

공 학 석 사 학 위 논 문

Heat pipe를 이용한 히트싱크의 효율향상에 관한 연구

2007 년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

냉동공조공학과

이 광 열

공 학 석 사 학 위 논 문

Heat pipe를 이용한 히트싱크의
효율향상에 관한 연구

지도교수 김 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2007년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

냉동공조공학과

이 광 열

이광열의 공학석사 학위논문을 인준함.

2007년 2월 23일

주 심 공학박사 김 은 필



위 원 공학박사 김 종 수



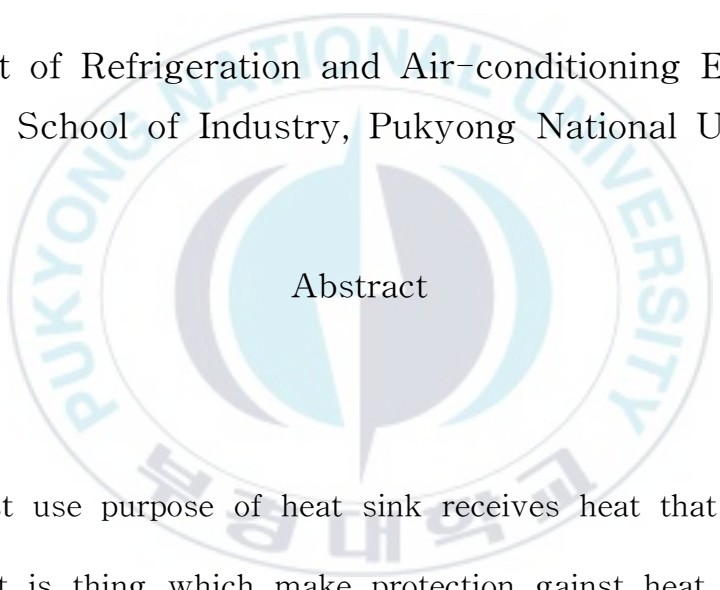
위 원 공학박사 윤 정 인



A Study on the Performance Enhancement of Heat Sink Using Heat pipe

Kwang-youl Lee

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



Abstract

The Biggest use purpose of heat sink receives heat that happen from some parts, it is thing which make protection against heat of air middle through fan consist easily because separating by whole heat-sink equally. Surface area of heat sink must be structure that can be easily flat should be wide and blow from fan in case cooling fan is to do. But, calorification may not be achieved efficiently in case of size of heat sink must great to satisfy these condition but size of series of biographies cooling or other heating element is small. Though heat-pipe transports

much ten from very low temperature disparity to comparatively far distance, it is very effective heat transfer unit, and because structure is simple, and light, coverage is very wide.

Calorification ability of heat sink may use this heat pipe in enlargement. Before, much researches announced about heat-pipe's utilizations for many semi-conductor cooling, research about efficiency elevation of heat sink that is used human's life and temporary burial become close electronic equipment and various product etc. may have to become much.



사 용 기 호

k	열전도계수 [W/m · K]
I	전류 [A]
Q	열전달률 [W]
R	열저항 [K/W]
T	온도 [K]
<u>그리스 문자</u>	
α	Seebeck 계수 [V/K]
ΔT	접점의 온도차 [K]
<u>하첨자</u>	
C	저온부
H	고온부
$cond$	전도
$conv$	대류
rad	복사

目 次

ABSTRACT	I
사용기호	III
1. 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	3
2. 실험장치 및 실험방법	5
2.1 히트싱크를 적용한 열전소자의 열성능 이론해석	5
2.2 냉각 성능 실험장치	7
2.2.1 방열판의 열저항 실험장치	7
2.2.2 소형 Peltier 냉장고 냉각 성능 실험장치	13
2.3 실험방법	14
2.3.1 방열판의 열저항	14
2.3.2 소형 Peltier 냉장고 냉각 성능 평가	14

2.3.3 실험 결과 처리 방법	14
2.4 실험결과 및 고찰	16
2.4.1 방열판의 열저항	16
2.4.2. 소형 Peltier 냉장고의 냉각성능	16
3. 결론 및 제언	21
참고문헌	23



1. 서 론

1.1 연구의 배경

히트싱크의 가장 큰 사용 목적은 어떤 부품으로부터 발생하는 열을 받아 골고루 히트싱크전체로 분산시켜 팬을 통한 공기 중으로의 방열이 쉽게 이루어지도록 하는 것이다. 그러기 위해서는 히트싱크의 표면적이 넓어야 하며 냉각팬이 있을 경우 팬으로부터 불어오는 바람이 쉽게 빠질 수 있는 구조여야 한다. 그러나 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 히트싱크의 크기가 커져야 하나 열전냉각 또는 기타 발열체의 크기가 작을 경우에는 발열이 효율적으로 이루어 지지 않을 수 있다.

히트파이프는 매우 낮은 온도차에서 비교적 먼거리 까지 다량의 열을 수송하는데 매우 효과적인 열전달 장치이며, 구조가 간단하고, 가벼워서 적용범위가 매우 넓으며, 최근의 전자 냉각에 있어서 중요한 열문제들의 해결책으로 자리 매김을 하고 있다. 히트파이프의 원리는 1944년 Gaugler에 의해 고안된 후 1964년 Grover에 의해 보다 나은 성능으로 고안 되었다. 히트파이프는 밀폐용기 내부의 작동 유체가 연속적으로 증기-액체간의 상변화 과정을 통하여 용기 양단 사이의 열을 전달하는 장치로 잠열을 이용하여 열을 이동시킴으로서, 단일 상(phase)의 작동유체를 이용하는 통상적인 열전달 기기에 비해 매우 큰 열전달 성능을 발휘 한다. 이전에도 많은 전자반도체등의 냉각

을 위한 히트파이프의 이용에 관하여 많은 연구가 발표 되었으며, 인간의 생활과 가장 밀접해진 전자기기 및 각종 제품등에 사용되는 히트싱크의 효율 향상에 관한 연구가 많이 되어야 할 것이다.

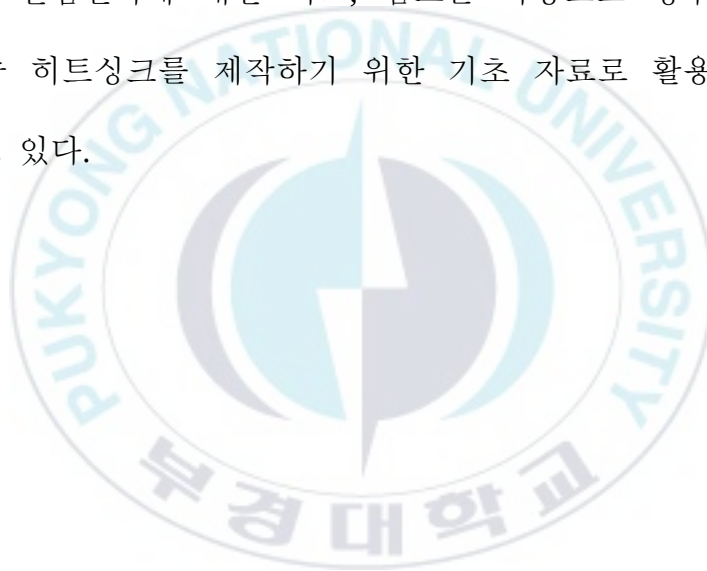


1.2 연구의 목적

열전냉각이란 종래의 압축기식 냉각처럼 복잡한 에너지 교환을 거칠 필요 없이 반도체의 전자와 정공의 이동에 의해 열을 전기로, 전기를 열로 직접 변환시키는 기술로서 금속이나 반도체는 고체 전해질과 같은 열전 재료 양단에 전류나 온도차가 주어졌을 때, 셀 양단에는 기전력이 발생하거나 Joule 열 이외의 발열, 흡열현상이 일어난다. 1821년 Seebeck은 두 개의 서로 다른 전도체의 접합부에 열을 가하였을 때, 양단에 전위차가 생긴다는 실험결과를 발표하였다. 1833년에는 Jean Peltier가 서로 다른 물질에 전류를 통과시켰을 때, 접합부 근처에서 온도차가 생긴다는 것을 발견하였다. 이후 Lenz에 의한 Peltier 효과의 본질 규명과 Thomson에 의한 Seebeck과 Peltier 계수들의 관계가 밝혀졌으며, 1911년 Altenkirchon에 의해서 열펌프 및 발전에 관한 이론이 정립되었다.^(1,2) 최근에는 Solomon⁽³⁾에 의해서 열전소자와 재료와 형상, 구조 등을 변화시킴으로써 냉동기의 성능을 향상시키는 연구가 발표되었고, Miner and Majumdar⁽⁴⁾는 과도전류 열전효과를 이용하여 열전소자의 성능을 향상시켰다. 그리고 Huang et al.⁽⁵⁾는 열전소자의 고온측에서 충분한 방열이 이루어질 경우에 열전소자가 최대 성능을 발휘할 수 있다는 연구를 발표하였다. You et al.⁽⁶⁾은 열전소자 및 열전냉각 장치에 관한 이론해석과 실험을 수행하여 최대 성적계수와 온도특성의 관계를 규명하였다. 열전소자와 방열핀의 결합, 수냉 재킷 혹은 워터 히트 파이프를 이용한 연구⁽⁷⁾는 다수 발표되었으

나, Pulsating Heat Pipe(이하 PHP)를 열전소자에 적용한 연구는 부족한 실정이다. PHP는 우수한 열전달 성능을 가지며, Wick(Wick)을 사용하는 일반적인 히트 파이프에 비해 제작이 용이하다는 장점을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 히트싱크의 방열성능을 향상시키기 위해, PHP를 열확산기(thermal spreader)로 적용하였다.

그리고, 성능실험을 위하여 소형 Peltier 냉장고를 설계하여 냉각성능실험을 수행하였으며, 실험결과에 대한 비교, 검토를 바탕으로 향후 히트파이프를 이용한 고성능 히트싱크를 제작하기 위한 기초 자료로 활용하고자 하는데 목적을 가지고 있다.



2. 실험장치 및 실험방법

2.1 히트싱크를 적용한 열전소자의 열성능 이론 해석

열전소자의 기본 원리는 n형과 p형의 반도체로 구성된 열전모듈의 한 요소에 대하여 반도체의 접합부를 전류를 n형에서 p형으로 통과시킴으로써 낮은 온도로부터 높은 온도로 열을 운반한다. 이때에 요소의 내, 외에서 일어나는 열전현상에 의한 성능 해석을 비교적 간단하게 하기 위해서 실제 현상과 큰 차이가 없게 반도체 측면방향으로의 열전달이 축방향에 비해 미소하므로 무시하고, 접촉점에서의 전기저항은 반도체의 저항에 비하여 비교적 적으므로 무시하며, k , R , 그리고 α 가 온도에 큰 영향을 받지 않는다는 가정을 고려하여 열전모듈의 성능을 성적계수로 평가하였다. 열전소자를 통한 전열량은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{I^2 R}{2} - k \Delta T \quad (1)$$

여기에서 R 은 열전모듈의 내부 저항을 의미한다. 우변의 첫 번째 항은 Peltier 효과에 의한 흡열량이며, 두번째 항은 열전소자에서 발생하는 Joule열 중 절반에 해당하는 값으로 저온부로 침입하는 발열량이다. 세번째 항은 열전소자의 고온부와 저온부의 온도차인 ΔT 에 의한 전도열량이다. 여기서,

세번째 항의 ΔT 를 줄임으로써 열전소자의 냉각성능을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 방열부에 PHP를 적용하여 열전소자의 전열량을 향상시켜 보다 좋은 냉각성능을 얻고자 한다.



2.2 냉각 성능 실험장치

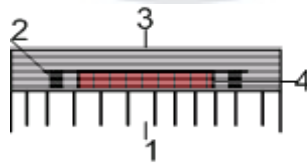
2.2.1 방열판의 열저항 실험 장치

본 연구에서는 사출 성형 알루미늄 방열판, 알루미늄 흰 접착식 방열판, 3 mm 동관으로 만든 히트파이프와 각각의 알루미늄 방열판을 결합한 형태의 방열판의 열저항을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 방법은 알루미늄 방열판 형상에 따라 사출 성형식을 A type, 흰 결합식을 B type, 3 mm의 동관으로 제작된 PHP를 결합한 사출 성형식을 C type, 3 mm의 동관으로 제작된 PHP를 결합한 흰 결합식을 D type의 네 가지 형태로 나누어 방열판의 열저항과 냉장고의 냉각성능을 실험하여 비교 검토하였다. 열저항 실험장치의 개략도는 Fig. 1, Fig. 2와 같다. 그리고 방열판 및 PHP의 형상은 Fig. 3과 같으며, 세부사항은 Table 1에 나타내었다. 열전소자의 냉각방식은 공랭식과 수냉식이 있는데 본 제작에서는 fan을 이용한 공랭식 냉각 방법을 적용하였다. 실험장치는 풍동 장치와 가열장치로 구성된다. 풍동장치는 개방형으로 제작하였으며, 공기 유입측에 기류안정과 이물질 유입 방지를 위한 스크린 메쉬, 공기 입·출구 온도 계측부, 플레넘, 노즐 유량계, 그리고 송풍기 및 인버터로 구성되고, 송풍기(centrifugal fan : 40 mmAq, 4500 m³/h, 4 P)에 연결된 인버터를 이용하여 풍량을 조절하였다. 가열 장치는 세로 5 cm, 가로 5 cm, 그리고 두께 0.3 cm의 히터와 히터로 공급되는 전력을 측정할 수 있는 digital

power meter로 이루어져 있다.

Table 1 Specification of heat sinks.

Type	A type	B type	C type	D type
Size (L×W×T) [mm]	200× 100×30	200× 100×26	200× 100×30	200× 100×26
Number of fins [EA]	13	12	13	12
Heat transfer area [m ²]	0.18	0.15	0.18	0.15
Applied PHP	×	×	○	○



1. Heat sink 2. Bolt 3. Thermal insulations 4. Heater

Fig. 1 Cross section test section

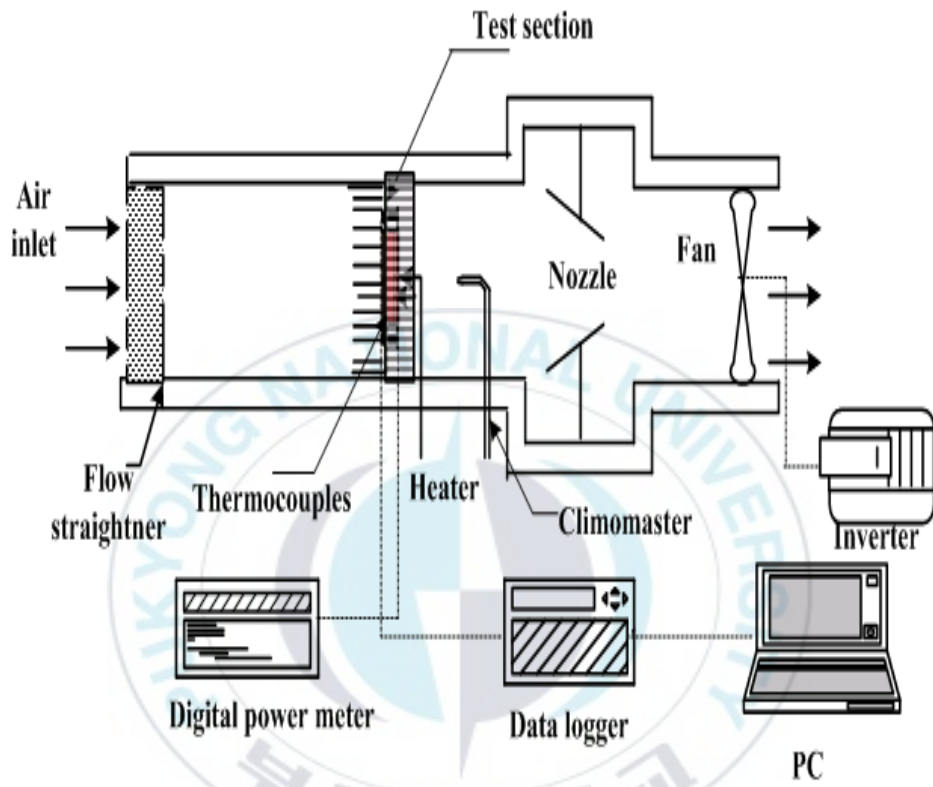
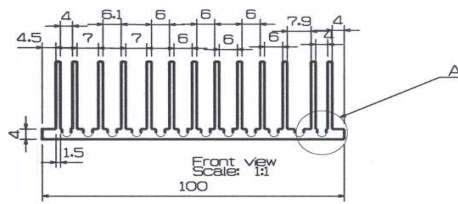
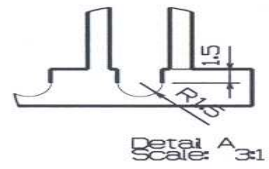


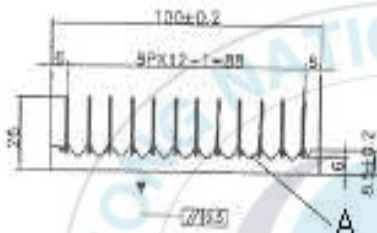
Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for heat sink with PHP.



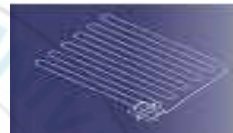
(a) Heat sink A-C type



(b) Detail A



(c) Heat sink B-D type



(d) PHP

Fig. 3 Specification of heat sinks and PHP.

Table 2 Specification of thermoelectric module.

Thermoelectric module	
Maximum current, A	5.3 (12 V DC)
Maximum voltage, V	15.4
Maximum capacity, W	56.5
$\Delta T_{\max}$, K	70
Dimension(L×W×H), mm	40×40×4.0

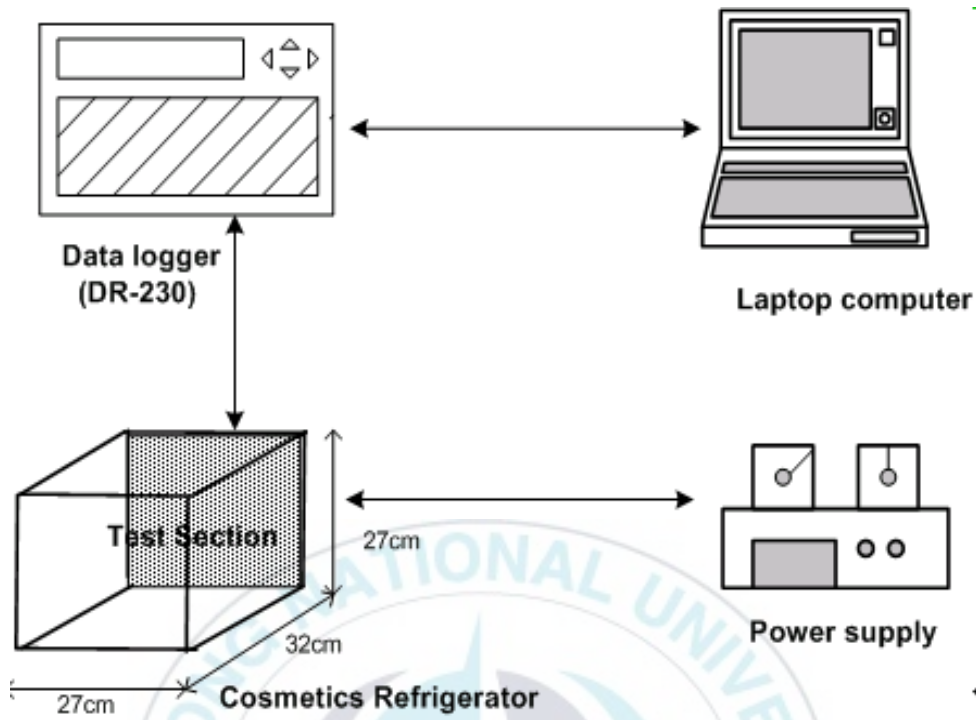


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus for cosmetics refrigerator.

2.2.2 소형 Peltier 냉장고 냉각 성능실험 장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도는 Fig.4와 같다. 성능 시험용 소형 Peltier 냉장고, 다점 온도를 측정하는 hybrid recorder(Yokogawa, DR-230)와 인터페이스를 위한 PC, 그리고 열전소자에 전력을 공급하는 power supply로 구성되어 있다. 본 연구에 사용된 방열측 PHP는 방열판에 각각 12열로 결합되었다. 최대 흡열량 56.5 W의 열전소자를 1개 사용하였다. 열전소자의 세부 사항은 Table 2에 나타내었다. 냉장고는 방열판, PHP, 냉각판, 단열재 그리고 fan으로 이루어져 있다. 본 실험에서의 열전소자 부착 방법은 스크류 나사를 사용하고, 열전소자와 방열판 사이의 열전달을 향상시키기 위해 thermal grease를 사용하였다. 냉장고 외부로의 열손실을 방지하기 위한 단열재로 32 mm의 스티로폼을 사용하였다. 본 연구에서 케이스의 시제품은 두께 4 mm의 전열성이 우수한 ABS 압축 수지를 사용하였으며, 가로 길이는 27 cm, 세로 길이 32 cm, 높이는 27 cm로 용량은 5.8 l이다. 방열을 신속히 하기 위해 방열판과 냉각판에 fan을 각각 1개씩 설치하였으며, 방열판측 fan은 DC 12V, 0.18A Model A9225L12S를 설치하였고, 냉각판측 fan은 DC 12V, 0.14A Model A5010 H12S를 사용하였다. 방열부에 열확산기로 적용한 PHP는 외경 3 mm, 내경 2 mm의 동관으로 길이 330 cm, 무게 140 g, 체적 10.37 cm³이며 12 turns으로 구성하였다. 방열부의 표면 온도 분포양상을 열화상 카메라 (주)NEC San-ei Model TH9100ML, accuracy : $\pm 0.2\%$, resolution : 0.02K)를 이용하여 촬영하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 방열판의 열저항

방열판의 열 저항을 구하기 위해 입·출구 공기의 온도, 히터표면온도, 방열판 온도, 그리고 대기온도를 T형 열전대를 부착하여 측정하였다. 풍속은 2 m/s로 일정하게 주었으며, 가열 열량은 56.5 W를 주었으며, 방열판의 상·중·하 3부분의 온도를 측정하여 평균값을 사용하였다.

2.3.2 소형 Peltier 냉장고 냉각 성능 평가

본 실험에서 열전소자의 냉각 열량을 구하기 위해, 직경 0.25 mm 피복 T형 열전대를 고내에 부착하여 측정하였다. 그리고 PHP의 성능 테스트를 위하여 냉장고 내측면에 7점, 방열부분 PHP의 표면에 3점을 부착하였으며, 열전소자의 작동 상태를 확인하기 위하여 방열판에 6점을 부착하였다.

2.3.3 실험 결과 처리 방법

열전소자의 냉각 능력은 고온측 열을 얼마나 제거해 주는가에 따라 달라진다. 방열판만 사용하였을 경우에 비해, PHP를 적용함으로써 얼마나 열을 신

속히 제거 가능한 지 확인할 필요가 있다. 식을 간략화 하기 위해 히터 반대 방향이 100% 단열 상태라 가정하면, 방열판 및 fan에 의해 제거된 열량은 다음과 같다. 여기서 Q_{cond} 는 전도열량, Q_{conv} 는 대류열량, Q_{rad} 는 복사열량이다.

$$Q = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (2)$$

식(2)를 열저항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Sigma R_{total} = \frac{\Delta T_{overall}}{Q} \quad (3)$$

여기서, $\Delta T_{overall}$ 은 총 온도차로 방열판 표면 온도와 대기 온도의 차이이다.

2.4 실험결과 및 고찰

2.4.1 방열판의 열저항

본 실험에서는 방열판만 사용하였을 경우와 PHP를 열확산기로 사용하였을 경우의 방열 성능의 차이를 알기 위해 방열판의 열저항을 구하였다. Fig. 5는 열전소자에 A, B, C, D type의 방열판을 각각 결합하였을 경우를 비교하여 시간에 따른 방열판 표면 온도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6은 방열판의 시간에 따른 열 저항을 나타낸 것이다. 열 저항은 A type의 경우 0.430 K/W로 가장 높았고, B type의 경우 0.416 K/W 그리고, C type의 경우 0.299 K/W, D type의 경우 0.278 K/W로 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서 방열판에 PHP를 열확산기로 적용하면 열분산 능력이 향상됨으로써 히터싱크의 성능향상을 기대 할 수 있다.

2.4.2 소형 Peltier 냉장고의 냉각 성능

본 실험에서는 소형 Peltier 냉장고의 내부 공기 냉각 시 1시간동안 운전한 후, 고내 온도 및 방열판의 표면 온도 변화를 각각 측정하였다. 식품의약품안전청의 연보에 의하면 레티놀 및 콜라겐 등 함유 화장품은 원료의 특성상 안전성을 고려해 볼 때, 냉장 보관(약 283.15K)이 효과적이라는 연구 결과가 나와 있다.

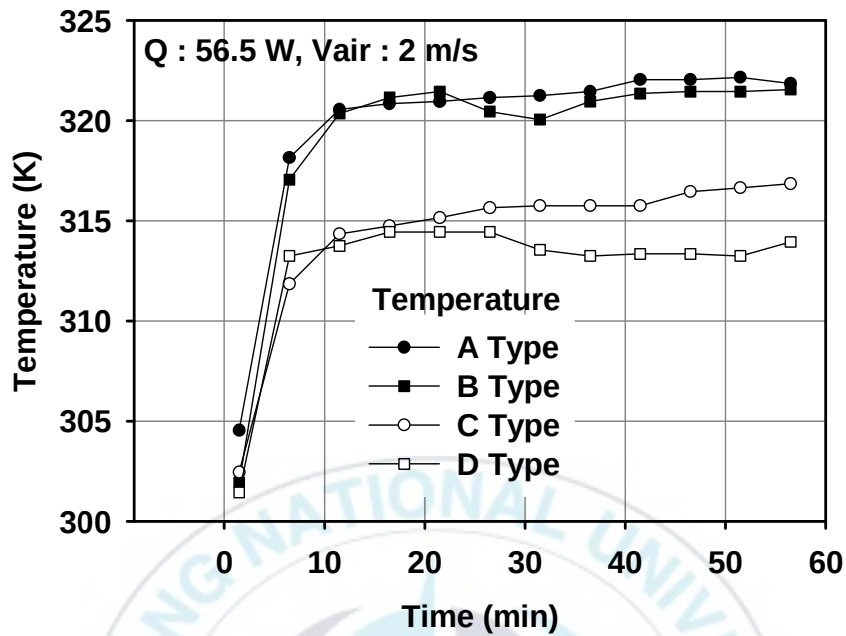


Fig. 5 Temperature profile of heat sink surface.

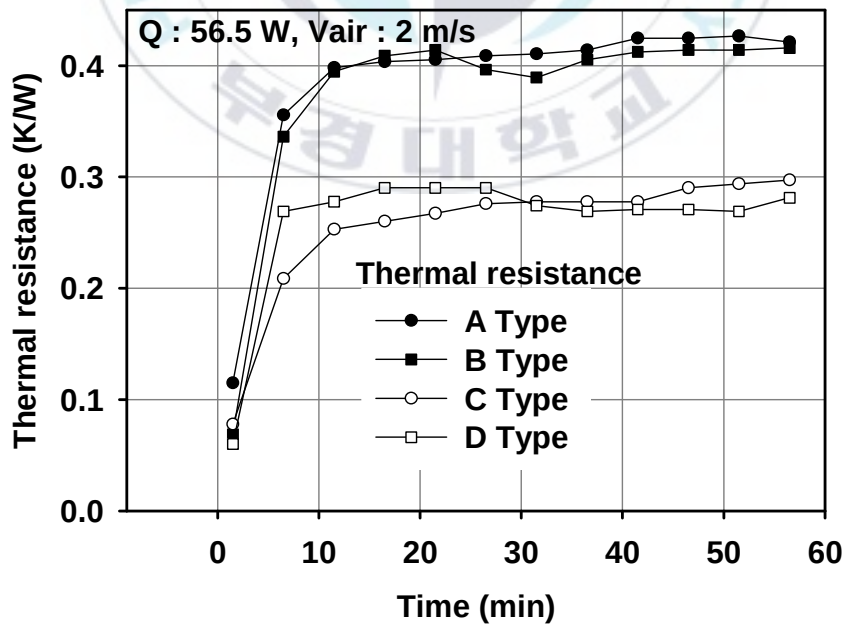


Fig. 6 Variation of thermal resistance with time.

또한, 지난 2001년 화장품 유통기한 표시를 의무화하는 개정 법률안(사용기한 표시대상 화장품지정, 식품의약품안전청 고시 제 2002-74호, 제2004-58호)이 통과된 후, 화장품도 식품처럼 보관해야 한다는 인식이 확산되고 있다. 따라서, 화장품 냉장고의 냉각실험에서 실내 환경과 유사한 온도인 $296\pm 2K$, 습도는 $60\pm 3\%$ 로 유지하여 실험을 수행하였다. 또한 최초 운전 후, 적정 온도($283.15K$)에 도달하는 시간을 측정하였다.

Fig. 7은 열전소자에 A, B, C, D type의 방열판을 각각 결합하였을 경우를 비교하여, 공기를 냉각할 때 시간에 따른 고내 온도의 변화를 나타내었다. Fig. 7에서 최초 운전으로부터 적정온도($283.15K$)에 도달시간은 A type의 경우 28.8분, B type의 경우 30.0분이며, C type의 경우 21.6분, D type의 경우 14.4분을 나타내었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 열전소자에 A, B, C, D type의 방열판을 각각 결합하였을 경우를 비교하여, 고내공기를 냉각할 때 시간에 따른 방열판의 방열측과 냉각측의 표면 온도의 변화를 각각 나타내었다. Fig. 10은 열전소자에 A, B, C, D type의 방열판을 각각 결합하였을 경우에서의 방열부의 표면온도 분포 열화상 사진을 각각 나타내었다. 열화상 사진에서 방열부에 PHP가 열확산기로 이용되어, 방열부의 표면온도 분포 양상이 전체적으로 균일하게 나타내었다.

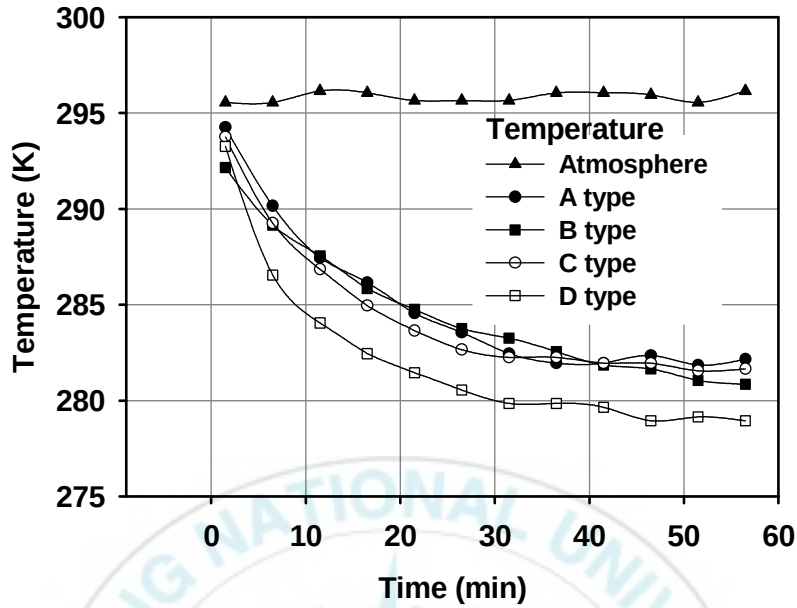


Fig. 7 Comparison of the variation of temperature of cold room using heat sinks.

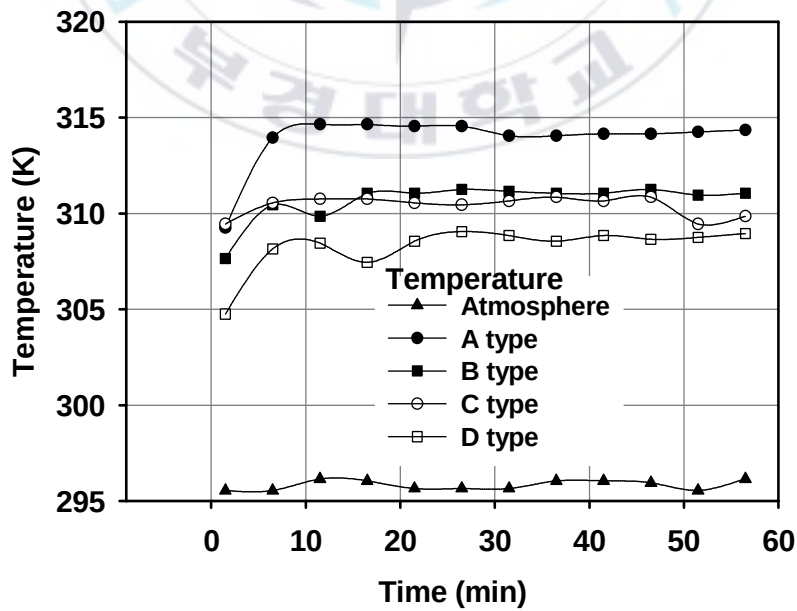


Fig. 7 Comparison of the variation of heating surface temperature using heat sinks.

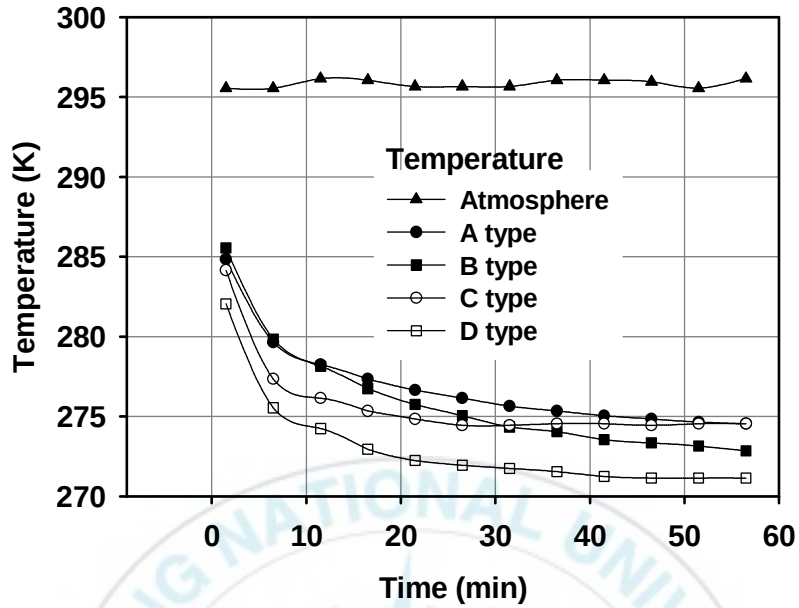


Fig. 9 Comparison of the variation of cooling surface temperature using heat sinks.

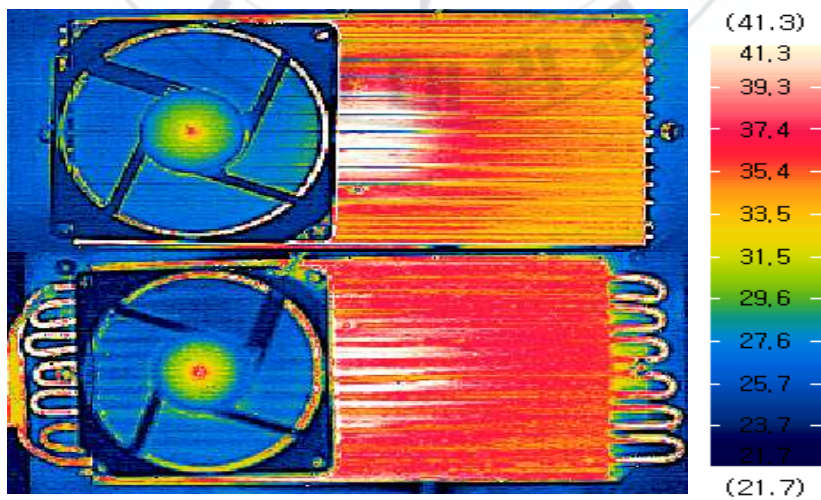


Fig. 10 Infrared thermal image for variation of temperature of heat sink surface.

3. 결 론 및 제언

본 논문에서는 히트싱크의 고효율화를 위하여 진동형 히트 파이프(pulsating heat pipe)를 히트 싱크의 열확산기로 적용하여 소형 펠티어 냉장고에서의 히트싱크의 발열능력 및 냉장고의 성능에 대한 실험을 수행하였으며, 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 히터에 A, B type의 방열판을 결합한 경우와 외경 3 mm의 동관으로 제작된 PHP를 적용한 C, D type의 방열판을 결합한 경우에서의 방열판의 열저항은 각각 0.430, 0.416, 0.299, 0.278 K/W로 방열부에 PHP를 결합한 경우가 열저항에서 각각 30.5%, 33.2% 감소하여 더 우수한 방열 성능을 나타내었다.

2. 열전소자에 A, B, C, D type의 방열판을 각각 결합하였을 경우, 냉장고 작동 1시간 후 고내온도 범위는 282.35, 280.65, 280.55, 278.75 (± 0.3)K로 PHP를 결합한 경우가 고내 온도를 약 1.8K 더 낮추는 냉각 성능을 보였다.

3. 냉장고 작동 후, 적정 온도(283.15K)로 도달하는 시간은 PHP를 적용한 C, D type의 방열판을 열전소자에 결합한 경우가 A, B type의 방열판을 열전소자에 결합한 경우에 비해, 각각 7.2분, 15.6분 정도 더 빨리 낮추는 냉각 성능을 보였고, 또한 열화상 사진에서 방열부의 표면 온도 분포 양상이 전체적

으로 균일하게 나타나는 현상을 보였다.

이상의 실험에서 나타난 결과 PHP를 적용한 히트싱크의 발열 능력이 크게 향상이 되었으며, 냉장고의 성능역시 향상됨을 알 수가 있었다. 향후 이를 이용하여 각종 산업분야에 많은 에너지 절약을 기대 할 수 있을 것으로 예상 된다.



참고문헌

- (1) Ro, S.T. and Seo, J.S., 1990, Principle of thermoelectric refrigeration and system design, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng, Vol.19, No.3, pp.135-145.
- (2) Angrist, S. W., 1970, Direct Energy Conversion, Allyn and Bacon, Inc., 2nd ed., Boston. pp.15-38.
- (3) Solomon, M., 1998, Determination of thermoelectric module parameters, 18th Int. Conference on Thermoelectrics, pp. 519-524.
- (4) Miner, A. and Majumdar, A., 1999, Thermoelectro mechanical refrigeration based on transient thermoelectric effects, Proceedings of the 18th International Conference on Thermo-Electrics, pp.27-30.
- (5) Huang, B.J, Chin, C.J. and Duang, C.L., 2000, A design method of thermoelectric cooler, International J.of Refrigeration, Vol.23, pp.208-218
- (6) Yoo, S.Y., Hong, C.P. and Shim, W.S., 2004, A Study on the performance

of thermoelectric module and thermoelectric cooling system, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol.16, No.1, pp.62-69.

(7) Bintoro, J.G., Akbarzadeh, A., Mochizuki, M. and Nguyen, T., A compact cooling system with triple technologies, Proc. of the 7th Int. Heat Pipe Symposium, pp.85-91.

(8) Kim, J.S., Im, Y.B., Cho, W.H., 2004, The Experimental study on cooling-heating system using thermoelectric module and parallel flow type oscillating heat pipe, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, Vol.16, pp.741-747.

(9) Jeon, D.H., Im, Y.B., Gong, S. U., Kim, J.S., Kim, J.W., 2005, Development Thermoelectric Cooling·Heating Cabinet for a Vehicles using Heat Pipe Type Heat Sink, Proceedings of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp.275-280.

감사의 글

부경대학교에서 인연을 맺은 2년여의 시간이 주마등처럼 지났습니다. 대학원에 진학하여 한편의 논문을 완성하기 까지 도움을 주신 많은 분들께 작은 지면을 빌어 감사의 인사를 드리고자 합니다.

많이 부족한 저를 믿어 주시며, 진정한 교육자의 모습으로, 덕으로서 지도하여 주신 김종수 지도교수님께 먼저 감사를 드립니다. 공학도의 안목과 더불어 인생의 지혜를 가르쳐 주신 큰 은혜 평생 잊지 않겠습니다.

또한 바쁘신 와중에 많은 가르침을 주신 오후규 교수님, 김영수 교수님, 김종수 교수님, 김영수 교수님, 최광한 교수님, 정석권 교수님, 윤정인 교수님, 김은필 교수님께도 많은 감사를 드립니다.

항상 선배처럼 친구처럼 많은 도움을 주셨던 공기조화실험실 가족 여러분, 그리고 지난 2년동안 함께 고락했던 05학번 동료들과 선·후배들께도 많은 감사를 드립니다.

끝으로 부족한 아들을 한결 같이 믿어 주시며, 든든한 울타리가 되어주신 부모님께 이 논문을 바칩니다.