPI 성능을 보인 조건은 냉매 R-134a, Mini-channel Type, 유량 2 kg/min으로 TPI 값은 268.5, 수냉시스템에서 좋은 TPI 성능을 보인 조건은 Mini-channel Type, 유량 10 kg/min으로 TPI 값 40.2와 비교하여 6.7배 좋은 냉각 성능을 보였다.

그리고 가장 좋은 냉동시스템 시험결과 COP가 4.5 정도(Wikipedia의 COP 검색 결과)를 감안할 때, 상변화 냉각시스템은 냉동시스템 대비 60배 정도의 효율적인 냉각 성능을 가진 것으로 보여진다.

각각의 조건에 따른 TPI 결과를 비교해 보면 다음과 같다.

##### 4.2.1 냉매에 따른 성능실험 결과

냉매에 따른 성능실험 결과는 Fig. 9에서 보는 바와

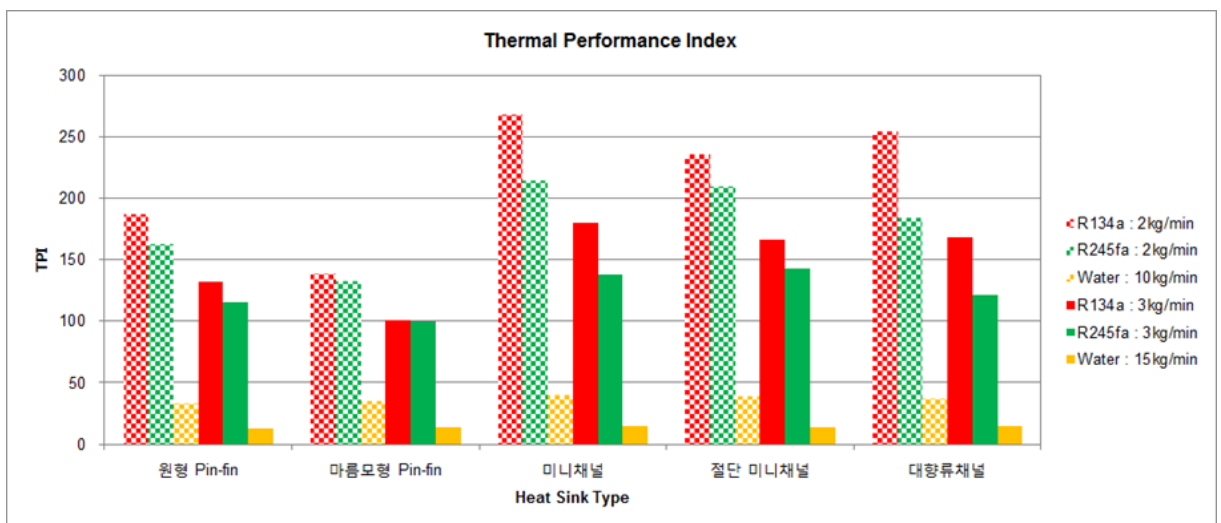


Fig. 9. The results summary of TPI's

Table 1. The results of TPI's

• 유량 조건 : 냉매 : 2 kg/min, Water : 10 kg/min

	구 분	원형 Fin-Pin	마름모 Fin-Pin	Mini-channel	절단형 Mini-channel	Counter-flow Mini-channel
R-134a	발열량( $Q_c$ )	2,504	1,816	3,720	3,160	4,032
	전압(V) 측정	24.31	24.31	24.31	24.31	24.31
	전류(I) 측정	0.55	0.54	0.57	0.55	0.65
	펌프 소요전력( $W_{in}$ )	13.4	13.1	13.9	13.4	15.8
	TPI	187.3	138.3	268.5	236.3	255.2
	Water 대비 TPI 비율	5.7	3.9	6.7	6.1	6.8
R-245fa	발열량( $Q_c$ )	2,264	1,744	3,296	3,224	3,056
	전압(V) 측정	24.31	24.31	24.31	24.31	24.31
	전류(I) 측정	0.57	0.54	0.63	0.63	0.68
	펌프 소요전력( $W_{in}$ )	13.9	13.1	15.3	15.3	16.5
	TPI	163.4	132.9	215.2	210.5	184.9
	Water 대비 TPI 비율	5.0	3.8	5.3	5.4	5.0
Water	발열량( $Q_c$ )	2,920	3,064	3,472	3,480	3,736
	전압(V) 측정	221.0	219.0	220.0	221.0	219.0
	전류(I) 측정	0.40	0.40	0.39	0.41	0.46
	펌프 소요전력( $W_{in}$ )	89.0	87.0	86.3	90.0	100.2
	TPI	32.8	35.2	40.2	38.7	37.3

• 유량 조건 : 냉매 : 3 kg/min, Water : 15 kg/min

	구 분	원형 Fin-Pin	마름모 Fin-Pin	Mini-channel	절단형 Mini-channel	Counter-flow Mini-channel
R-134a	발열량( $Q_c$ )	2,720	2,008	3,936	3,520	4,096
	전압(V) 측정	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
	전류(I) 측정	0.85	0.82	0.90	0.87	1.00
	펌프 소요전력( $W_{in}$ )	20.7	19.9	21.9	21.1	24.3
	TPI	131.7	100.8	180.0	166.5	168.6
	Water 대비 TPI 비율	10.3	7.5	12.0	11.7	11.7
R-245fa	발열량( $Q_c$ )	2,408	1,984	3,264	3,272	2,960
	전압(V) 측정	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
	전류(I) 측정	0.86	0.82	0.97	0.94	1.00
	펌프 소요전력( $W_{in}$ )	20.9	19.9	23.6	22.8	24.3
	TPI	115.2	99.6	138.5	143.2	121.8
	Water 대비 TPI 비율	9.0	7.4	9.3	10.1	8.5
Water	발열량( $Q_c$ )	3,288	3,360	3,600	3,752	4,176
	전압(V) 측정	221.0	219.0	220.0	220.0	218.0
	전류(I) 측정	1.16	1.13	1.10	1.20	1.33
	펌프 소요전력( $W_{in}$ )	257.0	248.5	241.0	264.0	290.0
	TPI	12.8	13.5	14.9	14.2	14.4

같이 냉매 R-134a가 R-245fa 보다 좋은 결과를 얻었으며, 물을 사용할 때 가장 낮은 TPI 값을 나타냈다. 또한 냉매를 이용하는 상변화 냉각의 경우가 수냉에 비하여 히트싱크 형상에 영향을 많이 받았다.

4.2.2 히트싱크에 따른 성능실험 결과

히트싱크에 따른 성능실험 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 히트싱크에 따라 TPI 성능이 크게 다른 것을 알 수 있는데, Mini-Channel Type이 가장 우수한 냉각 특성을 나타내었다. 또한, 냉매별 히트싱크의 TPI 성능 순위는 Table 2에서 볼 수 있는데, 냉매에 따라 히트싱크의 TPI 성능 순위가 약간씩 다르게 나타난 것은 히트싱크 내부 유동이 조건에 따라 단순하지 않고 많은 변수를 가지고 있다는 것을 의미한다. 이는 잠열에 의해 발생된 기체가 히트싱크 내부 형상에 따라 복잡한 유동 특성을 보여 전체 열전달 성능이 달라졌다고 볼 수 있다.

Table 2. TPI results about heat sink

Refrigerant	TPI Performance Order about Heat Sink
• R-134a	1. Mini-Channel Type 2. Counterflow-channel Type 3. 절단 Mini-Channel Type 4. 원형 Pin-fin Type 5. 마른모형 Pin-fin Type
• R-245fa	1. Mini-Channel Type 2. 절단 Mini-Channel Type 3. Counterflow-channel Type 4. 원형 Pin-fin Type 5. 마른모형 Pin-fin Type
• Water	1. Mini-Channel Type 2. 절단 Mini-Channel Type 3. Counterflow-channel Type 4. 마른모형 Pin-fin Type 5. 원형 Pin-fin Type

4.2.3 유량에 따른 성능실험 결과

유량에 따른 성능실험 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 유량이 적을수록 TPI가 커지는 경향이 있었으며,

이는 펌프 동력 변화율이 열전달 변화율 보다 유량에 더 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 안전상의 이유로 최소유량 보다 유량을 더 적게 흘릴 수는 없으므로, 항상 최소유량 이상의 유량이 유지되도록 냉각시스템을 제어할 필요가 있다. 또한, 물의 유량을 적게 흘려보내면 발열체 규정온도(70 °C)를 만족시키지 못하기 때문에 이를 만족시킬 수 있는 펌프를 선정해서 실험을 수행해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 다종의 분산 고발열원으로 구성된 고출력 레이저나 전기추진시스템에 적용할 수 있는 상변화 냉각시스템을 이용한 효과적인 냉각 기술을 소개하고, 상변화 냉각시스템의 성능을 정량화하기 위하여 냉동사이클 성능지수인 COP(Coefficient of Performance)와 유사한 개념인 TPI(Thermal Performance Index)를 제안하였다. 또한, TPI 개념의 유용성을 위해 실험장치를 제작하여 다양한 조건에서 상변화 냉각시스템을 실험하여 상변화 냉각시스템의 냉매, 히트싱크 및 유량 등의 변경에 따른 각각의 TPI 성능지수를 실험을 통하여 산출하고, 이들 결과를 비교 분석하였다.

TPI 실험 결과는 냉매 R-134a 및 Mini-channel Type을 적용할 때 가장 좋은 TPI 성능을 보였고, 유량이 작을수록 TPI 성능이 좋게 나타났다. 또한, 상변화 냉각시스템이 수냉시스템 보다 훨씬 효율적인 냉각 성능을 보였다.

향후, 히트싱크의 형상(Mini-Channel Type의 채널 폭과 두께 등) 최적화에 대한 추가적인 연구가 계속 필요할 것으로 판단되며, 상변화 냉각시스템을 보다 다양한 조건에 적용하여 TPI를 실용적으로 이용해 나갈 예정이다.

References

[1] I. Mudawar, "Two-Phase Spray Cooling of Hybrid Vehicle Electronics," Conference Paper NREL/CP-540-42389, July 2008.  
 [2] P. Lee, "Experimental Investigations of Two-Phase Cooling in Microgap Channel," Report of AOARD/AOARD-10-4073, April 2011.



- [3] I. Aranzabal and P. Cova, "Two-Phase Liquid Cooling for Electric Vehicle IGBT Power Module Thermal Management," PCIM Europe 2017, Nuremberg, Germany, pp. 969-973, May 2017.
- [4] J. Lee and I. Mudawar, "Low-Temperature Two-Phase Microchannel Cooling for High-Heat-Flux Thermal Management of Defense Electronics," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 32, No. 2, pp. 453-465, June 2009.
- [5] J. Lee and I. Mudawar, "Implementation of Microchannel Evaporator for High-Heat-Flux Refrigeration Cooling Applications," Transactions on the ASME, Vol. 128, pp. 30-37, March 2006.
- [6] G. Ghim and J. Lee, "Experimental Evaluation of the In-Tube Condensation Heat Transfer of Pure N-Pentane/R245fa and Their Non-Azeotropic Mixture as an ORC Working Fluid," Applied Thermal Engineering 106, pp. 753-761, October 2016.
- [7] I. Mudawar "Recent Advances in High-Flux, Two-Phase Thermal Management," Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 5, pp. 021012-1~15, June 2013.
- [8] I. Mudawar "Two-Phase Microchannel Heat Sinks: Theory, Applications, and Limitations," Journal of Electric Packaging, Vol. 133, pp. 041002-1~31, December 2011.
- [9] M. E. Jang et. al., "A Study on a Phase Change Cooling for Thermal Management of High Power IGBT Modules," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 1849-1850, June, 2018.
- [10] S. Klein and G. Nellis, "Thermodynamics," Kyobobook, Korea, pp. 572-573, 2014.