



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](#)

2014년 8월
박사학위논문

컴퓨터 내부에 열전소자를 이용한 발열 제어 효과에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

최 제 세

2014년 8월
박사학위논문
컴퓨터
내부에
열전소자를
이용한
발열제어
효과에
관한
연구
최
제
세

컴퓨터 내부에 열전소자를 이용한 발열제어 효과에 관한 연구

A Study on Effect of Thermal Control Inside of Computer
using Thermoelectric Module

2014년 8월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

최 제 세

컴퓨터 내부에 열전소자를 이용한
발열제어 효과에 관한 연구

지도교수 오 율 권

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2014년 4월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

최 제 세

최제세의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	홍 명 석	인
위 원	명지대학교 명예교수	차 경 욱	인
위 원	경희대학교 교수	김 상 녕	인
위 원	조선대학교 교수	유 영 태	인
위 원	조선대학교 교수	오 율 권	인

2014년 6월

조선대학교 대학원

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	4
1.3 연구목적 및 내용	10
제 2 장 냉각시스템의 이론해석	11
2.1 열전달	11
2.2 열전현상	17
2.2.1 Seebeck Effect	17
2.2.2 Peltier Effect	19
2.2.3 Thomson Effect	20
2.2.4 p형과 n형 반도체 접합부에서 여러 계수의 관계	21
2.3 열전소자	22
2.4 컴퓨터 냉각 기법	29
2.4.1 공기 냉각 기법	29
2.4.2 히트파이프 냉각 기법	30
2.4.3 냉동사이클 냉각 기법	31
2.4.4 열전소자 냉각 기법	31
2.4.5 열 사이폰 냉각 기법	32
2.4.6 수냉각 기법	32
2.5 적외선 열화상 검사의 원리 및 측정이론	33

제 3 장 실험 장치 및 방법	37
3.1 전자냉각시스템	37
3.1.1 전자냉각시스템의 구조	37
3.1.2 방열판을 장착한 전자냉각시스템	42
3.1.3 방열판과 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템	44
3.2 컴퓨터 내부의 온도측정 실험장치 및 방법	46
3.3 전자냉각시스템의 온도측정 실험장치 및 방법	49
3.3.1 방열판을 장착한 전자냉각시스템	49
3.3.2 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템	53
제 4 장 수치해석 이론 및 방법	55
4.1 유한요소법에 의한 온도분포 해석	55
4.1.1 열전도 방정식	55
4.1.2 변수분리법을 이용한 유한요소 정식화	59
4.2 수치해석 방법	64
제 5 장 실험 결과 및 고찰	67
5.1 컴퓨터 내부의 온도분포 측정 실험 결과	67
5.2 적외선 열화상 측정 실험 결과	72
5.3 전자냉각시스템의 온도 측정 실험 결과	74
5.3.1 방열판을 장착한 전자냉각시스템의 온도 측정 결과	74
5.3.2 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템의 온도 측정 결과	86
제 6 장 수치해석 결과 및 고찰	98

제 7 장 결 론 108

참 고 문 헌 110

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematic diagram of flow and heat transfer at system boundary	12
Fig. 2 An approximate dimensions of heat transfer coefficient	12
Fig. 3 Measurement methods of heat transfer coefficient	15
Fig. 4 Schematic diagram of thermoelectric module	22
Fig. 5 Atmospheric transmission over 1 nautical mile	34
Fig. 6 Radiation patterns of the general measurement condition	35
Fig. 7 Schematic diagram of cooling system	38
Fig. 8 Photograph of cooling system	38
Fig. 9 Schematic diagram of thermoelectric module	39
Fig.10 Dimensions of heat sink	41
Fig.11 Photograph of cooling fan	41
Fig.12 Schematic diagram of cooling system attached heat sink at cold surface of thermoelectric module	42
Fig.13 Cooling system attached heat sink at cold surface of thermoelectric module	43
Fig.14 Schematic diagram of cooling system attached heat sink and flow fan at cold surface of thermoelectric module	44
Fig.15 Cooling system attached heat sink and flow fan at cold side of thermoelectric module	45
Fig.16 Schematic diagram of experimental apparatus for temperature measurement inside the computer	47
Fig.17 Photograph the insulation process of a thermocouple	48

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.18 Schematic diagram of measurement points for temperature measurement inside the computer	48
Fig.19 Schematic diagram of measurement points for temperature measurement inside the computer using thermoelectric cooling system	50
Fig.20 Schematic diagram of experimental apparatus for temperature measurement inside the computer using thermoelectric cooling system	51
Fig.21 Schematic diagram of experimental apparatus for temperature measurement inside the acrylic case using thermoelectric cooling system	51
Fig.22 Photograph of experimental apparatus for temperature measurement inside the acrylic case using thermoelectric cooling system	52
Fig.23 Schematic diagram of measurement points for temperature measurement inside the computer using thermoelectric cooling system attached flow fan	54
Fig.24 3-Node two-dimension triangle element	60
Fig.25 Loss on convection in surface of $i-j$	63
Fig.26 3-Dimensional analysis model of computer	65
Fig.27 Finite element model of computer	66
Fig.28 Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3	69
Fig.29 Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6	70
Fig.30 Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9	71
Fig.31 IR image on cold surface of thermoelectric module by infrared thermal camera	73

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.32	Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached heat sink	75
Fig.33	Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached heat sink	76
Fig.34	Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached heat sink	77
Fig.35	Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached heat sink after 1 hour	79
Fig.36	Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached heat sink after 1 hour	80
Fig.37	Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached heat sink after 1 hour	81
Fig.38	Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached heat sink	83
Fig.39	Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached heat sink	84
Fig.40	Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached heat sink	85
Fig.41	Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached flow fan	87
Fig.42	Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached flow fan	88
Fig.43	Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached flow fan	89
Fig.44	Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached flow fan after 1 hour	91

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.45	Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached flow fan after 1 hour	92
Fig.46	Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached flow fan after 1 hour	93
Fig.47	Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached flow fan	95
Fig.48	Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached flow fan	96
Fig.49	Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached flow fan	97
Fig.50	Temperature distribution results in PC using air cooling system by numerical analysis	100
Fig.51	Comparison between result of numerical analysis and experiment using air cooling system	100
Fig.52	Temperature distribution results in PC using thermoelectric cooling system by numerical analysis	101
Fig.53	Comparison between result of numerical analysis and experiment in PC using thermoelectric cooling system	101
Fig.54	Temperature distribution results in PC using thermoelectric cooling system after 1hour by numerical analysis	102
Fig.55	Comparison between result of numerical analysis and experiment in PC using thermoelectric cooling system after 1hour	102
Fig.56	Temperature distribution results in insulation PC using thermoelectric cooling system by numerical analysis	103
Fig.57	Comparison between result of numerical analysis and experiment in insulation PC using thermoelectric cooling system	103

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.58 Temperature distribution results in PC removed cooling system by numerical analysis	105
Fig.59 Temperature distribution results in PC attached only thermoelectric cooling system by numerical analysis	106
Fig.60 Comparison between result of numerical analysis attached only thermoelectric cooling system and removed cooling system	106
Fig.61 Comparison between result of numerical analysis attached only thermoelectric cooling system and air cooling system	107

LIST OF TABLES

Table 1. Performance specifications of thermoelectric module	39
Table 2. Performance specifications of heat sink at heat side	41
Table 3. Performance specifications of heat sink in cold side	43
Table 4. Performance specifications of the computer	47

NOMENCLATURE

A	: Area of object
A_C	: Area of thermoelectric module
COP	: Coefficient of Performance
C_P	: Specific heat
h	: Heat transfer coefficient
h_m	: Average heat transfer coefficient
I	: Current amount between contact point
K_C	: Thermal conductivity coefficient of thermoelectric module
P	: Electric power
P_{Fan}	: Work supply of fan
P_s	: Current from Seebeck effect
P_{TM}	: Work supply of thermoelectric module
Q	: Total heat
Q_C	: Absorbed by Peltier cold side heating power
Q_F	: Heat by reflux
Q_H	: Peltier hot side heating power
Q_J	: Joule heat generation
Q_P	: Peltier heating power
Q_s	: Heat index of high temperature section
Q_T	: Thomson heat flow
q	: Heat flux
q_m	: Average Heat flux
R	: Resistance
T	: Temperature

- T_{ave} : Average temperature
 T_C : Cold side temperature
 ΔT_C : Temperature difference of thermoelectric module
 T_H : Hot side temperature
 ΔT : Temperature difference between hot side and cold side
 T_R : Reference temperature
 T_S : Temperature of solid surface
 T_∞ : Atmosphere temperature of fluid
 t : Time
 ΔU : Change amount of internal energy
 V_{air} : Air volume
 V_{AB} : Electromotive force
 Z : Performance index

Greeks

- θ : Thermal resistance
 ρ : Density
 δ_c : Distance between cold side and hot side
 σ : Thomson coefficient
 ϵ : Absolute thermal conductivity
 α : Seebeck coefficient
 η : Efficiency of thermoelectric conversion
 Π : Peltier coefficient
 Π_{AB} : Peltier coefficient at the junction of materials A and B

ABSTRACT

A Study on Effect of Thermal Control Inside of Computer Using Thermoelectric Module

Choi, Je-Se

Advisor: Prof. Oh, Yool-Kwon Ph.D.

Dept. of Advanced Parts & Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

In recent years, the amount of heat generated inside of the electric device has increased because of miniaturization and high performance of electric devices. It is necessary to control the generation heat effectively to improve performance and lengthen the devices' life. So, in this study, experimental study and numerical analysis were used for the thermal control inside of the computer usually used in modern life.

The effect of thermal control was investigated by using thermoelectric module. To control the heat generated inside computers, two types of thermoelectric cooling system using thermoelectric module were manufactured. As for the first thermoelectric cooling system, heat sink was attached to its cooling side to expand the area of cooling side. As for the second thermoelectric cooling system, heat sink and a ventilating fan were attached to system to generate forced convection in cool air produced on the cooling side. First of all, the temperature distribution inside computer was measured to investigate the effect of cooling system to controlling temperature inside computer. The two types of thermoelectric cooling systems were attached to computer, and the temperature distributions were measured when

the thermoelectric cooling system and the computer were operated at the same time, and when thermoelectric cooling system was operated after the computer was operated and heat was generated. And then, to develop cooling system which is hardly affected by external environment, the temperature distribution was measured when the thermoelectric cooling system was operated after the computer was set up inside of an acrylic container and insulated. To develop new cooling system which can substitute for the existing computer cooling systems, the effect of thermoelectric cooling systems were estimated by calculating the temperature distributions when there was no cooling system in the computer and when there was cooling system only in the computer, by using numerical analysis.

As the result of experiments for measuring temperature distribution inside of computer, the existing air cooling system can not effect every area inside the computers evenly. As for the thermoelectric cooling system with its cooling side attached heat sink, the temperature inside of computer decreased a little, but drops of dew were condensed due to temperature difference between heat attached to cooling side and inside of computer. Despite of a little differences of temperatures, there were nearly similar temperature distributions when the thermoelectric cooling system with heat sink and a ventilating fan attached to cooling side and the computer were operated at the same time and when thermoelectric cooling system was operated 1 hour after operating computer. And compared to the case not using thermoelectric cooling system, the temperatures wear $2.5 \sim 2.9^{\circ}\text{C}$ lower. When the computer was set up inside of an insulated acrylic container, despite of different patterns of temperature, average temperature was nearly similar to the temperature inside of computer using the existing cooling system. It was seen that there was no dew condensation in the experiments using thermoelectric cooling system with a ventilating fan. As a result of numerical analysis, thermoelectric cooling system attached to computer, instead of air cooling system, can be used in the place of the existing cooling system if cooling effect is enhanced by increasing thermoelectric module used in thermoelectric cooling system.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

과학기술의 발달로 인해 현대인들은 수많은 전자기기들과 함께 생활하고 있다. 대부분의 가정에서 TV, 휴대폰, 컴퓨터, 냉장고, 세탁기, 전자레인지 등의 전자기기들은 아주 쉽게 찾아볼 수 있는데, 이러한 전자기기들은 점점 더 소형화, 경량화, 고성능화 되는 경향을 보이며 하루가 다르게 발전하고 있다. 특히 TV, 휴대폰, 컴퓨터 등은 가정, 직장, 학교 등 우리가 거주하는 대부분의 공간에서 사용되고 있는데, 고성능화 및 소형화가 이루어지면서 전자기기의 작동 시 발생하는 열량은 점점 더 증가하고 방열면적은 점점 더 작아지고 있다.

현대인이 직장, 학교, 가정 등에서 업무를 수행하는데 있어서 일반적으로 많이 사용하는 전자기기 중에 하나인 컴퓨터의 경우를 보면, 컴퓨터에서 가장 중요한 부분으로서 명령을 해독하고 산술논리연산이나 데이터처리를 실행하는 장치인 CPU의 재료로 사용되는 반도체는 저온이나 상온에서는 전류를 차단하거나 정류 작용을 원활하게 하지만, 전자기기에서 발생하는 열을 제어하지 못하게 된다면 온도가 증가함에 따라 반도체는 자유전자의 이동이 활발한 도체의 성질을 지니게 되어 과도한 전류가 발생하여 동작이나 연산속도를 저하시켜 기기의 성능을 제대로 발휘할 수 없을 뿐만 아니라, 기기의 수명을 단축시키게 된다. CPU의 작동온도가 10℃ 정도 낮아짐에 따라 칩의 성능은 1~3% 상승하며 고장율은 50% 이상 감소하게 된다[1, 2] 더 나아가서는 기기의 파손이나 화재의 발생 등의 위험한 상황도 야기할 수 있다. 따라서 이러한 전자기기들의 성능이 발전하는데 있어서 발생하는 열을 효율적으로 잘 제어하는 기술이 꼭 필요하다. CPU는 0℃ ~ 50℃에서 가장 안정적인 상태이다. 다른 프로그램을 사용하지 않을 시 CPU의

온도는 약 38℃이고, 인터넷, 동영상, 메신저, 게임 등의 프로그램을 실행할 시 CPU의 최대 온도는 약 55℃ ~ 58℃로 상승한다[3].

고성능화 및 그래픽 등의 사용률 증가로 인해 CPU, GPU, HDD, Power supply 및 기타 부품들의 부하가 급증하여 그 발열량이 지속적으로 증가되어 가고 있고, 그것들이 장착되는 본체는 소형화, 경량화 더 나아가서는 모니터와 일체화 되고 있는 추세이다. 이는 더 많은 양의 열이 더 좁은 공간에서 발생하게 되기 때문에 방열에 더 큰 어려움이 있다는 사실을 이야기하고 있다. 또한, 모니터, CD-ROM, 랜카드(LANcard), 메인보드(Mainboard), 사운드카드(Soundcard) 등에서도 열이 발생되어, 컴퓨터 전체의 내부발열량은 더욱 더 증가하고 있는 실정이다[4]. 이 때문에 모든 컴퓨터에 냉각시스템을 적용하는 것은 당연하게 여겨지고 있으며, 컴퓨터의 성능이 발전함에 따라 더욱더 많아지는 발열량을 감소시키기 위해서 여러 가지 방법의 다양한 냉각시스템들이 개발되었고, 지금도 계속해서 연구 및 개발되어지고 있다.

1990년대 후반까지의 컴퓨터는 일반 방열판 부착형에서 시작하여 방열판에 팬을 부착하는 방식으로 어느 정도로 적용되다가, 최근에 이르러서는 일반적인 방열판과 팬의 조합으로는 고성능 컴퓨터의 CPU와 GPU에서 발생하는 열을 해결할 수 없다는 결론에 도달하였고, 이에 대한 대안으로서 히트파이프, 수냉, 열전소자, 상변화 방식 등 다양한 신개념의 냉각법이 등장하고 있으며, 이러한 방식들은 현재 컴퓨터 시장뿐만 아니라 총체적인 반도체 냉각 시장에서 하나의 비즈니스로서의 영역을 확고히 구축한 상태이다[5, 6]. 또한, Intel과 AMD 사는 멀티 코어 방식을 채택하여 사용하고 있으며 지속적인 저발열 CPU를 개발하고 있다[7]. 컴퓨터 뿐만 아니라 점점 더 고성능화 및 소형화 되어가는 스마트 TV, 스마트폰, 태블릿 PC 등 우리가 생활속에서 사용하는 전자기기의 성능을 높이고, 사용수명을 늘이기 위해서는 발열 문제를 해결할 수 있는 효율적인 냉각시스템의 개발이 절실히 필요한 실정이다.

기존의 TV, 휴대폰, 노트북 등이 성능이 좋아지고 기능이 다양화 됨에 따라, 근래에는 스마트 TV, 스마트폰, 태블릿 PC 등을 통해서 거의 컴퓨터와 비슷한 작업을 할 수 있게 되었다. 다시 말하면 모든 전자기들이 점점 컴퓨터에 가까워지고

있다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 우리 일상에서 가장 가까운 전자기기이자, 가장 기본이 되는 전자기기 중 하나인 컴퓨터의 냉각성능을 향상시켜 보고자 하였다.

이를 위해서 기존에 컴퓨터 냉각에 주로 사용하던 방법이 아닌 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 만들어 실험과 수치해석을 통해 컴퓨터 내부의 발열제어 성능을 개선하고자 하였으며, 더 나아가서는 이 연구를 통해 얻어진 자료를 바탕으로 컴퓨터뿐만 아니라 스마트 TV, 스마트폰, 테블릿 PC 등 각종 전자기기의 발열부를 효과적으로 제어하여 전자기기의 수명을 연장시킴과 동시에 전자기기의 성능향상에 기여하고자 한다.

1.2 연구동향

최근 전자기기들이 점점 더 고성능화 및 소형화 됨에 따라, 전자기기에서 발생하는 열량은 많아지는데 반해 발열을 제어할 수 있는 공간이나 장치들은 점점 줄어들기 때문에, 발열부를 효과적으로 제어하여 전자기기의 안정성을 높이기 위한 냉각기술의 개발이 꼭 필요한 실정이다. 현대인들이 가정이나 직장에서 장시간 사용하는 전자기기 중 하나인 컴퓨터의 경우 CPU, GPU, HDD, Power supply 및 각종 장치의 발열부의 온도제어 효과를 개선하기 위하여 방열판이나 히트파이프의 개발 등 다양한 방법으로 냉각시스템의 개발에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다[8-12]. 이러한 전자기기의 냉각기법은 크게 공기 냉각기법, 히트파이프 냉각기법, 냉동사이클 냉각기법, 열전소자(Thermoelectric Module) 냉각기법, 열 사이폰 냉각기법 및 수냉각기법 등으로 구분할 수 있다.

S.H. Kim과 M.H. Kim[13]은 컴퓨터 냉각시스템의 효율을 향상하기 위한 방안으로, 외부공기를 이용하되 외부공기의 통로가 되는 공기 유입관을 압력차가 생성되게 한 구조를 채택하고, CPU 냉각팬 및 파워 서플라이 냉각팬 등 2개만을 이용한 상태에서 기존의 외부공기 이용식의 경우와 비교시험을 행함으로써 컴퓨터 냉각시스템의 효율향상에 대하여 조사해 보고자 하였다. B.D. Yoon과 K.H. Kim[14]은 기존의 히트파이프를 응용한 루프형 히트파이프를 연구대상으로 하여 루프형 히트파이프(LHP)를 데스크탑에 적용하여, 외기온도의 변화를 주어가면서 Fan type의 냉각 방식과 온도분포 및 소음을 비교하여 루프형 히트파이프의 우수성을 확인하였다. M.H. Lee와 J.W. Paek 등[15]은 CPU 냉각에 사용되고 있는 냉각 팬과 발포알루미늄 방열기를 조합하여 다양한 유동조건에서 팬-발포알루미늄 방열기 조합의 방열성능과 발포알루미늄 방열기의 높이, 베이스 판의 두께와 냉각 팬과 발포알루미늄 사이의 간격이 방열성능에 미치는 영향을 실험을 통해 측정하였다. H.C. Ham과 I.H. Park 등[16]은 공랭식 Fan-fin CPU 냉각시스템 대신, 수냉식 냉각시스템을 일반 데스크탑에 설치하여 시스템의 부하상태, 라디에이터의 팬속도, 유량의 조건에 따라 실제 시스템의 성능을 수치해석과 실험을 통해 상용화된 냉각시스템의 설계 타당성과 개선방향 및 수냉식 CPU 냉각시스템의 가능성 등을 연구하였다.

M.H. Won과 Y.H. Ahn 등[17]은 소음을 저감시키고 냉각성능을 향상시키기 위해 히트파이프형 쿨러를 개발하였고 기존의 방열판형 쿨러와 비교하였다. K.C. Lee와 J.H. Kim 등[18]은 CPU 냉각을 위해 적층시킨 방열판의 겹침 부분을 제외한 측면 부분을 절개시켜 표면적을 증가시키고, 유입 공기의 원활한 흐름이 가능하도록 유로를 확장시켜서, 핀과 공기의 마찰저항을 줄인 새로운 적층형 방열판을 고안하였고 설계인자 변화에 따른 열저항 특성을 규명하였다. S.C. Kim과 D.S. Jeon 등[19]은 고발열 데스크탑용 CPU 냉각을 위한 증기 압축식 냉각시스템 개발을 위하여 냉각능력 300W급 증발기에 대한 최적화 연구를 수행 하였으며, 이에 따른 시료용 증발기를 제작하고 최적 설계값에 대한 검증 실험을 수행하였다. O.K. Kwon과, M.J. Choi 등[20]은 증류수를 냉각수로 사용하여 채널폭과 높이가 다른 6종류의 미세채널 워터블록을 설계, 제작하여 냉각수 유량, 채널폭, 높이 등에 따라 컴퓨터 CPU 냉각용 미세채널 워터블록의 열성능 특성을 실험을 통해 평가하였다. D.A. Cha와 O.K. Kwon 등[21]은 컴퓨터 CPU 발열량 150W급 이상의 방열기를 설계하기 위해 자동차용으로 사용되는 방열기의 크기를 120×120 mm로 컴퓨터 CPU 수냉식 냉각용으로 축소 제작하였으며, 평판관형 루버핀과 핀관형 등의 총 7종류의 열교환기를 풍속과 유량을 변화시켰을 경우 열전달과 유동특성을 비교 평가함으로써 컴퓨터 CPU 수냉식 냉각방식을 제안하였다. J.T. Choi와 O.K. Kwon 등[22]은 컴퓨터 용 수냉식 냉각시스템에 사용할 수 있도록 축소 제작된 방열기의 헤더부 튜브삽입 길이 변화에 따른 열전달 및 유동특성을 평가하기 위해 해석적 연구를 수행하였고, 해석결과의 타당성을 실험결과를 통해 확인하였다. J.H. Choi와 J.H. Yoo 등[23]은 데스크탑에 사용되는 CPU 냉각 시스템 전체를 수치해석하여, 최적의 팬 표면적 설계 및 최적의 히트파이프 수량 등을 예측하였다.

앞서 이야기한 바와 같이, 냉각시스템의 재질, 구조, 크기, 냉각방법, 구동방식 등에 변화를 주어 다양한 방법으로 냉각시스템을 연구하고 개발하고 있지만, 현재 사용되고 있는 대부분의 냉각시스템은 각각의 특성에 따라 장점을 가지고 있는 반면 보완해야 할 문제점이 많이 있기 때문에 냉각시스템의 성능향상을 위한 연구 및 개발은 지금도 끊임없이 진행되고 있다.

기존에 제안된 방법 중의 하나인 냉각팬을 이용한 공랭식은 저렴하고 설치가 용이하기 때문에 가장 선호하는 방식이다. 그러나 외기를 전자기기의 내부로 송풍하는 방식이기 때문에 외부 공기의 온도가 높은 경우에 냉각시스템의 성능이 떨어지는 단점이 있으며, 냉각팬의 수명이 한계가 있기 때문에 일정시간이 지난 후 냉각팬의 교체가 필요하다. 또한 주변의 먼지를 전자기기 내부로 유입하여 내부를 오염시키는 문제점을 가지고 있다. 먼지나 이물질이 많은 환경에서 사용하는 컴퓨터는 몇 개월만 청소를 하지 않아도 컴퓨터 내부에 쌓인 이물질로 인해 냉각성능이 저하되어 고장을 발생하게 되는 원인이 된다. 물을 이용한 방법인 수랭식은 냉각효율은 좋으나 설치하는데 어려움이 있고, 전자기기에 아주 취약한 물을 사용하기 때문에 누수가 발생하면 시스템에 치명적인 손상을 입힐 수 있기 때문에 극히 일부에서만 사용하고 있다. 히트파이프 방식의 냉각은 작동하는데 별도의 동력을 필요로 하지 않고 무게가 가벼우며 반영구적이어서 유지, 보수 등의 추가 비용이 적게 드는 장점이 있으나, 정밀한 설계와 제조 공정의 난점으로 인해 단가가 높아 대중적으로 사용하기 어렵다는 단점이 있다.

이러한 기존의 냉각시스템의 단점을 보완하고, 더 좋은 냉각시스템을 개발하기 위한 방법 중 하나로, 기존의 방법과는 완전히 새로운 열전소자를 이용한 전자냉각 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.

전자냉각이란, 1834년에 발견된 열전소자를 이용한 방식으로서, 열전소자는 아무런 기계적인 구동장치가 없이 인가되는 전류의 극성에 따라 열을 흡수·방출하기 때문에, 기존의 냉각방식과는 달리 프레온가스나 암모니아와 같은 냉매를 사용하지 않는다. 냉매를 순환시키기 위한 기계적 구동장치인 압축기, 응축기, 증발기, 팽창밸브 등과 같은 기계적 구동장치들이 필요하지 않으므로 마모와 소음이 없고, 구조가 단순하여 소형화 및 경량화가 가능하며[24, 25], 어디에든 쉽게 설치 할 수 있고, 제품의 폐기 시 냉매로 인한 환경오염을 유발하지 않으며, 열전소자에 인가하는 전압의 조절만으로 정밀한 온도제어가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 반면에 전자냉각방식은 열전소자의 가격이 비싼 편이며, 기존의 냉매순환식 냉각시스템에 비해서 성능이 떨어지는 단점이 있다.

그러나, 앞서 언급한 많은 장점들을 가지고 있기 때문에 항공우주분야, 산업응용 분야, 의료분야 및 군사분야에 이르기까지 다양한 분야에서 응용하여 사용하고 있으며, 더 다양한 분야에서 계속해서 연구 및 개발되고 있는 추세이다.

또한, 열전소자의 성능을 더욱 향상시키기 위해, 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 성능향상은 열전소자 자체의 성능향상과 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 설계를 최적화한 성능 향상으로 구분할 수 있다[26]. 이러한 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 냉각성능을 향상시키기 위해 열전소자 자체 재료의 향상, 열전소자의 두께 변화, 발열부의 냉각 방식 변화, 방열판의 규격 및 구조의 변화, 냉각팬의 속도 변화 등 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. 이처럼 열전소자에 관한 연구는 열전소자의 자체의 개발에 대한 연구뿐만 아니라 열전소자를 이용한 전자냉각시스템에 대한 연구로 확산되고 있는 추세이다.

Y.T. Cho와 C.H. Lee[27]는 열전소자를 패키징화함으로서 사용 성능 및 내구성 향상으로 냉각성능 향상이 가능하고, 이러한 특성을 발휘하고 사용이 용이 하도록 패키징화한 소자와 일반적인 조립에 의한 소자의 비교 시험을 통해 냉각성능 개선에 관한 결과를 제시하고자 하였으며, S.I. Lee와 J.W. Choi 등[28]은 열전소자와 방열판(Heat sink), 냉각팬(Fan) 등을 장착한 시스템을 제작하여 열전소자의 종류와 Heat sink의 종류 등을 변화시킴으로써 발열부의 냉각이 원활하게 이루어져 전자냉각시스템의 냉각효율을 높이는지에 대해 규명하였다. B.J. Huang와 C.J. Chin 등[29]은 열전소자의 고온측에 방열효과가 충분히 이루어져야만 성능을 개선시킬 수 있다는 점을 이용하여, 열전소자의 고온측에 팬을 설치하고 공기로 열전소자의 방열부를 냉각시켜 줌으로써 냉동기의 성능을 개선하기도 하였으며, B.H. Kang와 H.J. Chang 등[30]은 열전소자 발열부의 방열효과를 높이기 위하여 공기와 물을 동시에 사용하여 현열냉각과 잠열냉각을 이용한 증발냉각방식을 도입하여 기존의 공랭식이나 수냉식보다 방열효과를 높일 수 있었고, 증발냉각방법을 이용한 실험을 통하여 열전소자가 소형 에어컨 시스템의 성능이 미치는 영향을 규명하기도 하였다. 또한, G.S. Attey[31]는 Heat Sink의 방열효과를 높이기 위해 열전달매체로서 공기 대신 액체를 사용하여 성능을 향상시키는 연구를 수행하였으며, M. Solomon[32]은 열

전소자 자체의 재질, 형상, 구조 등을 변화시켜서 전자냉동기의 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

최근에 D. Astrain와 J.G. Vian 등[33]은 발열부의 냉각을 위하여 상변화를 이용한 냉각방식을 택하여 방열효과를 높일 수 있다고 보고하였고, K.H. Lee와 O.J. Kim[34]은 마이크로 전자냉각시스템의 성능을 예측하기 위하여 열전소자의 두께를 변화시켜 수치해석을 통한 3차원 해석을 수행하기도 하였으며, A. Miner와 A. Majumdar[35]는 열전소자의 성능을 향상시키기 위하여 과도전류 열전효과를 이용하였다. 또한, S.Y. Yoo와 C.P. Hong 등[36]은 열전소자 및 전자냉각시스템에 관한 이론해석과 실험을 수행하여 최대 성적계수와 온도특성의 관계를 규명하였다. M. Yamanashi[37]는 전자냉각시스템에서 Heat Sink의 열저항이 성능지수와 냉각성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 다양한 방법으로 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 성능향상을 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있고, 전자냉각시스템의 성능이 점차 개선됨에 따라 열전소자를 이용한 제품들의 개발이 활발히 이루어지고 있다. J.H. Jin과 J.R. Cho 등[38]은 열전소자를 이용하여 음료수 등을 저장할 수 있는 쇼케이스를 제작하였으며, N.F. Guler와 R. Ahiska[39]는 열전소자를 이용하여 일정한 온도로 유지하며 혈액이나 백신 등을 저장할 수 있는 의료용 냉장시스템을 개발하였다. 또한, J.M. Kim과 M.G. Kim 등[40]은 열전소자를 이용한 화장품 냉장고를 일정 온도로 유지시키기 위하여 열전소자 발열부에 장착된 냉각팬의 속도를 변화시키는 실험을 통해 연구하였으며, D. Astrain과 J.G. Vian 등[41]은 열전냉각기의 열적·전기적 성능을 예측할 수 있는 계산 모델을 개발하여, 계산 모델을 실험적으로 입증하기 위해 전자냉각시스템을 제작하였다. S.H. Lee와 S.U. Gong 등[42]은 열전소자의 발열면의 발열량을 제어하고자 진동형 히트파이프를 열확산기로 적용하여 화장품 냉장고를 설계하고 냉각성능을 측정하였다.

이처럼 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 냉각성능을 향상시키고 효율을 높이기 위해 다양한 실험이 수행되고 있을 뿐만 아니라 다양한 방법의 수치해석 또한 이루어지고 있는 추세이다. Q. Wan과 A.V. Kuznetsov[43]는 두 개의 평행한 Beam 사이에 진동을 가진 하였을 때 열전달 촉진을 위한 음향흐름의 효과에 대한

수치해석적으로 수행하였으며, Q. Wan과 T. Wu 등[44]은 좁은 통로의 한쪽 벽면에 압전소자에 의한 진동을 인가하였을 경우 발생한 음향흐름이 강제 대류를 발생하여 냉각성을 높여줌으로써 통로 내부의 온도를 낮추는 것을 수치해석과 실험을 통하여 연구하였다. 또한 열원과 압전구동기 사이의 공기의 유동현상을 Particle Tracking Velocimetry(PTV)를 통해 가시화 하였다.

또한, H.Y. Lee와 J.H. Kang 등[45]은 열전소자 발열부의 방열을 위하여 물을 이용하여 냉각하는 수냉식으로 냉각유니트를 제작하고, 특정한 부분만을 냉각시키는 것이 아니라 컴퓨터 내부 전체를 냉각시키는 방법으로 연구를 수행하였다. 그러나, 팬을 이용한 공랭식을 이용하여 열전소자의 발열부를 제어하고 냉각시스템 전체 영역을 냉각시키는 방법의 연구는 거의 없는 실정이다.

지속적인 기술의 발전과 실생활의 수준 상승과 더불어 각종 전자 부품의 성능향상을 감안한다면 전자기기에서 발생하는 열을 제어하기 위한 새로운 냉각 기술이 도입될 필요성이 절실하며, 최근 컴퓨터, 노트북, 스마트 TV, 스마트폰, 테블릿 PC 등에서 발생하는 고발열은 CPU뿐만 아니라 그래픽 프로세서나 Mainboard chipset의 성능향상에 따른 발열량 증가에도 영향을 미치고 있다. 따라서, 기존의 냉각 방식으로는 그 한계가 명확하며, 그에 따라 소음이 없으면서 냉각 성능이 좋고 안전한 방식의 새로운 냉각 기술이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

1.3 연구목적 및 내용

앞서 언급한 바와 같이 전자기기의 성능이 발전해 나감에 따라 냉각성능의 향상 또한 꼭 필요한 실정이다. 이를 위해 공랭식, 수랭식, 히트파이프, 상변화 및 열전소자를 이용한 다양한 방법의 연구가 이루어지고 있다. 그러나 열전소자를 이용한 전자냉각방식을 이용한 냉각시스템 관한 연구는 열전소자의 재료, 형상, 구조 등 열전소자 자체에 변화를 주거나 냉각팬의 속도 제어 등을 통한 연구가 대부분이며, 현재까지는 국소부위를 냉각시키는 정도의 냉각성능만을 발휘하기 때문에, 열전소자를 이용한 전자냉각시스템에서 성능을 극대화 할 수 있는 최적의 상태로 작동되거나, 컴퓨터, TV, 스마트폰, 태블릿 PC 등 각종 전자기기의 발열부 제어에 직접 적용하기 위한 충분한 냉각성능을 갖는 전자냉각시스템은 아직 개발되지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 전자기기의 내부에서 발생하는 열을 효과적으로 제어하기 위하여, 현대인의 일상에서 가장 많이 사용되는 전자기기 중에 하나인 컴퓨터에 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 적용하여 자연대류 및 강제대류 상태에서 컴퓨터 내부의 온도를 측정하고 냉각성능을 확인하여, 성능 향상을 위한 조건을 제시하고, 열전소자를 이용한 전자냉각시스템이 기존의 여러 가지 냉각시스템들과 비교하여 얼마나 발열부를 효과적으로 제어할 수 있는지, 그리고 얼마나 개발 가능성이 있는지를 확인하고자 한다.

또한, 위에서 언급한 온도분포 실험과 동일한 조건하에서 수치해석을 실시하여 수치해석 결과와 실험결과의 비교를 통한 수치해석 방법의 타당성 및 결과의 신뢰성을 확인하고, 기존의 냉각시스템을 대체할 수 있는 전자냉각시스템을 적용한 수치해석을 실시하여 그 결과를 확인해 보고 이를 토대로 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 성능개선을 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

제 2 장 냉각시스템의 이론 해석

2.1 열전달

열전달 방법에는 크게 열의 전도, 대류, 복사가 있다. 열의 전도는 열에너지가 고체를 통하여 물질은 이동하지 않고 고온부에서 저온부로 이동하는 현상으로서, 주로 고체 내부에서 발생한다. 열전도는 고체의 한쪽 끝에 열을 가하면 가열된 부분의 원자와 전자들은 에너지를 얻어 진동하게 되고, 이런 진동이 차례로 옆의 원자와 전자를 진동시켜 열에너지가 이동하게 되는 원리이다. 대류는 기체나 액체와 같은 유체를 통해서 열을 전달하는 방법으로서, 유체의 온도차에 의해서 밀도차가 생기고 밀도차에 의해 유체가 자연스럽게 열에너지가 이동하는 자연대류 열전달과 펌프나 팬 등 외부에서 기계적으로 가해진 힘에 의해서 혼합되는 강제대류 열전달이 있다. 일반적으로 전도에 의한 열의 전달보다는 대류에 의한 열의 전달이 빠르고 대류에서는 자연대류보다 강제대류에 의한 열의 전달이 빠르다. 복사는 고체나 유체를 통하지 않고, 어떤 물질의 전자가 열을 흡수하거나 방출하게 될 때 원래의 에너지 준위에서 벗어나 다른 에너지 준위로 전이하면서 방출되는 전자기파에 의해 열이 전달되는 현상이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 물체표면의 온도가 일정한 고온 물체의 주위를 저온 유체가 유동하고 물체 표면으로부터 유체로 열이 이동하는 경우 물체표면에서 열 유속은 고체의 표면온도와 유체의 벌크온도(고온의 물체에서 충분히 떨어진 유체의 일정한 온도)의 차에 의존한다. 이것이 Newton의 냉각 법칙이고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2.1.1)$$

q : 열유속

h : 열전달계수

T_s : 고체표면의 온도

T_∞ : 유체의 벌크온도

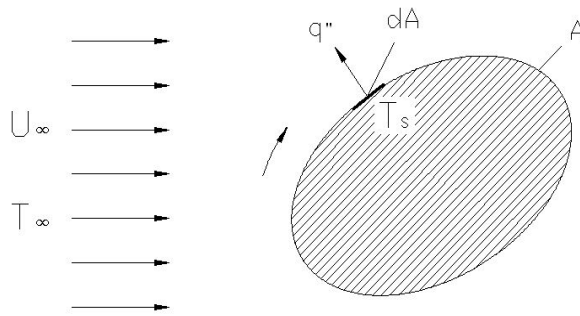


Fig. 1 Schematic diagram of flow and heat transfer at system boundary

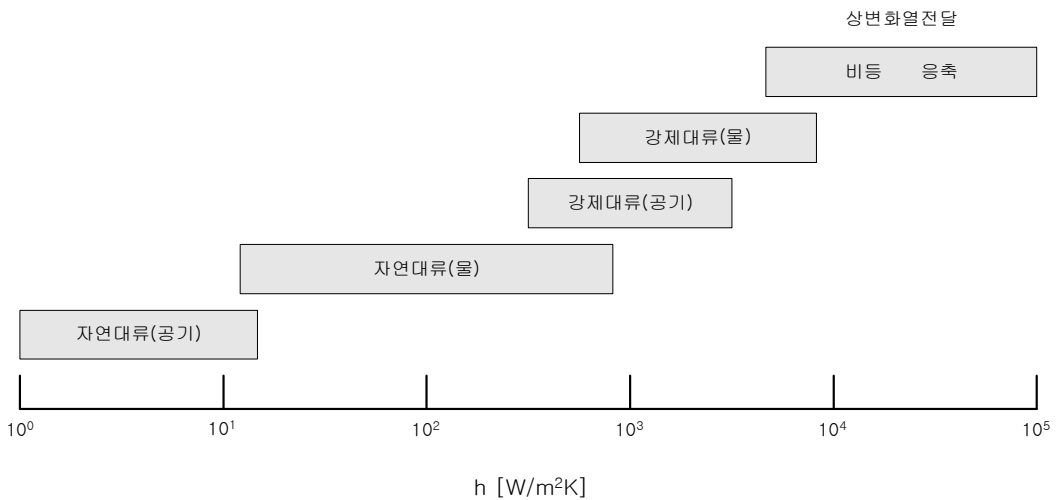


Fig. 2 An approximate dimensions of heat transfer coefficient

열전달계수는 유체의 물성만으로 결정되지 않고, 흐름에 성질에 강하게 의존하기 때문에 열전달계수의 크기를 정확하게 나타내기는 어렵지만, 일반적으로 열전달계수는 Fig. 2에서와 같은 범위의 값을 갖는다.

유체가 고체의 표면을 따라서 흐를 경우, 유속은 고체의 표면과 가까운 부분에서 크게 변화하는데 이 때 얇은 층상 부분을 속도 경계층이라고 부르고, 고체 표면의 온도가 높거나 낮을 경우 온도 또한 고체 표면에 가까운 부분에서 크게 변화하는데 이층을 온도 경계층이라고 부른다. 열유속은 이 경계층의 두께에 밀접한 관련이 있으며, 온도 경계층 내에서 유체의 온도가 고체 표면의 온도 T_s 에서 T_∞ 로 직선적으로 변화할 경우, Fourier 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = \lambda \frac{(T_s - T_\infty)}{\delta_t} \quad (2.1.2)$$

λ : 유체의 열전도율

δ_t : 온도 경계층의 두께

식 (2.1.1)과 (2.1.2)의 관계로부터 다음과 같은 식을 정리할 수 있다.

$$h(T_s - T_\infty) = \lambda \frac{(T_s - T_\infty)}{\delta_t} \Rightarrow h = \frac{\lambda}{\delta_t} \quad (2.1.3)$$

식 (2.1.3)에서, 열전달계수는 유체의 열전도율에 비례하고 온도 경계층의 두께에 반비례한다. 실제 경계층 내의 온도분포는 직선적으로만 변화하지 않고 복잡한 변화를 보이지만 대략 직선적인 변화에서와 유사한 관계가 성립하여 열전달은 온도 경계층의 두께와 반비례하게 된다. 즉, 온도 경계층의 두께가 얇을수록 열전달은 크게 된다.

유체의 유동은 물체의 표면에 따라서 변화하기 때문에 열전달계수는 위치에 변화에 따라 값이 변화하며 물체의 표면 전체에서 유체로 전달되는 전열량, 평균 열

유속, 평균 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \int_A h(T_s - T_\infty)dA = (T_s - T_\infty) \int_A h dA \quad (2.1.4)$$

$$q_m = \frac{Q}{A} = h_m(T_s - T_\infty) \quad (2.1.5)$$

$$h_m = \frac{1}{A} \int_A h dA \quad (2.1.6)$$

Q : 전열량

q_m : 평균 열유속

h_m : 평균 열전달계수

A : 물체의 표면적

이에 대해 열전달계수 h 는 물체 표면의 국소적인 위치에서 정의되는 값으로서 국소열전달계수라고 부르며, 열전달계수는 열전도율(thermal conductivity)이나 열확산계수(thermal diffusivity)와는 달리 유체의 물성치, 물체의 형상 및 유동 형태에 의존하는 값을 의미한다.

한편, 경계층 두께 등의 성질은 흐름이 층류인가 난류인가에 의해 상당히 다르기 때문에 열전달의 크기도 층류와 난류에서 크게 다르다. 그래서 층류 경계층을 통한 열전달을 층류 열전달, 난류 경계층을 통한 열전달을 난류 열전달이라 구분지어 부르고 있으며, 난류와 층류에서의 열전달계수가 해석적으로 구해지는 경우는 극히 한정되어 있을 뿐 실험적으로 측정하는 일이 매우 많다. 따라서 S. Masahiro[46]가 제시한 3가지 방법을 이용하여 실험으로 열전달 계수를 측정할 수 있으며, 일반적으로 열유속과 열전달계수는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = h(T_h - T_\infty) \quad (2.1.7)$$

따라서, 식 (2.1.7)로부터 열전달계수에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}}{T_h - T_\infty} = \frac{q}{(T_h - T_\infty)} \quad (2.1.8)$$

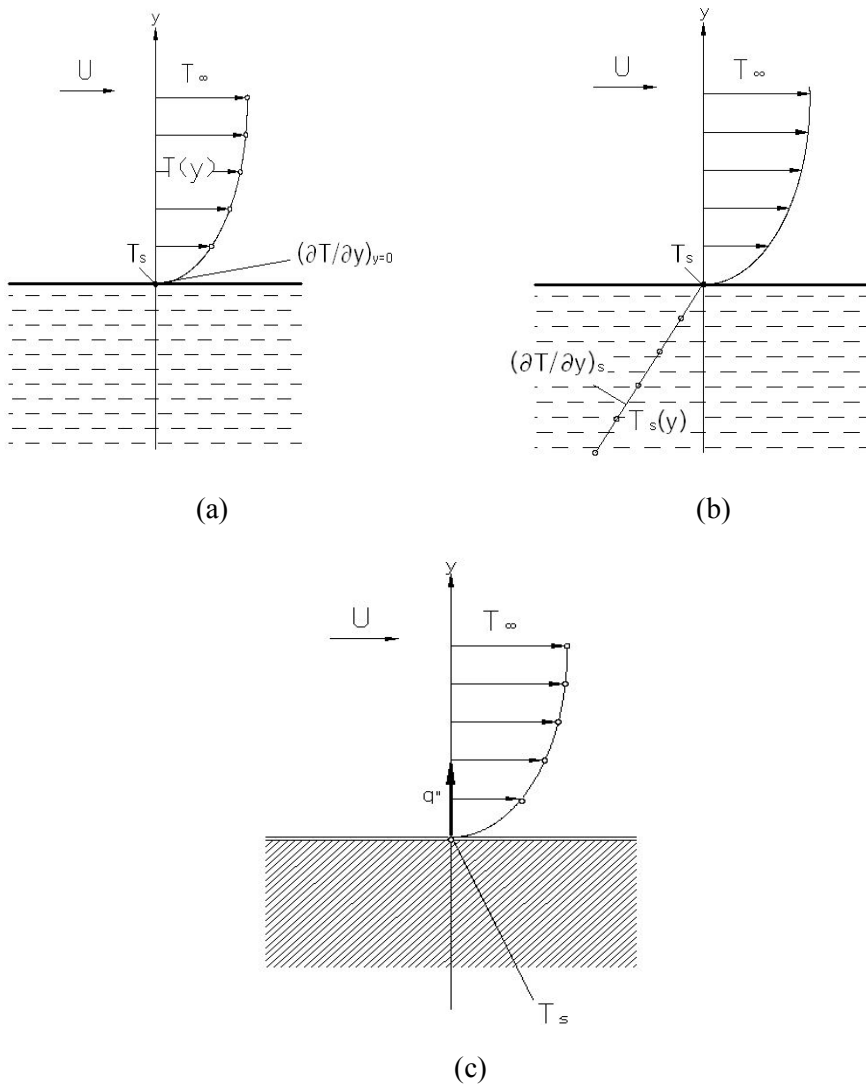


Fig. 3 Measurement methods of heat transfer coefficient

식 (2.1.8)을 이용하여 열전달계수를 실험을 통해 다음과 같이 측정할 수 있다.

1) 측정법-1

Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 주류의 온도 T_∞ 및 경계층 내의 온도분포 $T(y)$ 를 정밀하게 측정하고 난 후 벽면의 온도 T_s 와 온도구배 $(\partial T/\partial y)_{y=0}$ 을 구한다. 이들 측정치를 사용하여 식 (2.1.8)로부터 열전달계수 h 를 구한다.

2) 측정법-2

Fig. 3(b)처럼 고체측의 온도분포를 측정하고 고체표면의 온도 T_s 와 Fourier 식 (2.1.1)를 사용하여 열유속 q'' 을 구한다. 또, 주류의 온도 T_∞ 를 별도로 측정하여 식 (2.1.8)으로 부터 h 를 구한다.

3) 측정법-3

Fig. 3(c)와 같이 발열량을 알 수 있는 물체(전류를 가해서 가열되는 금속막 등)의 뒷면을 단열시키고 표면의 온도 T_s 및 주류의 온도 T_∞ 를 측정하여 식 (2.1.8)을 이용해 h 를 계산한다.

2.2 열전현상

열전현상은 두 개의 서로 다른 금속도선의 양 끝을 연결하여 폐회로를 만들고 그 접합부를 서로 다른 온도로 유지하면 두 접점사이에서 전위차가 발생하는 현상을 말한다. 열전현상은 제베크 효과(Seebeck Effect), 펠티에 효과(Peltier Effect), 톰슨 효과(Thomson Effect)로 나눌 수 있다[47].

먼저 Seebeck Effect는 1821년 독일의 물리학자 T. J. Seebeck에 의해 처음 발견 현상으로 양단간의 온도차를 이용하여 기전력을 얻어낼 수 있는 현상이다. Peltier Effect는 1834년에 프랑스의 J. C. A. Peltier가 발견한 현상으로 기전력을 인가하여 냉각과 가열을 하는 현상이다. Thomson Effect는 1851년 영국의 물리학자 W. Thomson이 발견한 현상으로 도체인 막대기의 양끝을 다른 온도로 유지하고 전류를 흘릴 때 줄열(Joul's Heat) 이외의 발열 또는 흡열이 일어나는 현상이다.

이러한 열전현상은 열펌프의 원리가 되며 반대로 적용하는 경우에 열전소자에 의한 발전의 원리가 된다[48].

2.2.1 Seebeck Effect[49]

도체의 온도차로 인해 직접 전압이 발생하는 현상으로, 물성치가 다른 두 종류의 도체 또는 반도체 A와 B를 접합시켜 폐회로를 만들고, 접합부에 열을 가해 온도차를 발생시키면 두 물질 A와 B의 양단에 전류가 발생하는데, 이러한 현상을 독일의 물리학자 T. J. Seebeck이 발견하여 Seebeck Effect라 한다. 그리고 이 전류를 열전류라고 하는데, 열전류가 흐르는 것은 기전력이 회로에 발생하였기 때문이므로, 이 기전력을 열기전력이라고 한다. 도체 내의 자유전자는 그 도체의 종류나 온도에 특유한 에너지로 움직이고 있다. 같은 종류의 도체라도, 고온의 것과 저온의 것을 접촉시키면, 전자에너지가 다르기 때문에 전자가 한쪽으로 이동하여 전위차가 생기고 이로 인하여 열기전력이 발생한다. 열기전력은 도체의 종류와 두 접점의 온도차에 의해서 변하는데 온도차가 커질수록 열기전력 또한 커진다.

두 도체 A와 B에서 발생하는 열기전력은 접점에 인가하는 온도의 함수로서 다음

과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{AB} = \int_{T_R}^T (\alpha_A - \alpha_B) dT |_{I=0} \quad (2.2.1)$$

V_{AB} : 기전력

I : 접점간의 전류량

T_R : 기준온도

α : Seebeck 계수

열전소자의 열전변환 효율은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P_s}{Q_s} \quad (2.2.2)$$

η : 열전변환 효율

P_s : Seebeck 효과로 인해 발생된 전력

Q_s : 고온부의 열량지수

또한, 고온부의 열량지수(Q_s)는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다. 식 (2.2.3)의 첫 번째 항은 전도열유속, 두 번째 항은 고온부의 냉각지수, 세 번째 항은 줄열지수를 나타낸다.

$$Q_s = K\Delta T + \alpha TI - \frac{1}{2}I^2R \quad (2.2.3)$$

2.2.2 Peltier Effect[50]

서로 다른 두 종류의 도체를 접합하여 접합부에 전류를 흘렸을 경우 접합부에서 줄열 외에 발열 및 흡열이 일어나게 되는 현상이 일어나는데 프랑스의 Peltier가 처음 발견했다고 하여 Peltier Effect라 한다. 도체 중에 전하를 운반하는 자유전자는 또한 열을 전하는 역할도 하고 있다. Peltier Effect에 의한 발열과 흡열은 인가하는 전류의 방향에 따라서 발열이 되기도 하고 흡열이 되기도 한다. 이러한 Peltier Effect를 응용하여 물체를 냉각시키는 현상은 별도의 기계적 장치가 없이 전기의 인가만으로 냉각시키기 때문에 전자냉각 또는 열전냉각이라고 한다.

이 현상은 도체의 접합부에서 열의 흡수 및 방출량을 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$Q_P = I(\Pi_A - \Pi_B) \quad (2.2.4)$$

Q_P : Peltier Effect로 인한 열의 흡수 및 방출량

Π : Peltier 계수

위의 식에서 Peltier 계수 Π 는 두 도체에 관한 물질상수로, 온도에 따라서도 다르다. Peltier 계수 아래의 식과 같다.

$$\Pi = T \times \epsilon \quad (2.2.5)$$

여기서, ϵ 는 각 도체의 ‘절대열전율’을 의미한다.

2.2.3 Thomson Effect

균질한 도체 또는 반도체에 온도 기울기가 있을 때 거기에 전류가 흐르게 되면 열의 흡수와 방출이 발생하게 되는 현상으로, 영국의 물리학자 Thomson이 발견하였기 때문에 Thomson Effect라고 한다. 온도 기울기와 전류의 양에 따른 열의 출입량을 수식으로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$Q_T = \sigma I \Delta T \quad (2.2.6)$$

Q_T : Thomson Effect로 인한 열의 흡수 및 방출량

σ : Thomson 계수

위의 식에서 비례상수 σ 는 ‘Thomson 계수’라 하고 수식으로 표현하면 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = T \frac{d\epsilon(T)}{dT} \quad (2.2.7)$$

Thomson 계수, Seebeck 계수, Peltier 계수 간에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{d^2 V_{AB}}{dT^2} = -T \frac{d}{dT} \left(\frac{\Pi_{AB}}{T} \right) \quad (2.2.8)$$

$$\Pi_{AB} = T \frac{dV_{AB}}{dT} = T \alpha_{AB} \quad (2.2.9)$$

2.2.4 p형과 n형 반도체 접합부에서 여러 계수의 관계

p형과 n형의 두 반도체를 접하였을 경우 Peltier 계수와 Seebeck 계수는 다음의 식과 같은 관계를 갖는다.

$$\Pi_{pn} = \Pi_p + \Pi_n \quad (2.2.10)$$

$$\alpha_{pn} = |\alpha_p| + |\alpha_n| \quad (2.2.11)$$

2.3 열전소자

Peltier 효과를 이용한 전자냉각시스템은 인가된 전기에너지를 이용하여 기계적인 구동 없이 냉각하는 방식으로서, Fig. 4에서 보이는 바와 같이 P형과 N형 반도체를 조합한 소자에 전류 $I[A]$ 를 인가하면, 냉각 대상에 접한 냉각면의 온도는 감소하고 반대편에 위치한 발열면의 온도는 상승하게 된다[51]. 또한, 전류의 인가 방향을 바꾸어 주는 것만으로 손쉽게 냉각면과 발열면을 바꿀 수 있다. 열은 냉각대상으로부터 저온면으로 흐르고 고온면에서 주위로 방출되며, 주어진 열전소자의 저온면에서 흡수할 수 있는 열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

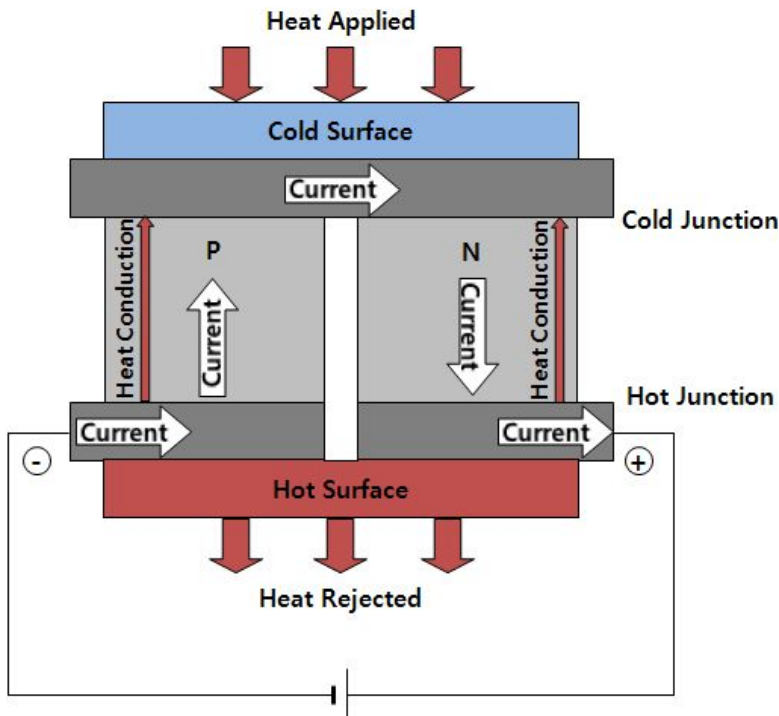


Fig. 4 Schematic diagram of thermoelectric module

$$Q_C = \alpha_S T_C I_C \quad (2.3.1)$$

Q_C : 열전소자 저온면에서 흡수할 수 있는 열량

α : Seebeck 계수

T_C : 열전소자 저온면의 절대온도

I_C : 열전소자로 흐르는 전류의 세기

Fig. 4에서 보는 바와 같이, 냉각면과 발열면의 온도차로 인하여 시간이 경과함에 따라 발열면으로부터 냉각면으로 열전도에 의한 열역류가 발생하게 되는데 이 열량은 Fourier의 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다[52].

$$Q_F = K_C A_C \frac{\Delta T}{\delta_C} \quad (2.3.2)$$

Q_F : 열역류의 발생에 의한 열량

K_C : 열전소자의 열전도계수

A_C : 열전소자의 단면적

ΔT : 냉각면과 발열면의 온도차

δ_C : 냉각면과 발열면의 거리

한편, 열전소자 내를 흐르는 전류에 의해 Joule열이 발생하게 되는데 이 열은 양분되어 각각 발열면과 냉각면으로 흐르고, 냉각면으로 역류하는 Joule열은 열전소자의 저항을 R_C 이라 할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_J = \frac{1}{2} I_C^2 R_C \quad (2.3.3)$$

열전소자에 의한 전열량은 식 (2.3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_C - Q_F - Q_J \\
 &= \alpha_S T_C I_C - K_C A_C \frac{\Delta T}{\delta_C} - \frac{1}{2} I_C^2 R_C
 \end{aligned}
 \tag{2.3.4}$$

또한, 냉각면의 접합부에서 제기되는 열량 Q_C 는 Peltier 효과에 의한 것에 Joule열에 의하여 발생하는 열의 반이 냉각면으로 흘러들어오는 것과 발열면과 냉각면의 온도차에 의한 열전도성 열전달량을 감하고 Thomson 효과를 무시한다면, 냉각면의 접합부에서 발생하는 흡열량 $Q_C [W]$ 는 식 (2.3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_C = \alpha T_C I - \frac{I^2 R}{2} - K \Delta T
 \tag{2.3.5}$$

발열면의 발열량 $Q_H [W]$ 는 식 (2.3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_H = \alpha T_H I + \frac{I^2 R}{2} - K \Delta T
 \tag{2.3.6}$$

열전소자에 걸리는 전압 $V[V]$ 는 Seebeck Effect에 의한 전압과 소자의 전기저항으로 인한 전압이 더해지기 때문에 소자에 공급되는 실제전력 $P[W]$ 는 다음의 식 (2.3.7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = IV = I(\alpha \Delta T + IR) = \alpha I \Delta T + I^2 R
 \tag{2.3.7}$$

위 식 (2.3.7)은 열전소자를 작동시키는데 필요한 전력을 나타내는 식으로서 우변의 첫 항은 제백효과(Seebeck Effect)에 의한 전압 강하량이고 둘째 항은 전기 저항에 의한 전압 강하량으로 이 두 항의 합이 소비 전력량이다.

어떤 물체를 냉각하려고 할 때 뺏어야 하는 열량은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q_C = Q_{active} + Q_{passive} \quad (2.3.8)$$

식 (2.3.8)에서 Q_{active} 는 Active Heat Load 로서 냉각시스템에 의해 발생하는 열을 의미한다. 일반적으로 전력 입력량(IV)과 같다.

$$Q_{passive} = Q_{conduction} + Q_{convection} + Q_{radiation} \quad (2.3.9)$$

식 (2.3.9)에서 나타낸 바와 같이 $Q_{passive}$ 는 $Q_{conduction}$, $Q_{convection}$, $Q_{radiation}$ 3가지 발생열로 구성되어 있는데 먼저, $Q_{conduction}$ 은 전선이나 나사 등에 의해 냉각시스템에서 외부로 열이 전달되는 경우를 말하며 식 (2.3.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{conduction} = KA \frac{dT}{dx} \quad (2.3.10)$$

$Q_{convection}$ 은 외부와 냉각되는 장치 사이의 온도차에 의해 발생하는 열량을 말하며 식 (2.3.11)와 같이 표현된다.

$$Q_{convection} = hA(T_{air} - T_C) \quad (2.3.11)$$

복사에 의한 $Q_{radiation}$ 은 일반적으로 무시되는 경우가 많은데 Q_{active} 가 작거나 ΔT 가 클 때 혹은 진공 상황에서는 중요하게 간주되면 식 (2.3.12)과 같이 표현된다.

$$Q_{radiation} = \sigma A \epsilon (T_{air}^4 - T_C^4) \quad (2.3.12)$$

열전소자의 성능계수(COP, Coefficient of Performance)는 소요되는 전력에 대한 냉

각 능력의 비로 나타낼 수 있고, 식 (2.3.5)와 식 (2.3.7)으로부터 성적계수를 구해보면 식 (2.3.13)과 같이 표현된다.

$$COP = \frac{\text{Rate of Heat Transfer}}{\text{Input Power}} = \frac{Q_C}{P} \quad (2.3.13)$$

$$= \frac{\alpha T_C I - \frac{I^2 R}{2} - K \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R}$$

앞에서 서술한 Q_C 의 식은 전류 I 의 2차식 이므로 다른 조건이 주어지면 Q_C 를 최대로 하는 전류 I_{\max} 가 존재한다.

열전소자의 냉각용량(Q_C)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_C(W) = V_{air} \times \rho \times C_P \times \Delta T_C \quad (2.3.14)$$

V_{air} : 공기의 풍량(체적)

ρ : 밀도

C_P : 비열

ΔT_C : 온도차

입력일 P 는 열전소자에 직접 인가되는 일과 열전소자 발열부 제어를 위해 사용되는 냉각팬에 인가되는 일의 합으로서 계산된다. 식은 다음과 같다.

$$P = P_{TM} + P_{Fan} \quad (2.3.15)$$

P_{TM} : 열전소자에 공급되는 입력 일

P_{Fan} : 냉각팬에 공급되는 입력 일

전자냉각시스템의 발열면이 방열판에 위치하고 흡열면이 대기 중에 위치하는 것을 고려하였을 때, 열전소자를 가진하여 대기중으로부터 열량 Q_2 를 흡수하고자 하는 것이 목적이고, 이 경우 성능계수는 식 (2.3.16)으로 나타낼 수 있다[53]. 또한, 다음과 같이 온도만의 함수로도 정리할 수 있다.

$$COP = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (2.3.16)$$

T_1 : 열전소자를 작동하기 전 냉각영역의 온도

T_2 : 열전소자를 작동한 후 냉각영역의 온도.

또한, 열전소자의 제백(Seebeck) 계수(α), 열저항(θ) 그리고 전기저항(R)은 열전효율계수로서 다음과 같이 표현된다[54-56].

$$\alpha = \frac{V_{\max}}{T_h} \quad (2.3.17)$$

$$\theta = \frac{1}{k} \frac{L}{2A} = \frac{\Delta T_{\max}}{I_{\max} V_{\max}} \frac{2T_h}{T_h - \Delta T_{\max}} \quad (2.3.18)$$

$$R = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \frac{T_h - \Delta T_{\max}}{T_h} \quad (2.3.19)$$

상부 전극을 포함하는 저온접합부가 완전히 단열되고 $Q_C = 0$ 일 때 소자에서 얻어지는 최대의 온도차 ΔT_{\max} 에 도달하고 식 (2.3.20)과 같이 표현된다[57].

$$\Delta T_{\max} = T_H - \frac{\sqrt{1 + 2ZT_H} - 1}{Z} \quad (2.3.20)$$

또한, 전류의 양이 증가함에 따라 Joule 열의 효과가 증가하기 때문에 성적계수가 증가하다가 감소한다. 따라서, 최대의 성능계수가 존재하며 이를 구하면 식 (2.3.21) 과 같이 나타낼 수 있다[57].

$$COP_{\max} = \frac{T_{ave}}{\Delta T} \left(\frac{\sqrt{1 + ZT_{ave}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{ave}} + 1} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.3.21)$$

$$T_{ave} = \frac{T_H + T_C}{2}, \text{ 평균 온도}$$

$$Z = \frac{\alpha^2}{RK} [K^{-1}], \text{ 성능 지수 (Performance index)}$$

2.4 컴퓨터 냉각 기법[7]

2.4.1 공기 냉각 기법

현재 컴퓨터의 냉각을 위해 가장 많이 사용하고 있는 냉각 방식은 방열판과 냉각팬을 이용하여 공기를 강제대류 시켜 냉각시키는 방식이다. 컴퓨터에서 CPU나 GPU, Mainboard의 냉각을 위해 제공되는 가장 기본적인 냉각 시스템으로서 제작비 대비 좋은 냉각성능을 낼 수 있다는 큰 장점이 있기 때문에 대부분의 OEM 업체에서 취급하는 냉각 방식이며, 공기 냉각 기법에 사용되는 냉각팬은 크게 슬리브베어링 방식과 저소음 유체베어링 방식으로 나뉜다. 무엇보다도 공기 냉각 기법의 성능을 좌우하는 핵심은 방열판의 방열 능력에 있다. 방열판의 냉각 성능을 극대화함에 있어서 방열판의 크기도 중요하지만 재질과 방열 면적 그리고 팬과의 조합이 복합적으로 고려되며, 일반적으로 방열판의 재질로는 열전도율이 좋은 알루미늄과 구리 등이 주로 사용된다. 이론상 구리 재질이 알루미늄에 비해 뛰어난 열전도율에 의한 방열이 가능한 것으로 알려져 있으나 방열판의 성능은 설계 방식, 재질 혼합방식, 구조 그리고 냉각팬의 성능 등에 따라 얼마든지 달라질 수 있다. 오히려 은과 구리는 열전도율은 좋은 편이지만, 경제성, 부식성, 낮은 기계적 강도 등의 이유로 알루미늄만큼 많이 사용되고 있지는 않다. 이러한 방열판의 가장 큰 역할은 발열 표면적이 작은 발열체로부터 발생하는 열을 전달받아 골고루 방열판 전체로 분산시켜 발열 표면적을 넓힘으로써 공기 중으로 방열이 더욱 원활하게 되도록 하는 것이다. 이러한 방열판의 방열효과를 향상시키기 위해 표면적은 넓어야 하며, 공기가 원활하게 유동할 수 있는 통로가 확보되는 구조여야 한다. 즉 넓은 방열 면적과 원활한 공기 유동 통로의 구조를 가지는 것이 방열판과 냉각팬을 이용한 공기 냉각 기법에서 중요한 인자로 작용하게 된다.

일반적인 공기 냉각 기법의 기본 구조에 있어서 CPU의 Heat spread(CPU 코어를 보호하고 열을 고루 분산하기 위한 금속판)와 방열판은 모두 금속으로 이루어져 서로 접촉면을 공유하게 된다. 이들 금속면의 연마 정도에 따라 접촉 저항의 크기가 큰 폭으로 변화하게 되고 냉각 능력에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 방열 성능

을 개선하기 위해서는 두 금속 접촉면을 밀착시켜 접촉면의 접촉 압력을 높여주거나 두 금속의 표면 평탄도를 높여 접촉면의 간격이 없이 완벽하게 밀착시키는 방법 등을 사용한다. 첫 번째 방법이 쿨러 고정장치의 장력을 높여주는 방법이며, 그 다음이 히트 스프레더와 방열판의 금속면을 평평하게 만드는 것이다. 여기에 열전도율이 높은 물질로 두 접촉면의 간극을 제거하는 방법으로 방열 능력을 높일 수 있다. 그러나 이러한 공기 냉각 기법은 다른 냉각 기법들에 비해 냉각성능이 낮은 단점을 가지고 있다.

2.4.2 히트파이프 냉각 기법

가장 보편화된 냉각방식인 공기 냉각 기법을 고수하면서 보다 더 효율적인 냉각 방식을 강구하게 된 결과 히트파이프를 채용한 냉각 방식이 선보이게 되었다. 히트파이프는 이미 오래 전부터 다른 산업의 재료로 사용되고 있었다. 최근에 개발된 컴퓨터에 사용되는 냉각시스템에는 히트파이프 냉각 기법의 채용이 늘고 있으며, 최근 출시된 고성능 CPU에 기본적으로 포함되는 냉각시스템에도 히트파이프의 장착이 늘어나고 있는 추세이다. 히트파이프는 밀폐된 용기 내의 작동유체의 상변화 에너지를 이용하는 열전달 기기로서 일반 공랭 쿨러와 비슷한 외형에 단순한 원리와 구조를 가지고 있다. 히트파이프 냉각 기법은 CPU의 Heat Spread에서 전달된 열이 히트파이프 증발부의 작동유체를 기체로 상변화 시키면 기화된 작동유체가 온도차 혹은 압력차로 인해 응축부로 이동하여 응축부와 밀착되어 있는 방열판이나 Heat Spread로 전달되어 자연냉각 혹은 냉각팬에 의한 강제 냉각으로 열을 방출시키는 방식이다. 히트파이프 냉각 기법은 작동하는데 별도의 동력을 필요로 하지 않고 무게가 가벼우며 반영구적이어서 유지, 보수 등의 추가 비용이 적게 드는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 최근에는 Mainboard, GPU, HDD, 케이스 냉각 등 컴퓨터 시스템의 냉각을 위해 전반에서 사용되고 있다. 그러나 이러한 히트파이프는 설계와 제조 공정이 까다롭기 때문에 공기 냉각 기법에 비해 제작 단가가 높아진다는 단점을 가지고 있다.

2.4.3 냉동사이클 냉각 기법

가스 압축방식의 냉동사이클의 원리를 적용한 냉각 기법으로서 액상 냉매가 열원에 설치한 기화기에서 열을 획득하여 증기가 된다. 이 증기는 팽창밸브와 응축기를 통해 외부공기로 열을 방출한다. 공기 냉각 기법이나 수냉각 기법은 상온에서만 냉각이 가능한 반면에, 냉동사이클 냉각 기법은 주변 공기 온도 이하에서도 사용이 가능하기 때문에 일반 사용자 보다는 시스템을 규정 이상의 클럭으로 올려 사용하는 오버 클럭시에 사용한다. 그러나 냉각 장치가 고가이며, 상온 이하의 냉각에 의해 이슬 맺힘 현상이 발생하고, 이로 인해 전자기기에는 치명적인 수분의 발생으로 부품손상을 유발하는 문제가 있어 보편화 되어 사용되지 못하고 있는 실정이다.

2.4.4 열전소자 냉각 기법

Seebeck 효과, Peltier 효과, Thomson 효과와 같은 열전 현상을 이용한 냉각 기법으로, 열전소자 이용한 냉각을 구현하기 위해서는 두 개의 서로 다른 금속이 두 개의 접점을 가지고 있어야 한다는 전제 조건이 필요하다. 그래서 열전소자를 이용한 열전모듈(Thermoelectric Module)은 여러 개의 소자를 직렬로 이어붙인 형태를 하고 있다. 열전소자는 냉각 성능은 탁월하지만, 과열 문제와 열전도에 의한 열역전 현상 등의 문제점이 있다. 열전소자의 양단에 전압을 걸어주었을 경우 한 면에서는 냉각이 이루어지지만 그와 반대면에서는 발열이 이루어진다. CPU의 경우 발생하는 열과 합쳐져 엄청난 열을 소산해야 함과 동시에 그에 상응하는 전력까지 요구하게 되는데 이 때 발생하는 열을 방출하기 위해 냉각수를 이용한 방열판을 사용하기도 하며, 온도가 이슬점 이하로 떨어졌을 경우 CPU에 수분이 응결되어 CPU와 기타 시스템에 가져오는 위험도의 증가 때문에 온도 컨트롤이 요구되므로 그에 따른 제어가 따로 제공되도록 상용화가 이루어져 있다.

2.4.5 열 사이폰 냉각 기법

응축기와 증발기를 사용한다는 점에서 수랭식 냉각 기법 혹은 냉동사이클 냉각 기법의 냉각시스템과 유사하지만, 냉매의 압력과 수두 차에 의한 유체의 위치 에너지를 순환동력으로 이용하기 때문에 별도의 동력공급이 필요하지 않으나, 발열부의 상부에 응축기가 위치해야 한다. 팬을 사용하지 않으므로 소음이 없으며, 별도의 동력을 필요로 하지 않기 때문에 기계적인 고장이 발생하지 않는다는 장점도 가지고 있다. 그러나, 시동 시 작동 불능에 따른 시스템 고장의 위험성이 높아 이 부분에 대한 개선의 여지가 남아 있고, 방열판 또는 응축기에서 자연대류에 의한 냉각만으로는 고발열체의 냉각에 어려움이 있어 부가적으로 냉각팬을 부착하여 상용화가 일부 이루어졌다.

2.4.6 수냉각 기법

물은 현존하는 열전달 매체로 사용되는 유체 가운데 가장 경제적이고, 효율성이 높아 이전부터 지속적인 연구를 통하여 다양한 분야에서 사용되어 왔다. 물은 비열이 높아 잠열과 현열 이동에 있어 타 유체에 비해 뛰어난 열 함유 능력을 가지는 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에, 전기, 전자 장비에 치명적임에도 상용화가 이루어지고 있다. 수냉각 기법은 공기 냉각 기법에 비해 냉각성과 소음에 있어 더 좋은 성능을 가지는 것은 사실이지만, 물을 강제로 순환시키는 펌프와 라디에이터 팬 등으로 인해 완전한 무소음은 기대하기는 어렵다. 그러나 공기 냉각 기법에 비해 만족할 만한 소음과 냉각 성능을 가지고 있다. 수냉각 기법의 구성은 워터 블록과 저수조, 펌프, 라디에이터, 연락관 등으로 이루어진다. 현재 지속적인 연구를 통해 최적화된 다양한 워터 블록과 펌프, 고효율의 라디에이터 등이 상용화되고 있다.

2.5 적외선 열화상 검사의 원리 및 측정 이론[58, 59]

적외선 열화상 검사(Infrared Thermography Testing; ITT)는 원리적으로 검사 대상인 대상체로부터 방사되는 적외선을 적외선 측정기기를 사용하여 에너지를 감지하여 그 신호를 영상적으로 매핑한 열화상에 의해 대상체의 온도분포를 감지하여 결함 또는 상태를 비파괴 방식으로 검사하므로 일명 열화상 비파괴검사(Thermal Non-Destructive Testing; TNDT)로 불리운다.

모든 물체는 절대온도 0K 이상에서 적외선 복사에너지를 방출한다. 복사란 전도와 대류가 고체, 액체, 기체 등의 매질을 이용하여 열이동하는 것과는 달리 매질을 통하지 않고 복사선에 의하여 열을 이동하는 것을 말한다. 적외선 열화상 측정 원리는 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 것은 장파장의 적색으로, 낮은 곳은 단파장의 청색으로 나타내는 것이다. 따라서 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알 수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정 할 수 있다. 적외선 카메라의 원리는 계략적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- (1) Infrared energy는 imager의 광학렌즈를 통과한다.
- (2) Energy는 imager의 sensor에 모아진다.
- (3) Sensor는 infrared energy를 electronic signal 변환한다.
- (4) 열 영상은 물체 표면의 온도를 수천 개의 점으로 높낮이에 따라 표현한다.

적외선은 에너지 전달 현상의 일종으로 가시광선보다 파장이 길고 마이크로 광선보다는 짧은 약 $0.8\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 파장대역을 갖는 전파의 일종이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 적외선 열화상카메라는 $2\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 대역의 파장을 이용하고 있으며, $2\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 대역의 SW(Shortwave) 영역과 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 대역의 LW(Longwave) 영역으로 나누어 사용한다. 특히, SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.

적외선은 에너지를 전달시킬 때 전파의 형태로 전달되기 때문에 에너지 전달 매개물은 필요로 하지 않아 열 손실이 없고 비접촉으로 직접성을 가지지만 물체의 표면에만 적용되는 단점이 있다. 즉 적외선은 넓은 표면적을 가진 얇은 물체에 적합하다. 일반적으로 적외선 방사는 피사체의 종류와 표면상태, 파장과 온도에 따라 다르게 나타나고 이와 같이 서로 다른 방사량을 구분하는 것이 방사율(ϵ)이며 $0 < \epsilon < 1$ 의 범위를 갖고, 완전 흑체의 경우 방사율은 1이다.

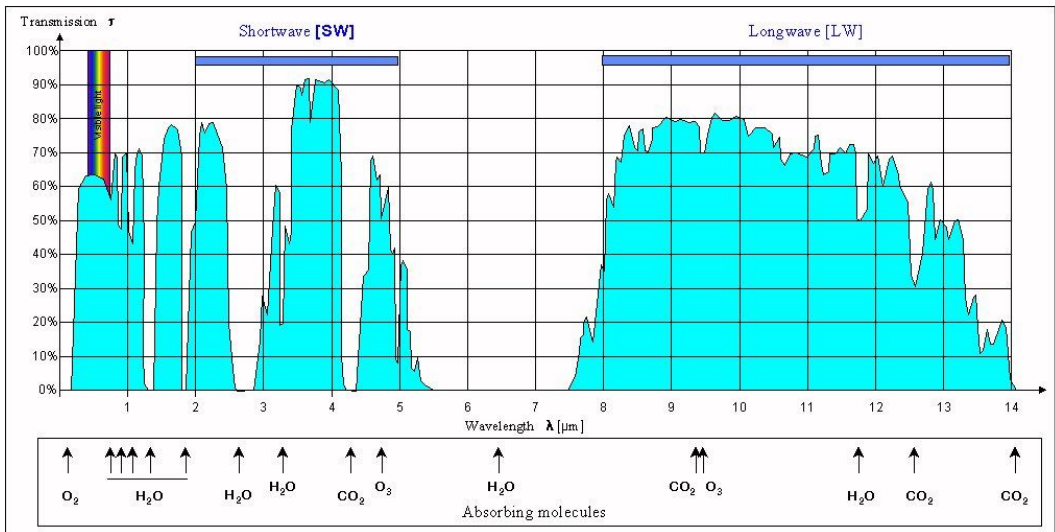


Fig. 5 Atmospheric transmission over 1 nautical mile

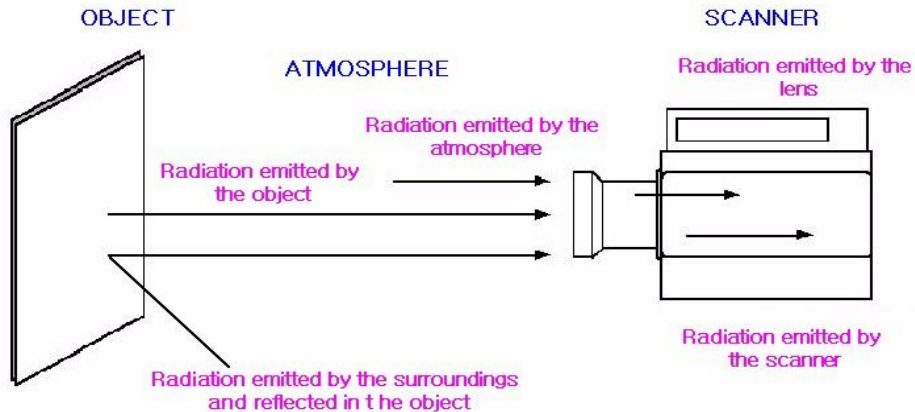


Fig. 6 Radiation patterns of the general measurement condition

Fig. 6은 일반적인 열화상 카메라 측정과정에서 방사형태를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 적외선 열화상 카메라(Thermovision 900, AGEMA)는 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장중에서 적외선 부분만을 검출하여 온도분포를 측정한다. 적외선 스캐너는 일정한 분광 범위에서 적외선 복사선을 측정하고 이는 일반 적외선 부분만을 추출하여 전기신호로 변환하여 영상을 통해서 열 분포를 보여주게 된다. 어떤 파장이라도 그것에 부딪히는 모든 복사선을 흡수하는 물체를 흑체라고 정의하는데 이는 모든 빛을 똑같이 방출시킬 수 있고, 온도 검출은 흑체를 기준으로 하여 보정된 값으로 나타낸다. 흑체 온도 함수로 나타내는 보정기능은 대상물의 정확한 온도로 측정하기 위해 실시되며, 방사에너지 변환에 사용된다. 스캐너 디텍터에 의해 받아들여진 방사에너지는 물체로부터 뿐만 아니라 대기, 스캐너 광학계에서 나오는 방사에너지도 포함하고 있으며 대상물의 온도계산에 영향을 미친다. 따라서 이런 모든 것을 고려하여 대상물의 온도를 계산하여야 하며, 모든 인자를 고려한 온도 측정 공식은 다음과 같이 표현된다.

$$E_m = E(T_{obj}) \times r \times \epsilon + r(1 - \epsilon) \times E(T_{amb}) + (1 - r) \times E(T_{atm}) \quad (2.5.1)$$

여기서, 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다. 또한, $E(T)$ 는 온도 T 일 때 흑체로부터 방사된 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이고 E_m 은 측정된 총 방사량의 온도 값이며 r 은 유효한 대기 전달, T_{atm} 와 T_{amb} 은 각각 대기와 주위의 온도를 의미한다. 온도는 식 (2.5.1)을 기초로 하여 열화상 카메라에서 자동적으로 계산되거나 측정환경에 따라 방사, 피사체와의 거리, 상대습도, 대기온도 및 반사된 주위온도 등의 피사체 매개변수들을 고려하여 실험을 수행하여야 한다.

제 3 장 실험 장치 및 방법

3.1 전자냉각시스템

본 연구에서는 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 통해 컴퓨터 내부의 발열을 제어하고 그 효과를 개선하기 위하여, 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 제작하고, 그 열전소자의 냉각면에 방열판을 장착한 전자냉각시스템과 방열판과 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템을 제작하였다.

3.1.1 전자냉각시스템의 구조

열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 전체적인 구성은 Fig. 7와 Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 열전소자(Thermoelectric Module), 열전 소자의 발열면에서 발생하는 열을 방출시키기 위한 방열판(Heat Sink), 방열판의 방열을 돕기 위한 냉각팬(Cooling Fan), 열전소자를 방열판에 고정시키고 냉각부의 열전도를 향상시키기 위한 냉각플레이트(Cooling Plate), 열전소자에서 발생된 열이 방열판을 통해 빠져나가기 전에 냉각영역으로 전도되는 것을 방지하기 위한 단열재(Heat Insulator)로 구성되어있다.

본 연구를 위해 제작된 전자냉각시스템에 장착된 열전소자의 대략적인 형상은 Fig. 9 나타내었다. 또한, 열전소자의 주요 제원 및 모델명은 Table. 1[60]에 나타내었고, 개략적으로 다음과 같다. 제조회사는 AceTec사이고 모델명은 HM6040로써 에너지 변환 재료인 열전반도체로서 P형 및 N형 반도체로 구성되었으며, P형 반도체

는 전자가 부족한 반도체이며, N형 반도체는 전자가 초과된 반도체이다. P형 반도체와 N형 반도체를 Π 자 형태로 연결하여 직류 전류를 공급하였을 경우, 서로 다른 P형과 N형 반도체 내에서 같은 방향으로 전자가 열을 이동시켜 한쪽 면은 열이 모이기 때문에 발열 작용이 일어나고 다른 면은 열이 이동하여 없어졌기 때문에 냉각 작용이 일어나게 된다. 에폭시실링을 사용하여 기존의 열전소자에서 냉각면과 발열면의 온도차로 인해 발생하던 습기에 의한 단락문제를 근본적으로 해결하였고, 기계적인 강도와 열전도성 또한 개선된 열전소자를 선정하여 사용하였다.

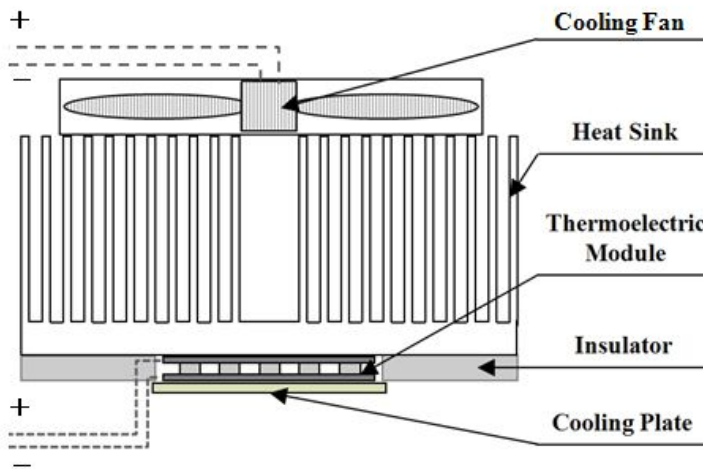


Fig. 7 Schematic diagram of cooling system

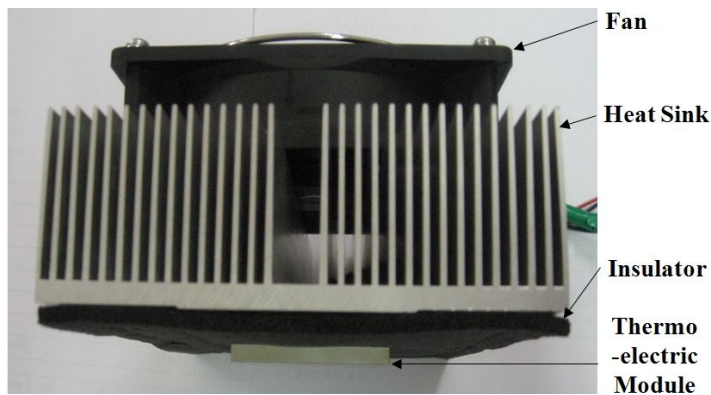


Fig. 8 Photograph of cooling system

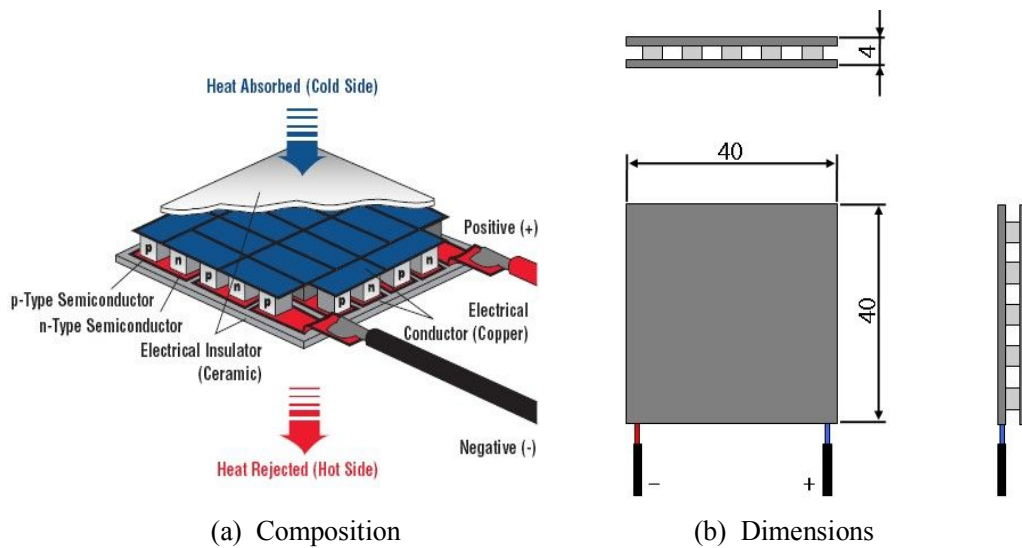


Fig. 9 Schematic diagram of thermoelectric module

Table 1 Performance specifications of thermoelectric module

Specifications(HMN6040)	Unit	Value
Q_{\max}	W	53
I_{\max}	A	6.0
V_{\max}	V	15.5
ΔT_{\max}	°C	72
Weight	g	23.21
Number of Thermocouples (p-n Type semiconductor)	pair	81
Dimensions	mm × mm × mm	40 × 40 × 4.0

또한, 본 실험에 사용되는 열전소자의 최대허용전압은 15V이지만, 본 실험에서 사용되는 전자냉각시스템은 전자기기의 발열부 온도제어를 위해 제작한 것이므로 0℃이하의 온도로 낮아질 필요가 없기 때문에 온도가 0℃이하로 내려가지 않는 범위에서 일정한 온도를 유지하고, 장시간 사용에도 열전소자에 무리를 발생하지 않기 위해 직류 전원공급장치를 통해 12V의 전압을 열전소자에 공급하였다. 또한, 열전소자의 특성상 인가된 전압에 의해 냉각면의 온도가 낮아질수록 발열면의 온도는 높아지기 때문에 발열면에서 발생하는 고온의 열원을 제어하지 못하면 발열면의 열이 열전소자 내부로 전도되어 소자가 파괴되거나 냉각면의 온도가 높아질 우려가 있기 때문에 열전소자 발열면의 방열은 매우 중요하며 이를 위해 발열면에 방열판(Heat sink)과 냉각팬(Cooling fan)을 장착하였다.

방열판의 제원 및 형상은 Fig. 10와 Table 2에 나타내었다. 방열판은 공기와 닿는 표면적을 넓힌 구조이기 때문에 열전소자의 발열면에서 발생한 열을 방열판으로 전체로 넓게 분산시켜 발열면의 방열을 더 원활하게 한다. 열전소자의 발열면에 방열판을 밀착하여 장착하였으며, 발열면에서 방열판으로 흡수된 열이 공기의 대류로 인해 다시 전자냉각시스템의 냉각영역으로 들어가는 것을 방지하고 그 외의 외부의 온도로부터 발생하는 영향을 최소화하기 위하여 방열판에 단열재를 부착하였다.

또한, 열전소자의 발열면과 방열판을 정확하게 밀착하여 고정시켜야 열전소자에서 발생된 열이 더 원활하게 방열판으로 전도되기 때문에 열의 방출 또한 원활하게 될 수 있다. 이를 위해 열전도율이 좋은 재료를 사용하여 냉각플레이트(AS52)를 만들어 열전소자와 방열판을 완전하게 밀착시켜 고정하였다. 이렇게 방열판을 잘 장착했음에 불구하고, 방열판만으로 열전소자의 발열면에서 발생하는 열을 충분히 방열하기 위해서는 방열판의 크기가 커야하고 주위의 온도에 따라 방열 능력이 차이가 발생하기 때문에, 방열판의 방열성능 향상을 위해 냉각팬을 장착하여 발열면에서 발생하는 열의 방출이 더욱 원활하게 될 수 있도록 하였다. 또한, 발열면의 온도를 제어함으로써 열전소자의 파손을 방지하고 냉각면의 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 냉각팬은 일반적으로 PC의 냉각에 많이 사용하는 크기와 성능의 냉각팬을 사용하였고, 그 형상은 Fig. 11에 나타내었다. 냉각팬은 제원을 토대로 DC 12V, 0.3A를 공급하여 작동시켰다.

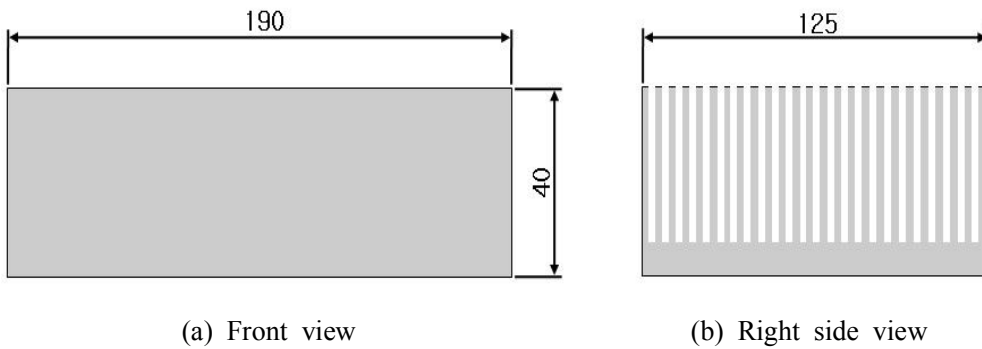


Fig. 10 Dimensions of heat sink

Table 2 Performance specifications of heat sink at heat side

Specifications	Value	Units
Material	Al-alloy 60series	
Weight	940	g
Type	Fin	
Dimensions	190 × 125 × 40	mm × mm × mm



Fig. 11 Photograph of cooling fan

3.1.2 방열판을 장착한 전자냉각시스템

전자냉각시스템에 이용된 열전소자는 냉각면의 면적이 작기 때문에 국소 부위에 적용하기에 큰 어려움이 없지만, 컴퓨터나 전자기기 등 넓은 공간의 발열을 제어하기에는 열전달 범위가 작다는 문제가 있다. 냉각성능을 높이기 위해 무작정 인가 전압을 높이면 냉각면의 온도가 낮아져 냉각성능을 좋아지겠지만, 열전소자의 냉각면이 결빙되거나, 주위의 온도차로 인해 이슬이 맺히거나, 나아가서는 열전소자 및 전자기기가 파손되는 문제가 발생할 수 있다.

열전소자나 전자기기에 무리를 주지 않으면서 보다 나은 냉각성능을 얻기 위해, 앞서 제작한 전자냉각시스템의 냉각면에 열전도율이 좋은 방열판을 부착하여 냉각면의 열전달 면적을 크게 하였다. 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템의 개략도와 사진은 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 이 시스템에서 역시 발열면과 냉각면에서 발생하는 온도차로 인한 열손실을 최소화하기 위하여 발열면의 방열판과 냉각면의 방열판 사이를 단열 시켰다.

열전소자 냉각면의 열전달 면적을 증가시키기 위해 사용된 방열판의 제원은 Table 3에 정리하였다.

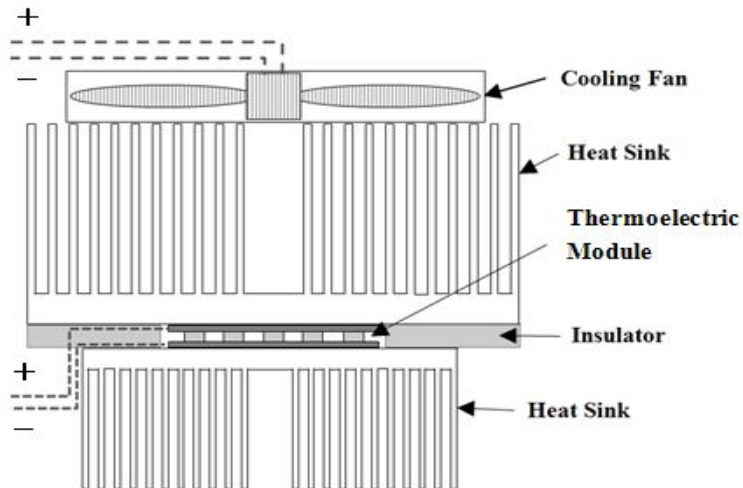


Fig. 12 Schematic diagram of cooling system attached heat sink at cold surface of thermoelectric module

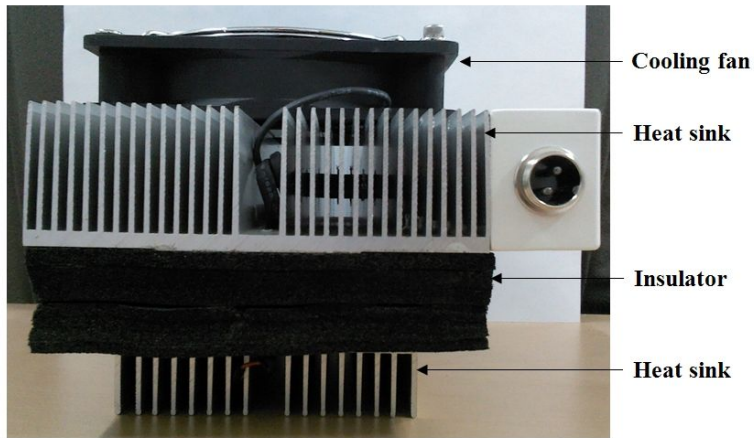


Fig. 13 Cooling system attached heat sink at cold surface of thermoelectric module

Table 3 Performance specifications of heat sink in cold side

Specifications	Heat sink in cooling section
Material	Al-alloy 60series
Weight	300 g
Type	Fin
Dimensions	130 mm × 95 mm × 25 mm

3.1.3 방열판과 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템

3.1.2절에서 제작한 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템에서 발생한 냉기를 강제대류를 이용하여 냉각영역에서 더욱 원활하게 순환시키기 위하여 냉각면의 방열판에 송풍팬(Flow Fan)을 장착하였으며, 개략도와 사진은 Fig. 14과 Fig. 15에 각각 나타내었다.

방열면의 온도제어를 위해 사용된 냉각팬과는 별도로 냉기를 냉각영역 전체에 원활하게 순환시키기 위해 장착된 송풍팬은 DC 12V, 0.23A를 공급하여 작동시켰다.

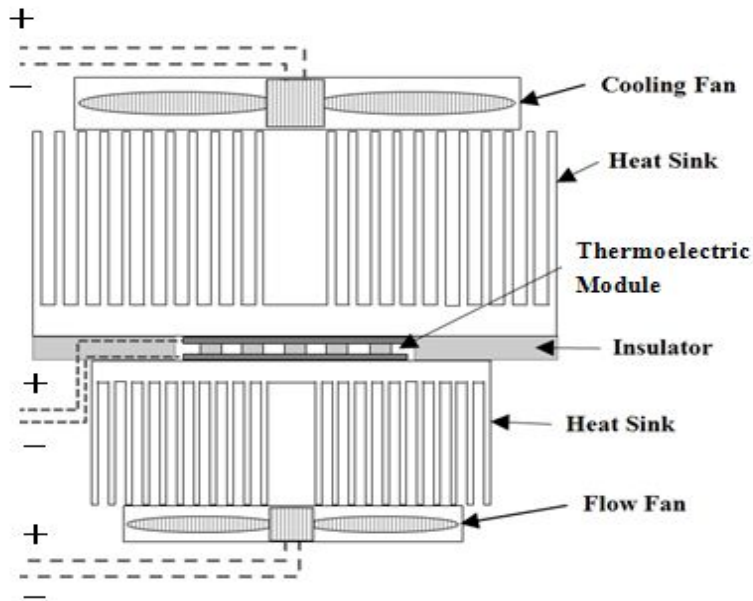


Fig. 14 Schematic diagram of cooling system attached heat sink and flow fan at cold surface of thermoelectric module

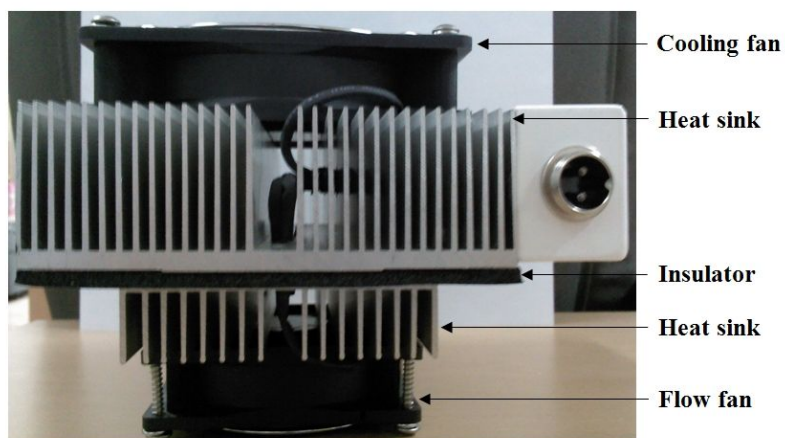


Fig. 15 Cooling system attached heat sink and flow fan at cold side of thermoelectric module

3.2 컴퓨터 내부의 온도 측정 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 전자냉각시스템을 적용한 컴퓨터의 발열제어 성능을 확인하고자 한다. 먼저, 기존의 냉각시스템의 성능을 알아보기 위해 일반적으로 많이 사용하는 공기 냉각식 냉각시스템을 사용한 컴퓨터 내부의 온도분포를 측정해 보았다. 실험에 사용된 컴퓨터는 직장이나 가정에서 일반적으로 사용하는 사양의 제품으로 선택하였다. 컴퓨터의 제원은 Table 5에 정리하였다. 또한 사용된 컴퓨터의 크기는 가로 × 세로 × 높이가 390mm × 170mm × 360mm이고, 컴퓨터 내부의 발열을 제어하기 위한 유효 체적은 약 360mm × 160mm × 350mm이다. 전자냉각시스템의 냉각면에 장착된 방열판에서 냉기를 방출하기 때문에 실제 냉각체적은 방열판의 크기와 같은 130 mm × 95 mm × 25 mm 이다. 본 연구에 사용된 컴퓨터의 유효 발열체적과 냉각시스템의 냉각체적의 비는 약 6.5 : 1 이다.

컴퓨터 내부의 온도분포 측정 실험을 위한 장치는 Fig. 16에서 나타낸 바와 같이, 온도측정의 대상이 되는 컴퓨터, 온도측정을 위한 K-type 열전대, 데이터 획득 장치(Yokogawa, DAQ100), 측정된 데이터를 저장할 컴퓨터로 구성되어 있다. 정확한 온도측정을 위해 실험 전에 모든 열전대들은 온도 보정을 실시하였고, 열전대를 통한 열전도의 영향도 최소화하기 위하여 Fig. 17에서 보는 바와 같이 모든 열전대는 온도측정부분을 제외한 나머지 부분을 스테인리스 튜브를 사용하여 절연처리 하였다. K-type 열전대는 신뢰성이 높아 산업용으로 가장 널리 사용되는 열전대로써, 측정 온도 범위는 -200℃ ~ 1,250℃이다.

온도분포 측정 포인트는 Fig. 18에서 나타낸 바와 같이, 일정한 간격으로 컴퓨터 내부의 전 영역에서 고르게 온도분포를 측정하기 위하여 9개의 포인트를 선정하였고, 컴퓨터를 작동시킨 후 1시간 동안 측정하였다. 또한, 컴퓨터의 주요 부품인 HDD, CPU, GPU, Power supply에서 발생하는 온도변화를 1시간 동안 측정하였다. 열전대에서 측정된 온도는 데이터 획득 장치에 의해 매 5초 간격으로 컴퓨터에 저장하도록 하였다. 정확한 온도 데이터 획득을 위해 대기의 온도는 약 24℃로 맞추어 실험을 수행하였으며, 동일한 조건하에서 3회에 걸친 반복실험을 수행하여 얻어진 온도 데이터의 평균값을 사용하였다.

Table 4 Performance specifications of the computer

Items	Specification
CPU	Intel Core™ 2 Quad processor Q9300
Graphic Card	nVidia Geforce 8600 GT 512MB
HDD	500GB(7200rpm S-ATA2)
Power Supply	300W

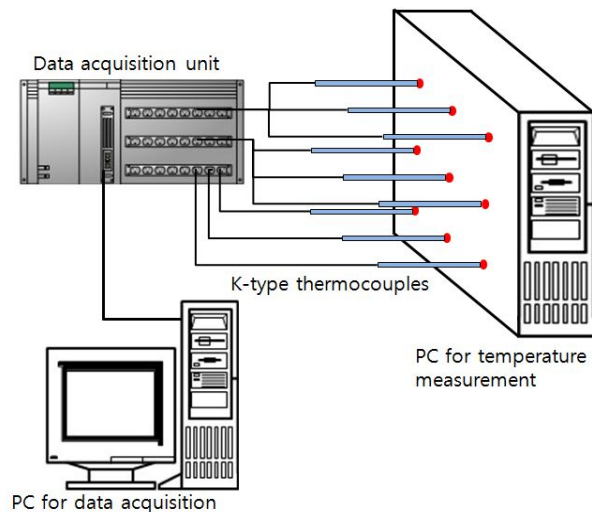


Fig. 16 Schematic diagram of experimental apparatus for temperature measurement inside the computer

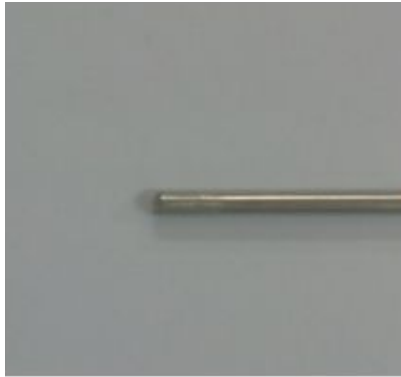


Fig. 17 Photograph the insulation process of a thermocouple

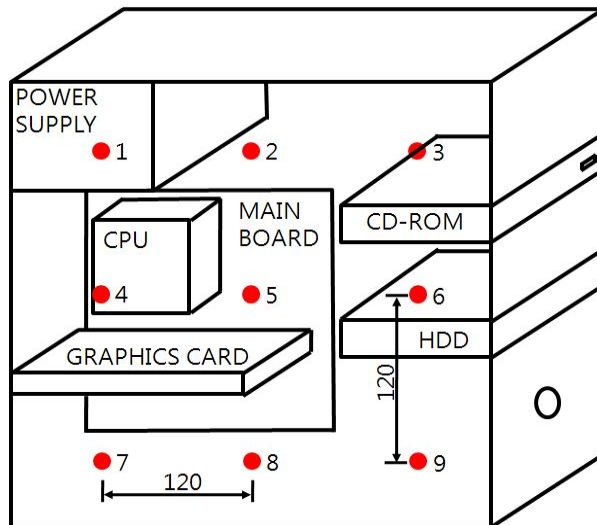


Fig. 18 Schematic diagram of measurement points for temperature measurement inside the computer

3.3 전자냉각시스템의 온도분포 측정 실험장치 및 방법

3.3.1 방열판을 장착한 전자냉각시스템

본 연구에서는 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 발열제어 효과를 고찰하기 위해 먼저 열전소자의 냉각면에 방열판을 부착하여 냉각면의 면적을 크게 한 전자냉각시스템을 장착한 컴퓨터 내부의 온도 측정 실험을 세 가지 방법으로 수행하였다.

Fig. 19에서 보는 바와 같이 앞 절의 온도분포 측정실험에 사용한 컴퓨터에 직접 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템을 장착하여 온도분포 측정실험에서와 같은 9개의 포인트에서 온도분포의 변화를 측정하였다.

본 실험을 위한 실험 장치는 Fig. 20에서 보는 것처럼 온도측정의 대상이 되는 컴퓨터, 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템, 9개의 K-type 열전대와 데이터 획득 장치(Yokogawa, DAQ100), 데이터 수집을 위한 PC로 구성되었다.

냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템을 컴퓨터에 직접 장착한 온도분포 측정실험은 두 가지로 수행하였다. 첫 번째 실험에서는 컴퓨터를 작동시키고 동시에 전자냉각시스템에 12V의 전압을 인가하여 작동시켜서, 컴퓨터 내부의 온도 측정 실험에서와 동일한 9개의 지점에서 1시간 동안 온도분포 변화를 측정하였다. 두 번째로는 앞의 실험에서와 같은 컴퓨터와 전자냉각시스템을 이용하여 실행하였으며, 컴퓨터를 1시간 작동시켜 내부온도가 일정수준으로 높아지게 한 후, 전자냉각시스템을 작동시켜 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포 변화를 1시간 동안 측정하였다.

세 번째 실험은 전자냉각시스템을 컴퓨터에 직접 장착하지 않고, Fig. 21과 Fig. 22에서 보는 바와 같이 아크릴 용기를 제작하여, 용기 내에 온도 측정의 대상이 되는 컴퓨터를 케이스를 제거한 후 설치하고 전자냉각시스템의 냉각면은 제작된 아크릴 용기 내부에 위치시키며 발열면은 아크릴 용기 외부에 위치시킨 후, 단열재를 이용하여 외부공기와 내부공기를 완전히 차단시킨 상태에서 수행하였다. 이때 사용된 아크릴 상자의 제원은 가로 × 세로 × 높이가 각각 390mm × 170mm × 360mm 이고 두께가 5mm이다. 기존의 컴퓨터의 발열 제어를 위해 사용한 공기냉각식 냉각

시스템은 외부공기의 온도에 의해 냉각성능이 영향을 많이 받고, 외부공기에 의해 컴퓨터 내부가 쉽게 오염되기 때문에 외부환경에 영향을 받지 않는 냉각시스템을 만들기 위해 위와 같은 장치를 구성하여 실험을 수행하였다.

그 외에, 열전대, 데이터 획득 장치, 데이터 수집을 위한 PC는 앞선 실험과 동일하게 사용되었고, 측정지점 역시 앞선 실험에서와 동일한 9개의 포인트에서 측정되었다. 실험 방법은 컴퓨터를 작동시키고, 동시에 전자냉각장치를 작동시켜 1시간 동안의 온도분포 변화를 측정하였다.

모든 실험에서 측정된 온도는 데이터 획득 장치에 의해 매 5초 간격으로 PC에 저장 되었고, 정확한 온도 데이터 획득을 위해 실험실의 온도는 약 24℃로 설정하였으며, 동일한 조건하에서 3회에 걸친 반복실험을 수행하여 얻어진 온도 데이터의 평균값을 사용하였다.

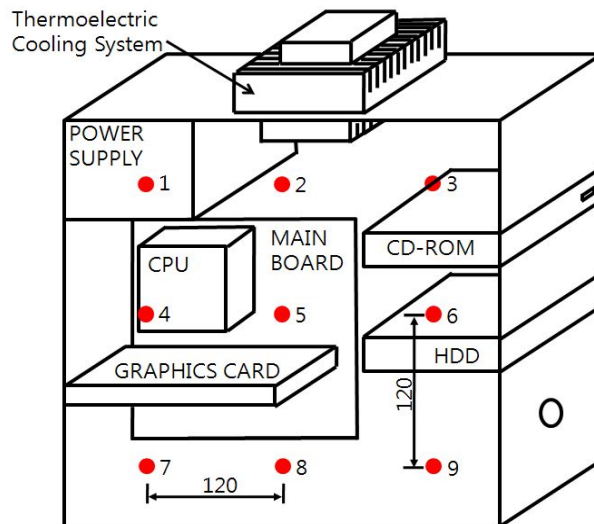


Fig. 19 Schematic diagram of measurement points for temperature measurement inside the computer using thermoelectric cooling system

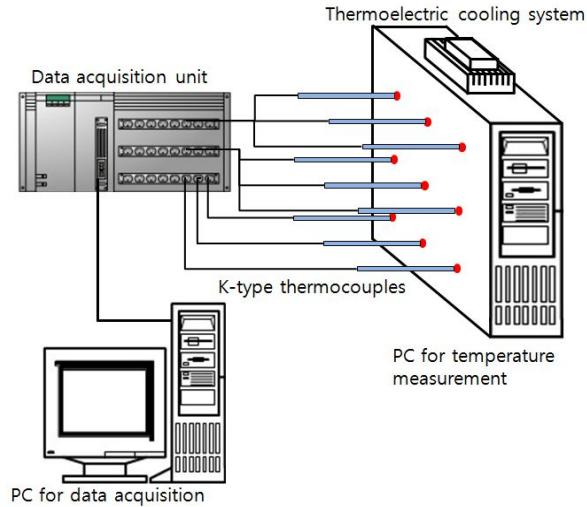


Fig. 20 Schematic diagram of experimental apparatus for temperature measurement inside the computer using thermoelectric cooling system

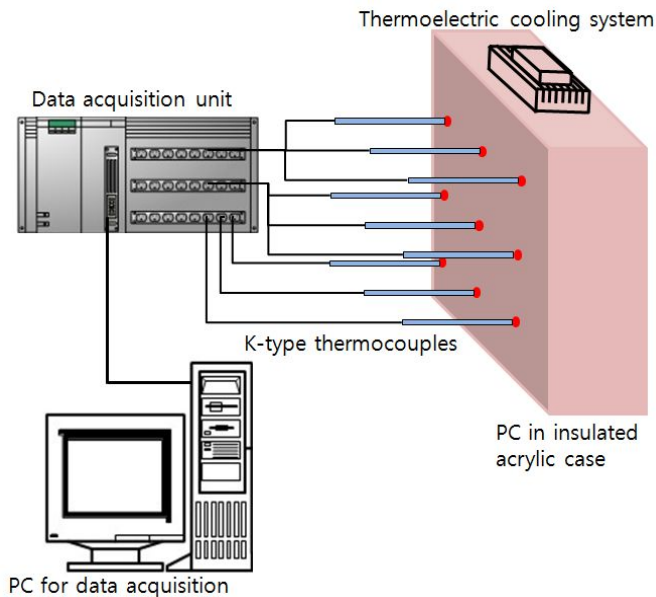


Fig. 21 Schematic diagram of experimental apparatus for temperature measurement inside the acrylic case using thermoelectric cooling system

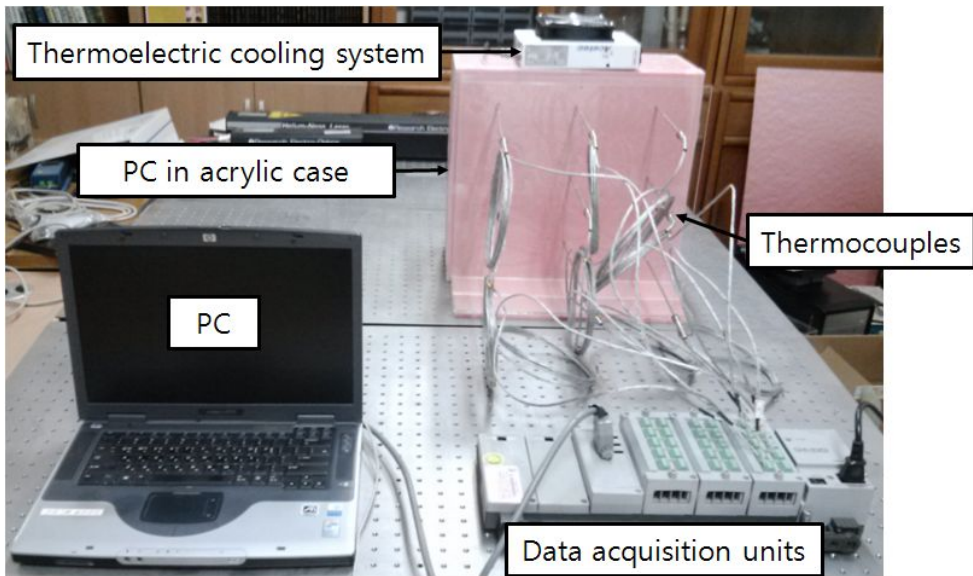


Fig. 22 Photograph of experimental apparatus for temperature measurement inside the acrylic case using thermoelectric cooling system

3.3.2 방열판과 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템

앞의 3.3.1절에서 사용한 냉각면에 방열판을 부착한 냉각시스템에 의해 발생한 차가운 공기를 강제대류 시켜서 컴퓨터 내부로 더욱 원활하게 순환시키기 위해, 냉각면의 방열판에 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템을 이용하여 컴퓨터 내부의 온도 측정 실험을 세 가지 방법으로 수행하였다.

Fig. 23에서 보이는 바와 같이 3.3.1절의 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템을 사용한 온도분포 실험과 정확한 비교를 위해 같은 방법으로 실험장치를 구성하였다. 단, 이 실험에서는 컴퓨터 내부에 전자냉각시스템에서 발생한 차가운 공기를 강제대류를 통해 더욱 원활하게 순환시키기 위해 냉각면의 방열판에 송풍용 팬을 부착하여 실험을 실행하였다.

본 실험은 선행된 실험들과의 정확한 비교를 위해 동일한 장치와 측정 포인트로 구성되었다. 또한, 실험방법 역시 동일한 방법으로 실행되었다. 첫 번째 실험은 방열판과 송풍팬을 부착한 전자냉각장치를 컴퓨터에 직접 장착하여 컴퓨터를 작동시키고 동시에 전자냉각시스템과 송풍용 팬을 작동시킨 후, 1시간 동안 5초 간격으로 온도분포의 변화를 측정하였다. 두 번째로 앞의 실험에서와 같은 컴퓨터와 전자냉각장치를 이용하여 컴퓨터를 1시간 작동시켜 내부의 온도가 일정수준으로 높아지게 한 후, 송풍팬을 부착한 전자냉각장치를 작동시켜 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도변화를 1시간 동안 5초 간격으로 측정하였다.

세 번째로는 전자냉각시스템을 컴퓨터에 직접 장착하지 않고 앞 3.3.1절의 실험에서와 같은 방법으로 아크릴 용기에 컴퓨터를 설치하고, 단열재로 외부공기와 내부공기를 차단시킨 상태에서 송풍팬이 장착된 전자냉각시스템을 이용하여, 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동시켰을 때 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도변화를 1시간 동안 측정하였다.

모든 실험에서 정확한 온도 데이터 획득을 위해 실험실의 온도는 약 24℃로 유지 시켰으며, 동일한 조건하에서 3회에 걸친 반복실험을 수행하여 얻어진 온도 데이터의 평균값을 사용하였다.

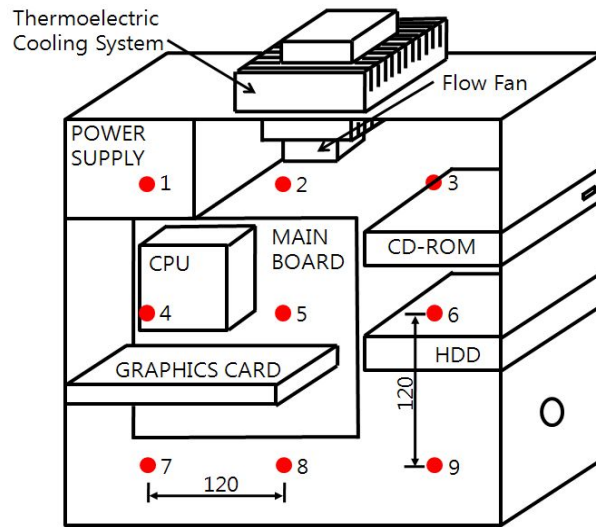


Fig. 23 Schematic diagram of measurement points for temperature measurement inside the computer using thermoelectric cooling system attached flow fan

제 4 장 수치해석 이론 및 방법

4.1 유한요소법에 의한 온도분포 해석

4.1.1 열전도 방정식

대류가 없는 일차원 열전도 현상에 대한 기본 미분 방정식을 통한 에너지 보존의 법칙에 의하여 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다[61].

$$E_{in} + E_{generated} = \Delta U + E_{out} \quad (4.1.1)$$

여기서, $E_{in} = q_x A dt$

$$E_{generated} = Q A dx dt$$

$E_{out} = q_{x+dx} A dt$ 이므로, 다음과 같이 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$q_x A dt + Q A dx dt = \Delta T + q_{x+dx} A dt \quad (4.1.2)$$

E_{in} : 검사체적에 유입되는 에너지 [Joule]

$E_{generated}$: 검사체적에서 발생하는 에너지 [Joule]

E_{out} : 검사체적에서 유출되는 에너지 [Joule]

ΔU : 내부에너지의 변화량 [kW·h]

q_x : x 검사체적 표면에 통해 전도되어 들어오는 열유속 [kW/m²]

q_{x+dx} : $x+dx$ 검사체적 표면을 통해 전도되어 나가는 열유속 [kW/m²]

t : 시간 [h, sec]

Q : 내부적인 열원 [kW/m³]

이때, 열은 물체 내에 온도차가 있으면 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르고, 이를 식으로 Fourier's의 열전도 법칙에 의하여 q_x 를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_x = -k_{xx} \frac{dT}{dx} \quad (4.1.3)$$

k_{xx} : x 방향의 열전도율 [kW/m·°C]

T : 온도 [°C]

$\frac{dT}{dx}$: 온도구배 [°C/m]

위 식 (4.1.3)은 x 방향의 열유속이 x 방향의 온도구배에 비례함을 설명하고 있고, 테일러급수를 사용하여 2차 항까지 표현하면,

$$q_{x+dx} = - \left[k_{xx} \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(k_{xx} \frac{dT}{dx} \right) dx \right] \quad (4.1.4)$$

내부에너지의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta U = c(\rho A dx) dT \quad (4.1.5)$$

여기서, c : 비열 [kW · h/(kg·°C)]

ρ : 질량밀도 [kg/m³]

위의 식 (4.1.3) ~ (4.1.5)를 식 (4.1.2)에 대입하고, $Adxdt$ 로 나누어서 간단히 정리하면 다음과 같은 일차원 열전도 방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1.6)$$

정상상태에서는 시간에 관한 미분은 0이 되어 다음의 식 (4.1.7)과 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dx} \left(k_{xx} \frac{dT}{dx} \right) + Q = 0 \quad (4.1.7)$$

이때 3차원 열전도 현상을 고려하면, 1차원의 경우와 유사하게 정상상태에 대해서 절대 좌표 x , y 와 z 방향에 일치하는 물성치를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (4.1.8)$$

여기서 재료를 등방성 재질로 고려하면 열전도율은 $k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$ (정수)라 할 수 있기에 식 (4.1.8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0 \quad (4.1.9)$$

대기와 접하고 있는 전도체에서 열전달이 발생한다면, 그 대기는 내부 온도와 압력차에 의해 대기 중에서 발생하는 자연대류에 의한 유동이 발생할 것이며, 이때의 대류 열손실에 대한 열전도 기본 미분 방정식을 유도하기 위하여 위 식 (4.1.2)의 에너지 보존 방정식을 이용하여 다음과 같은 식 (4.1.10)를 얻을 수 있다.

$$q_x A dt + Q A dx dt = c(\rho A dx) dT + q_{x+dx} A dt + q_h P dx dt \quad (4.1.10)$$

여기서, P 는 일정 단면의 면적 A 를 둘러싸는 주변 길이이다.

위 식 (4.1.10)의 모든 항들을 대류 열전달에 의한 열유동을 제외하여 정리하면 다음의 식 (4.1.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_h = h (T - T_\infty) \quad (4.1.11)$$

h : 열전달계수 [$\text{kw}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

T : 고체/기체의 접촉면에서의 고체 표면온도

T_∞ : 대기온도 (자유 유동 대기온도)

4.1.2 변수분리법을 이용한 유한요소 정식화

위의 여러 식으로 결정되어지는 온도분포는 물체 안으로 혹은 밖으로 이동하는 열의 양과 물체 내부의 응력들에 영향을 미치고, 그 열응력을 측정하기 위하여 물체 내부의 온도분포를 알아야 한다[62]. 이에 유한요소법은 물체 내부의 온도분포와 열응력을 예측하는데 아주 유용한 방법이다. 각 경계요소마다 주어질 경계조건인 위의 수식들을 변수분리법을 이용하여 3차원 열전달 방정식을 정식화 하여 보면, 위의 식 (4.1.8)과 식 (4.1.11)을 범함수의 최소화에 의해 다음과 같이 유도하였다.

$$\pi_h = U + \Omega_Q + \Omega_q + \Omega_h \quad (4.1.12)$$

$$\text{여기서, } U = \frac{1}{2} \iiint_V \int \left[k_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dV$$

$$\Omega_Q = - \iiint_V \int Q T dV$$

$$\Omega_q = - \int_{S_2} \int q^* T dS$$

$$\Omega_h = \frac{1}{2} \int_{S_3} \int h (T - T_\infty)^2 dS$$

S_2 와 S_3 는 각각 열유속 q^* 와 대류손실 $h(T - T_\infty)$ 가 발생하는 면적들이다. q^* 와 h 는 같은 표면 위에서 동시에 발생하는 것이 아니므로 같은 표면 위에 명시할 수 없다.

Fig. 24는 평판 해석을 위해서 평판을 삼각형 요소로 분할하여 해석을 실시하는데 그 삼각형 요소의 한 부분을 표현한 것이다. 삼각형 요소는 i, j, m 과 같은 절점을 가지는데, 그 형상이 불규칙적이기 때문에 물체의 경계에 가장 가깝게 표현될 수 있다. 각 절점은 2개의 자유도, 즉 x 와 y 방향 변위를 가진다. 여기서 u_i 와 v_i 를 각각 절점 i 에서의 x 와 y 방향 변위 성분으로 한다.

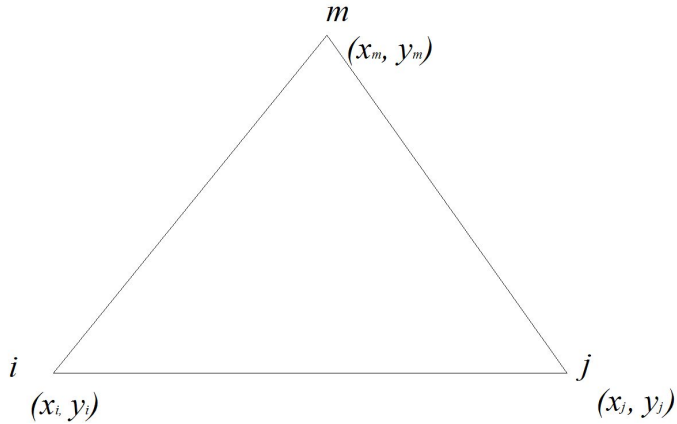


Fig. 24 3-Node two-dimension triangle element

이를 바탕으로 하여 온도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\{T\} = [N_i \ N_j \ N_m] \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_m \end{Bmatrix} \quad (4.1.13)$$

여기서, t_i, t_j, t_m 은 절점온도이고, 형상함수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2A}(\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y) \\ N_j &= \frac{1}{2A}(\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y) \\ N_m &= \frac{1}{2A}(\alpha_m + \beta_m x + \gamma_m y) \end{aligned} \quad (4.1.14)$$

여기서, α, β, γ 는 $\alpha_i = x_j y_m - y_j x_m$, $\alpha_j = y_i x_m - x_i y_m$, $\alpha_m = x_i y_j - y_i x_j$

$$\beta_i = y_i - y_m, \quad \beta_j = y_m - y_i, \quad \beta_m = y_i - y_j$$

$$\gamma_i = x_m - x_j, \quad \gamma_j = x_i - x_m, \quad \gamma_m = x_j - x_i$$

온도의 변화에 의한 온도기울기 행렬 $\{g\}$ 는

$$\{g\} = [B]\{t\} \quad (4.1.15)$$

여기서, 행렬 $[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix}$ 이다.

이에 열유속-온도기울기 관계는

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -[D]\{g\} \quad (4.1.16)$$

여기서, 물성행렬 $[D] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 \\ 0 & k_{yy} \end{bmatrix}$ 이다.

열전달 현상을 위한 요소 전도행렬을 바탕으로 요소강성행렬을 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV + \int_{S_3} h [N]^T [N] dS \quad (4.1.17)$$

요소 안에서 두께가 일정하다면 식 (4.1.17)의 모든 적분항이 상수가 되어 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[k_c] \iiint_V [B]^T [D] [B] dV = tA [B]^T [D] [B] \quad (4.1.18)$$

$$[k_h] = \int_{S_3} h [N]^T [N] dS \quad (4.1.19)$$

식 (4.1.18)은 전체좌표계에 대한 강성행렬 식 (4.1.17)에서 순수하게 전도에 의한 부분이고, 식 (4.1.19)는 대류에 의한 부분으로 대류가 있는 삼각 요소의 절점 i 와 j 사이의 면을 고려하여 요소의 세 부분에서 물체에 의해 발생하는 열이 절점에서 생성된 것으로 나타내며 다음과 같이 식 (4.1.20)로 정리할 수 있다.

$$\{f_q\} = \int_{S_2} \int q^* [N]^T dS = \int_{S_2} \int q^* \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_m \end{Bmatrix} dS \quad (4.1.20)$$

위 식으로부터

$$\frac{q^* L_{i-j} t}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{on side } i-j$$

$$\frac{q^* L_{j-m} t}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \text{on side } j-m$$

$$\frac{q^* L_{m-i} t}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \text{on side } m-i$$

여기서, L_{i-j} , L_{j-m} , L_{m-i} 는 요소의 측면의 길이이고, q^* 는 각각의 면에서 일정하다고 가정하고 hT_∞ 로 대치하면 식 (4.1.20)과 유사하게 계산이 가능하다.

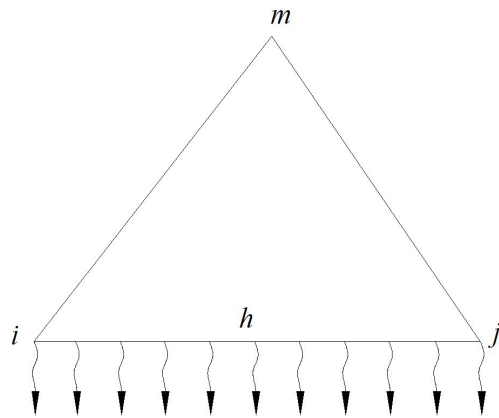


Fig. 25 Loss on convection in surface of $i-j$

전체좌표계에 대한 방정식을 얻기 위한 요소 방정식들의 조합과 경계조건을 위하여 두 요소사이의 공통 절점의 온도가 같다는 필요조건을 기초로 두고 있다. 절점온도 경계조건을 만족시키는 전체좌표계에 대한 절점온도를 계산하고, 식 (4.1.15)로부터 요소 내의 온도기울기, 식 (4.1.3)로부터 열유속을 계산한다.

4.2 수치해석 방법

기존의 컴퓨터에 사용하던 공기 냉각식 시스템을 완전히 제거한 후, 본 연구에서 제작한 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 사용하였을 경우에 컴퓨터 내부의 발열 제어 효과를 확인하기 위하여, 전자냉각시스템을 사용한 경우의 컴퓨터 내부 온도분포를 수치해석을 통해 계산해 보았다.

수치해석을 위해 본 연구에서 사용된 상용프로그램은 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 적용한 "ANSYS Workbench V13.0"으로, 실제 구조물은 무한개의 원자와 분자로 구성되어 있으나 이것을 유한개의 절점(node)과 요소(element)로 구성되었다고 가정한 후, 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식으로 나타내어 전체 구조물을 대신하고, 이를 수학적으로 계산하여 외력에 의한 각 절점의 변위를 구함으로써 변위, 변형률, 응력, 열, 유동, 진동 등의 결과값을 수치적인 근사해법으로 구할 수 있는 프로그램이다.

본 연구에서는 컴퓨터 내부에서 발생하는 열의 유동에 따른 온도분포를 해석하기 위하여 "ANSYS Workbench"의 "Fluent System"을 사용하였다. 또한, 수치해석에 사용되는 컴퓨터의 3D Modeling은 상세 파트와 어셈블리, 생산 차원의 도면을 작성할 수 있는 상용프로그램인 "SolidWorks 2012"를 사용하였다.

수치해석을 위해 "SolidWorks"를 사용하여 컴퓨터 내부의 발열의 원인이 되는 주요 파트를 3D로 Modeling 하였고, 그 형상은 Fig. 26에 나타내었다. Fig. 27에서 보이는 바와 같이 제작된 Model은 "ANAYS Workbench"를 통해 격자(Mesh)를 생성하여 84963개의 절점(node)와 13197개의 요소(element)로 구성된 유한요소 Modeling을 실행하였다. CPU와 GPU의 재질은 "니켈", 컴퓨터 본체, HDD, Power Supply, 전자냉각시스템의 재질은 "알루미늄"으로 설정하였고, 각 부품의 온도는 실험을 통해 얻어진 값을 입력하였다. CPU는 41.3℃, GPU는 39℃, HDD는 35℃, Power Supply는 34℃로 설정하였고, 대기온도는 실험에서와 동일하게 24℃로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 실험에서 사용한 전자냉각시스템은 기존의 냉각시스템을 완전히 대체하기에는 냉각성능이 부족하다고 판단하여 열전소자의 냉각면에 장착된 방열판의 온도를 15℃로 낮게 설정하여 수치해석을 수행하였다.

먼저 컴퓨터 내부의 온도분포 측정 실험에서와 같은 조건으로 수치해석을 통해 컴퓨터 내부의 온도분포를 계산하였고, 얻어진 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하여 수치해석 결과의 정확성을 확인하고자 하였다.

또한, 전자냉각시스템의 발열제어 성능을 알아보기 위해 첫 번째로 기존의 냉각 시스템을 사용하지 않고 컴퓨터를 작동시켰을 경우에 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포를 수치해석 통해 예측하였고, 다음으로는 컴퓨터에 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 작동시켰을 경우에 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포를 수치해석을 통해 계산하여, 열전소자를 이용한 전자냉각시스템의 발열제어 성능에 대하여 예측하였다.

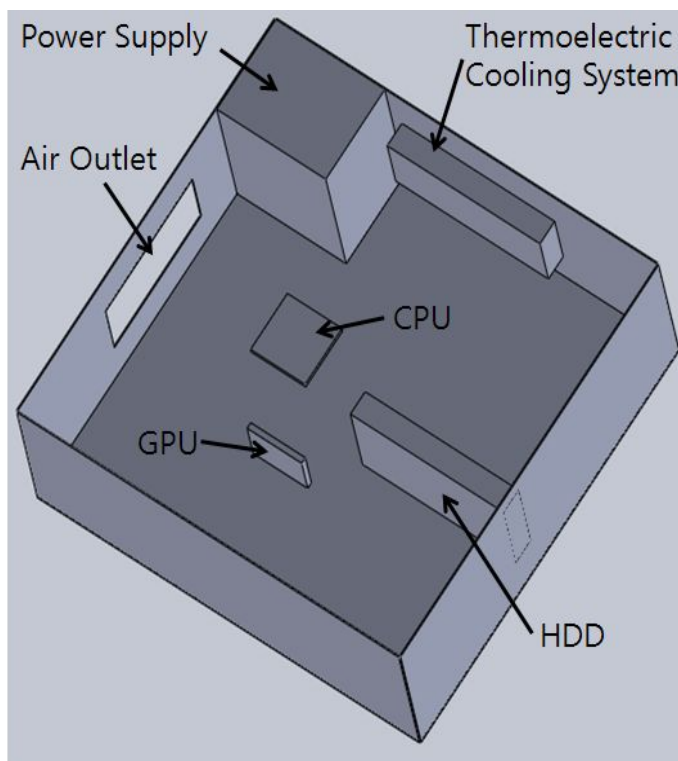


Fig. 26 3-Dimensional analysis model of computer

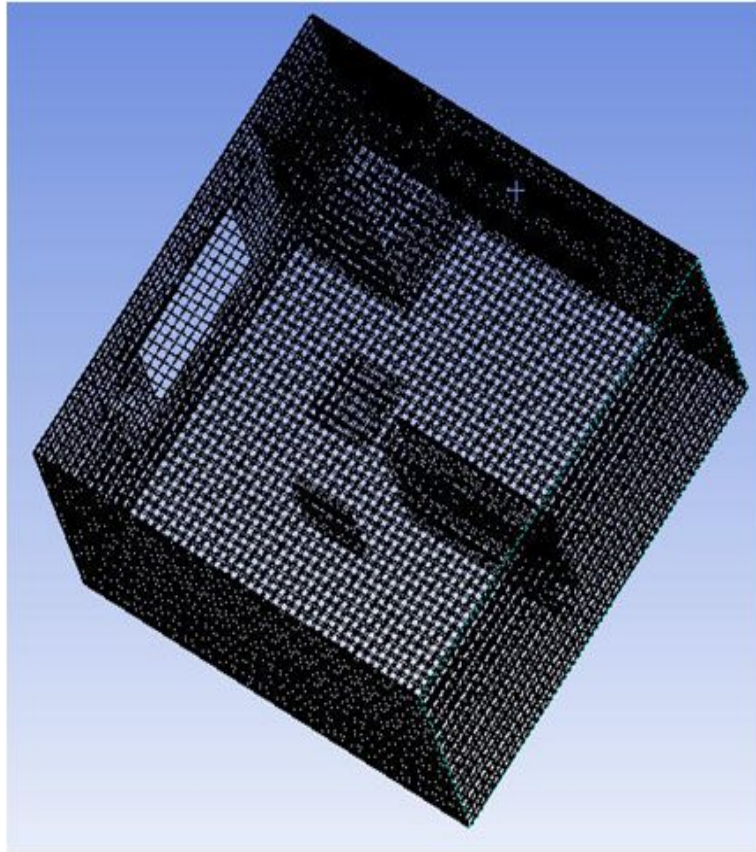


Fig. 27 Finite element model of computer

제 5 장 실험 결과 및 고찰

5.1 컴퓨터 내부의 온도분포 측정 실험 결과

컴퓨터 냉각시스템 중에서 일반적으로 가장 많이 사용되는 냉각팬과 방열판을 사용하는 공기 냉각 시스템을 이용한 컴퓨터를 작동시켰을 경우, 어느 컴퓨터 내부에서 어느 정도의 열이 발생되는지를 온도 분포 측정실험을 통하여 조사하였다.

컴퓨터 내부의 온도분포를 측정하기 전, 컴퓨터 내부에 설치된 주요 부품의 온도를 1시간 동안 작동시킨 후 측정한 결과 CPU는 약 41.3℃, GPU는 약 39℃, HDD는 약 35℃, Power supply는 약 34℃의 온도분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 실험실의 온도는 약 24℃로 설정하였다.

Figs. 28 ~ 30은 컴퓨터를 작동하였을 경우 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포의 변화를 1시간동안 5초 간격으로 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 보여주고 있다. CPU, GPU, HDD, Power supply 등이 작동하면서 발생하는 열에 의해 컴퓨터 내부의 온도는 시간의 경과에 따라 점점 상승하였으나, 장치들의 냉각을 위해 장착된 방열판과 냉각팬의 영향으로 일정시간이 경과한 후로는 거의 온도의 상승이 일어나지 않고 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

실험을 시작하기 전 컴퓨터 주변의 온도는 약 24℃로 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 28에서는 측정 포인트 3번에서 최종온도가 32.4℃로 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, Fig. 29에서는 측정 포인트 6번에서 최종온도가 32.5℃로 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 6, 3번 포인트는 컴퓨터 내부에서 발열을 하는 HDD가 가까이 위치하고 있고, 또한 컴퓨터의 방열을 위한 송풍구가 컴퓨터 뒷면에 위치하기 때문에 컴퓨터의 앞부분에 위치한 6, 3번 포인트는 송풍구에서 가장 멀리 위치하여 외부 공기와 순환이 원활하게 이루어 지지 못하였기 때문

에 다른 측정 포인트 보다 높은 온도분포를 나타내는 것으로 확인되었다. 다음으로 온도 분포가 높게 나타난 측정 포인트는 1, 2, 4, 5번으로 최종온도는 약 30.7℃ ~ 31.9℃의 온도분포를 나타내고 있었다. 1, 2, 4, 5번 측정 포인트에서는 열을 많이 발생하는 부품인 CPU, GPU, Power supply가 가까이 위치하였기 때문에 송풍구가 가까이 있음에도 불구하고 상대적으로 온도분포가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 30에서는 특별히 지속적으로 열을 발생하는 장치가 가까이 위치하지 않은 7, 8, 9번 측정 포인트의 온도분포가 약 28.8℃ ~ 29.8℃로 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 실험을 통해서, 제한된 공간인 컴퓨터 내부에서도 온도분포 측정 포인트에 따라 온도분포가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이 온도분포의 차이는 시간이 경과하여도 크게 줄어들지 않고 계속 유지되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 온도분포가 가장 낮게 나타난 8번 포인트와 가장 높게 나타난 6번 포인트에서의 온도는 약 3.7℃ 정도의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 모든 측정 포인트에서 평균온도는 약 30.9℃로 측정되었다.

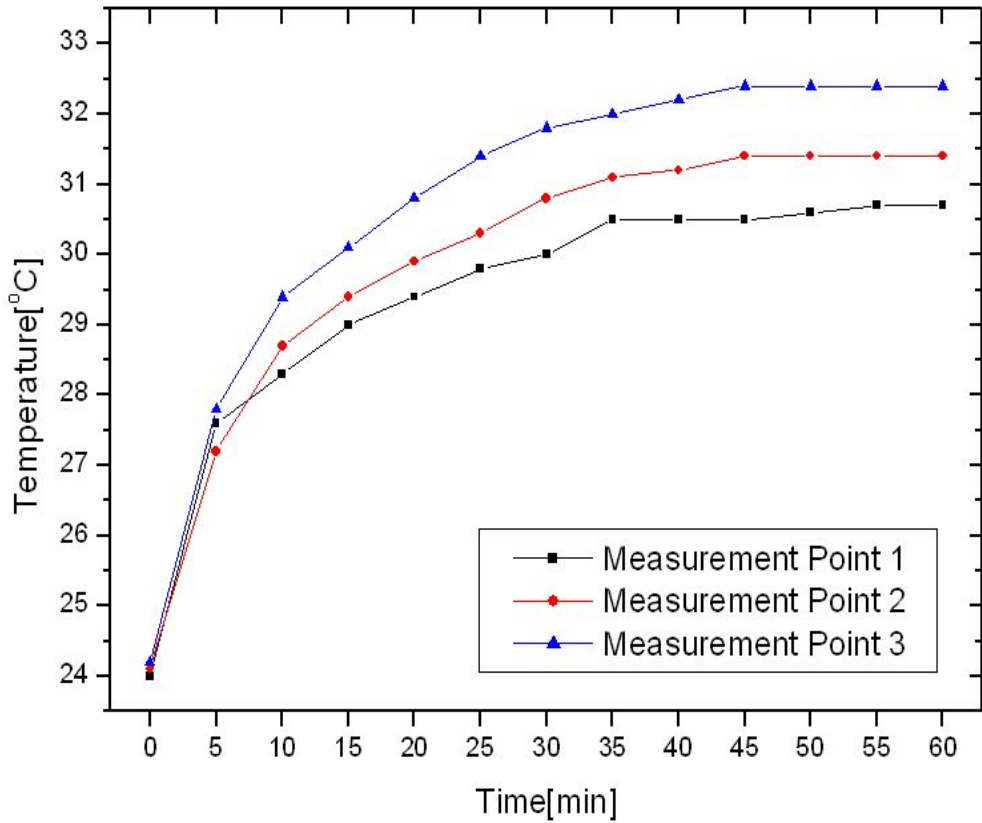


Fig. 28 Temperature distribution results in the PC
at measurement point 1, 2 and 3

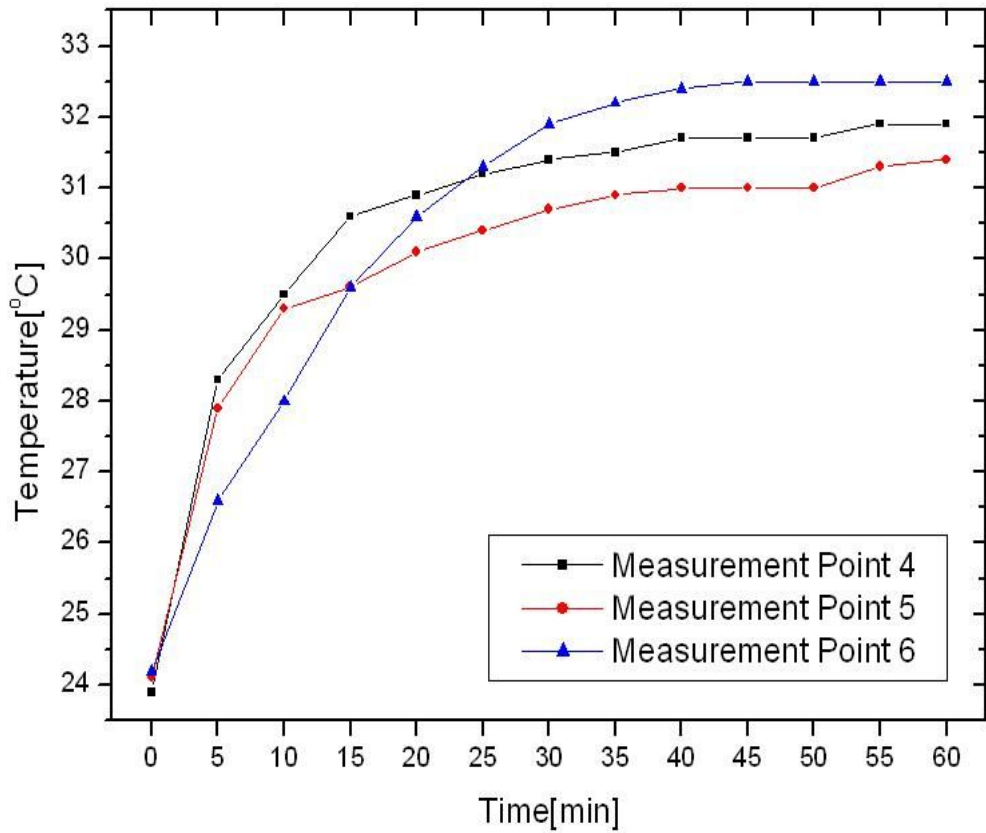


Fig. 29 Temperature distribution results in the PC
at measurement point 4, 5 and 6

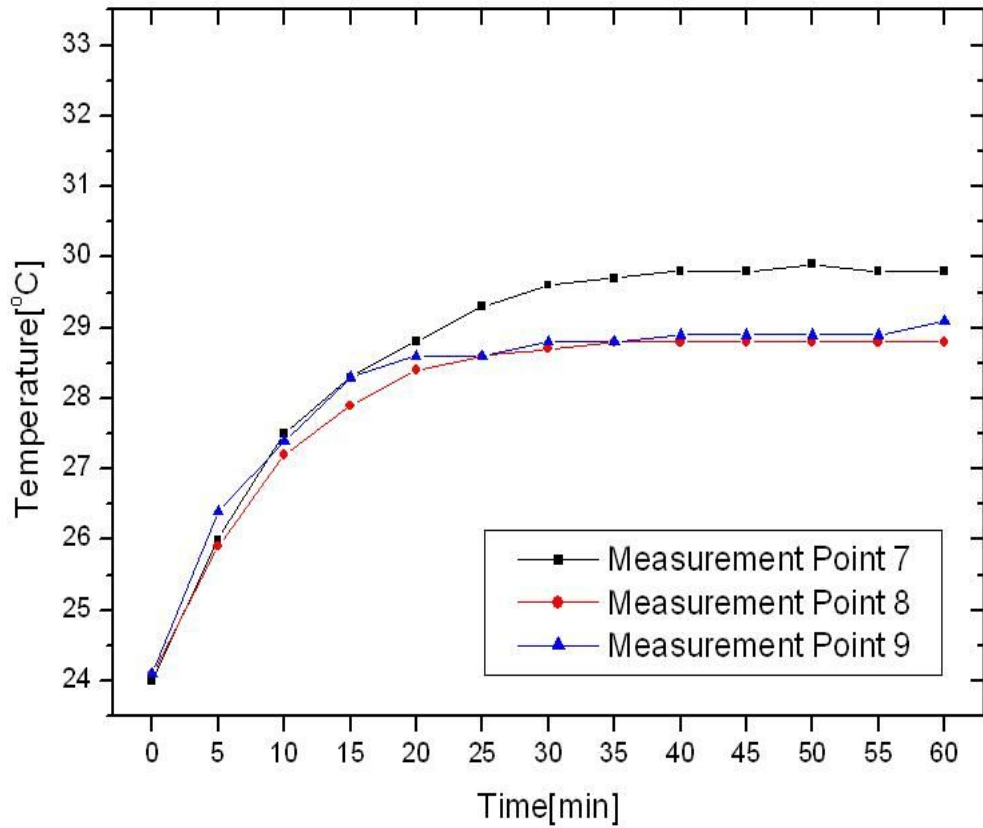
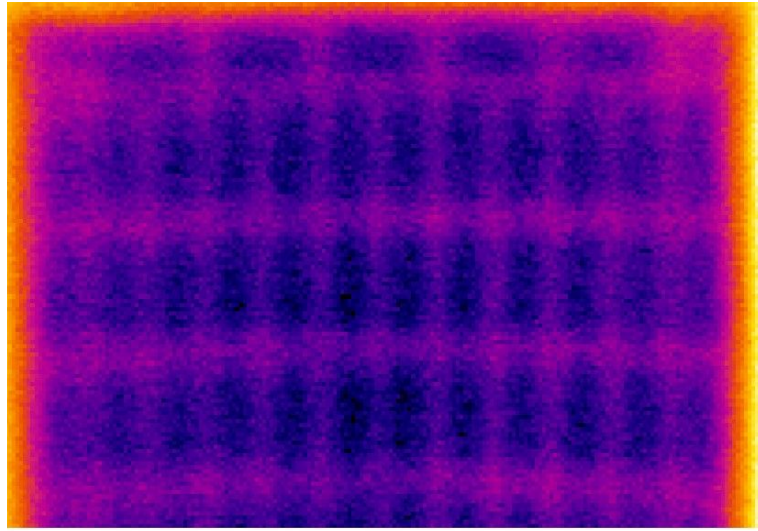


Fig. 30 Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9

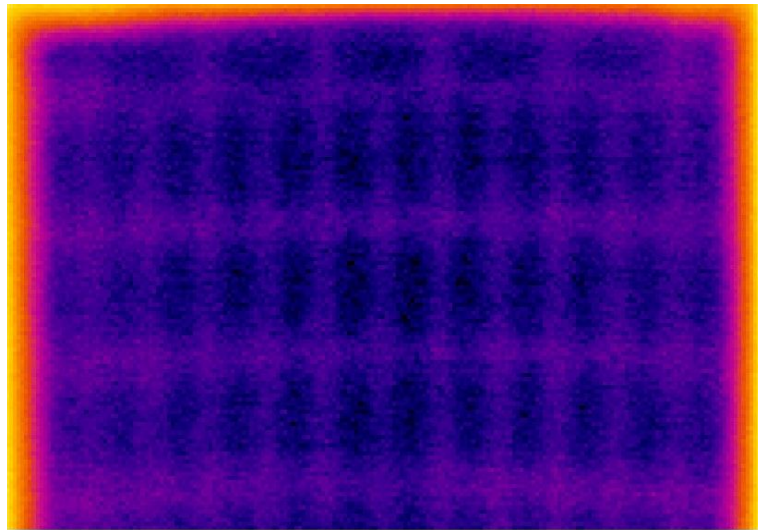
5.2 적외선 열화상 측정 실험 결과

전자냉각시스템을 이용한 온도분포 측정 실험을 실행하기 전에 열전소자의 표면 온도 변화를 확인하기 위하여 적외선 열화상 카메라를 이용하여 촬영하였다. Fig. 31은 열전소자를 작동시켰을 경우, 열전소자 냉각면의 표면온도를 적외선 열화상 카메라를 이용하여 촬영한 결과를 보여주고 있다. 열전소자를 작동시킨 후 시간이 경과함에 따라 열전소자 중앙부의 파란색 영역이 측면부보다 짙게 형성되었으며 측면부에서는 다소 연하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 열전소자에 전압을 공급하였을 경우 열전소자를 구성하고 있는 P-N형 반도체에서 발생하는 냉기가 열전소자 표면의 세라믹에 전도되면서 냉각면의 온도가 낮아지게 된다. 특히 P-N형 반도체가 열전소자의 중앙부에 집중되어 있기 때문에 냉각면의 중앙부에서 온도가 측면부의 온도에 비해 낮게 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 열전소자의 가장자리 부분에 형성된 붉은색 영역은 열전소자 발열면에서 발생한 열이 냉각면으로 전도되는 것을 보여주고 있다. 따라서, 발열면에서 발생한 열을 외부로 원활하게 방열하지 못하면 그 열이 냉각면에 영향을 주어 결과적으로 냉각면의 온도 상승을 유발한다. 열전소자 냉각면의 흡열량(Q_c)은 식(2.3.5)에서 나타낸 바와 같이 열전소자에 공급하는 전압과 열전소자 발열면과 냉각면의 온도차에 영향을 받으며, 열전소자의 발열과 흡열은 열전소자에 공급되는 전압에 비례하여 증가하고 열전소자 발열면과 냉각면의 온도차가 감소할수록 열전소자의 냉각 성능이 향상되게 된다. 따라서 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 제작할 경우 충분한 냉각성능을 얻고자 한다면 열전소자 발열면에서 발생하는 열을 원활하게 방열하는 것이 매우 중요하며 발열면의 방열 성능에 따라 냉각면의 냉각성능 또한 향상된다는 것을 알 수 있다.



(a) after 5 seconds



(b) after 60 seconds

Fig. 31 IR image on cold surface of thermoelectric module
by infrared thermal camera

5.3 전자냉각시스템을 온도 측정 실험 결과

5.3.1 방열판을 장착한 전자냉각시스템 온도 측정 결과

Figs. 32 ~ 34는 전자냉각시스템을 직접 컴퓨터에 장착하여, 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동하였을 경우에 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포를 1시간 동안 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 나타내고 있다.

온도 분포 측정 실험 결과 전자냉각시스템을 장착한 컴퓨터의 온도분포는 전자냉각시스템을 사용하지 않은 컴퓨터의 온도분포와 약간의 차이를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 32에서 1, 3번 측정 포인트에서 온도분포는 약 27.6℃와 약 27.7℃로 나타났고, 전자냉각시스템을 장착하지 않은 컴퓨터의 온도분포와 비교하였을 때 약 3.1℃와 약 4.7℃ 더 낮은 온도분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 2번 측정 포인트에서는 26.1℃로 가장 낮은 온도를 나타냈다. 또한, 2번 포인트가 전자냉각시스템의 냉각면과 가까이 위치하였기 때문에 이 지점에서 큰 온도차가 약 5.3℃로 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 33에서 4, 5, 6번 측정 포인트에서 약 28.9℃ ~ 30.4℃로 가장 높은 온도분포를 나타내고 있었다. 4, 5번 측정 포인트에서는 가장 열을 많이 발생하는 CPU, GPU가 가까이 위치하여 있기 때문에 온도가 높게 나타났고, 6번 측정 포인트에서는 HDD에서의 발열과 송풍구에서 위치가 멀기 때문에 온도가 다른 지점에 비해서 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 4, 5, 6번 측정 포인트 모두에서 온도가 냉각장치를 사용하지 않았을 경우에 비해 최소 1.5℃에서 최대 2.6℃ 더 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 34에서 7, 8, 9번 측정 포인트는 전자냉각시스템을 장착하지 않은 경우와 마찬가지로 가장 낮은 온도분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었고, 이 포인트에서 온도는 약 26.5℃ ~ 27.4℃로 나타났다. 모든 측정 포인트에서 온도분포를 비교한 결과 각 측정 포인트에 따라 온도변화의 차이는 있었지만 모든 측정 포인트에서 평균온도는 약 28℃로 전자냉각시스템을 사용하지 않은 컴퓨터의 내부온도에 비해 약 2.8℃ 정도 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

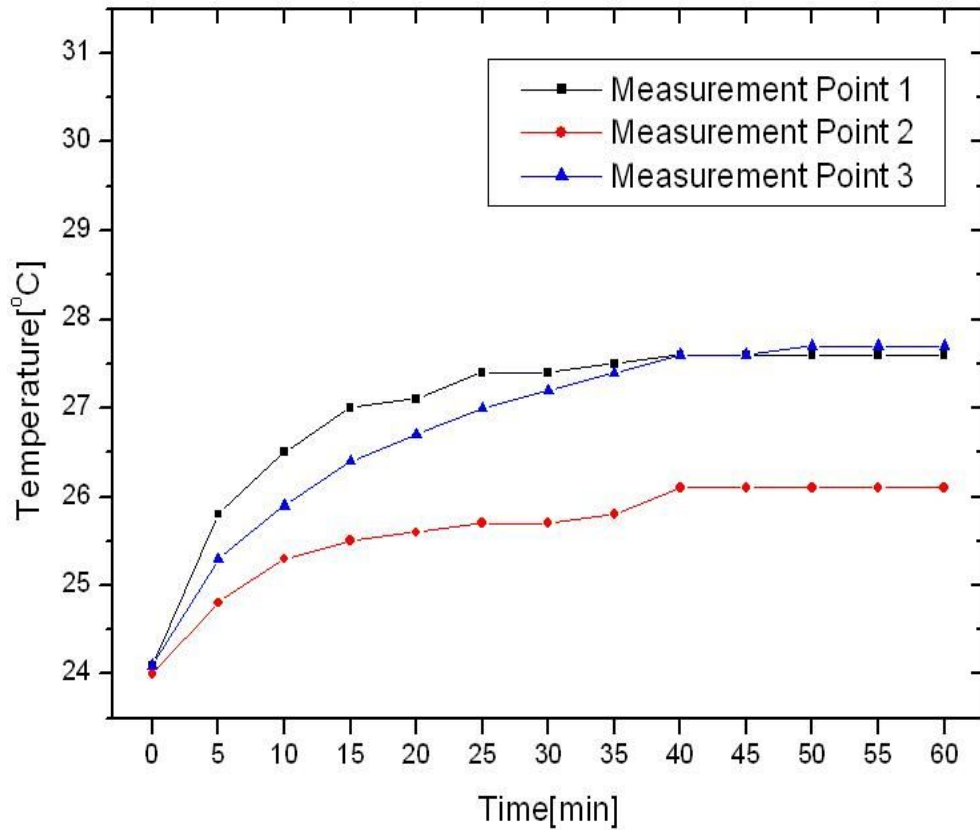


Fig. 32 Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached heat sink

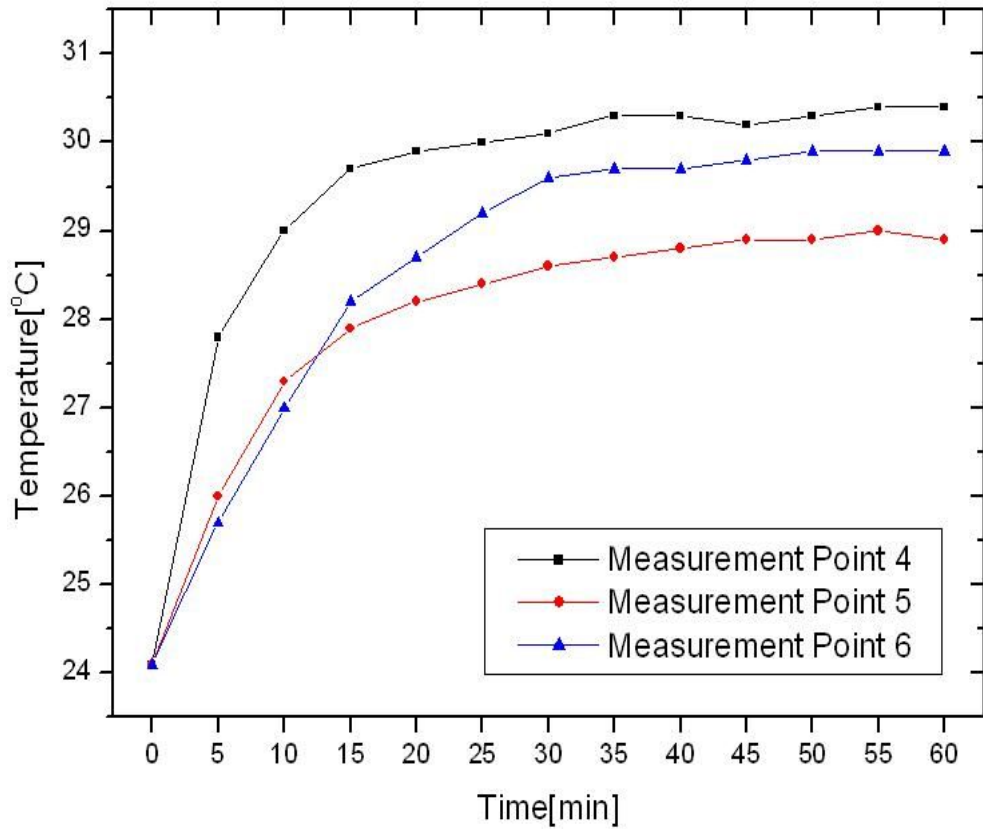


Fig. 33 Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached heat sink

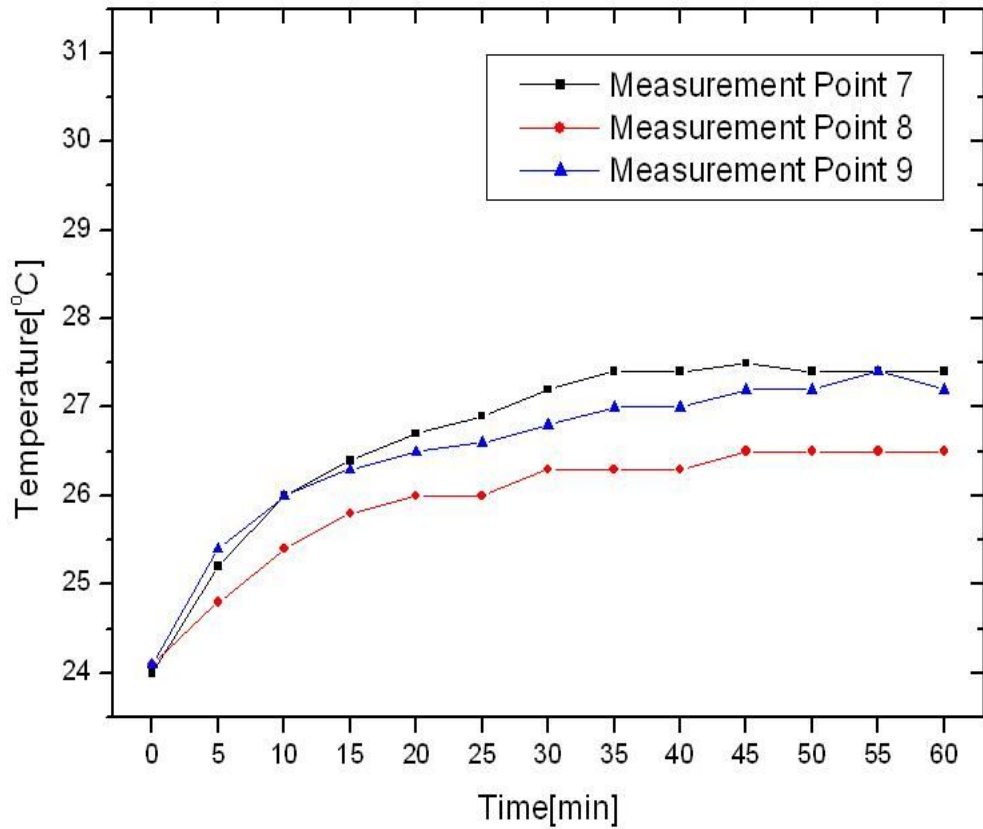


Fig. 34 Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached heat sink

Figs. 35 ~ 37은 전자냉각시스템을 직접 컴퓨터에 장착하여, 컴퓨터를 먼저 1시간 동안 작동시켜 컴퓨터의 내부온도를 일정하게 유지한 후, 방열판을 부착한 전자냉각시스템을 작동시켜 온도분포를 1시간 동안 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 나타내고 있다. 컴퓨터를 1시간 동안 작동시켜 내부의 온도가 상승된 상태에서 일정하게 유지시킨 후, 전자냉각시스템을 작동하면서 온도분포 측정 실험을 시작하였기 때문에 공기 냉각시스템만 사용하여 1시간 동안 컴퓨터를 작동시킨 후의 각 측정 포인트의 온도분포가 시작온도가 되었다. 따라서, 각 측정 포인트에서 발생한 열량이 다르기 때문에 시작온도 역시 각 측정 포인트에서 다르게 나타났다.

온도 분포 측정 실험 결과 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동하였을 경우와 매우 유사한 패턴의 최종 온도분포를 보이고 있다. Fig. 35에서 1, 3번 측정 포인트에서 다음으로 높은 온도분포를 보이고 있으며, 온도분포는 약 27.8°C 로 측정되었으며, 전자냉각시스템과 가장 가까이 위치한 2번 측정 포인트에서의 온도분포는 약 26.5°C 로 가장 낮게 측정되었다. Fig. 36에서 앞선 실험과 유사하게 4, 5, 6번 측정 포인트에서 가장 높은 온도분포를 보이고 있으며, 온도분포는 약 29.0°C ~ 30.4°C 로 측정되었다. Fig. 37에서 7, 8, 9번 측정 포인트는 열을 발생하는 부품이 가까이 위치하지 않기 때문에 온도분포가 26.6°C ~ 27.3°C 로 상대적으로 낮게 나타났다. 모든 측정 포인트에서 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동시켰을 경우와 온도차를 비교한 결과 온도차가 가장 많이 발생한 6번 포인트에서 최대 0.5°C 정도 온도가 더 높게 나타났다. 또한, 평균온도는 약 28.1°C 로 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동시킨 경우와 약 0.1°C 정도의 차이를 나타냈다. 발열을 제어하는 성능에서는 큰 차이가 없었지만, 컴퓨터 내부의 온도가 높아진 상태에서 전자냉각시스템을 작동시켰기 때문에 컴퓨터 내부와 전자냉각시스템의 냉각면의 온도차 증가하여 냉각면에 장착된 방열판에 이슬이 맺히는 것을 확인할 수 있었다.

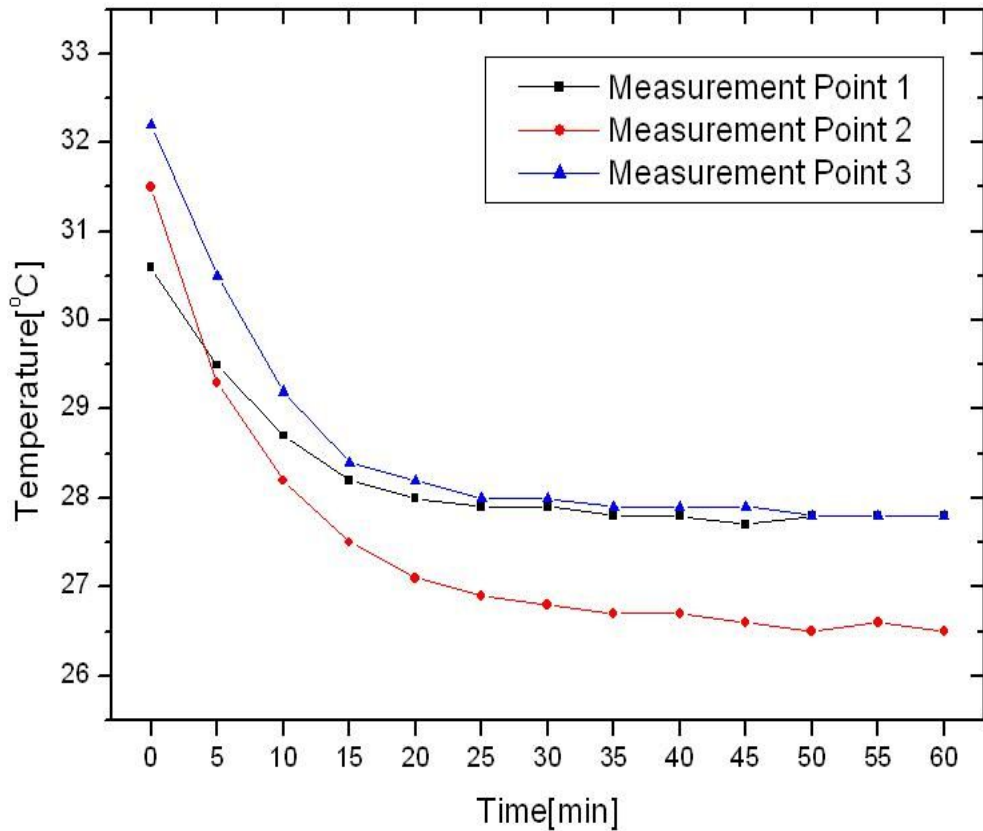


Fig. 35 Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached heat sink after 1 hour

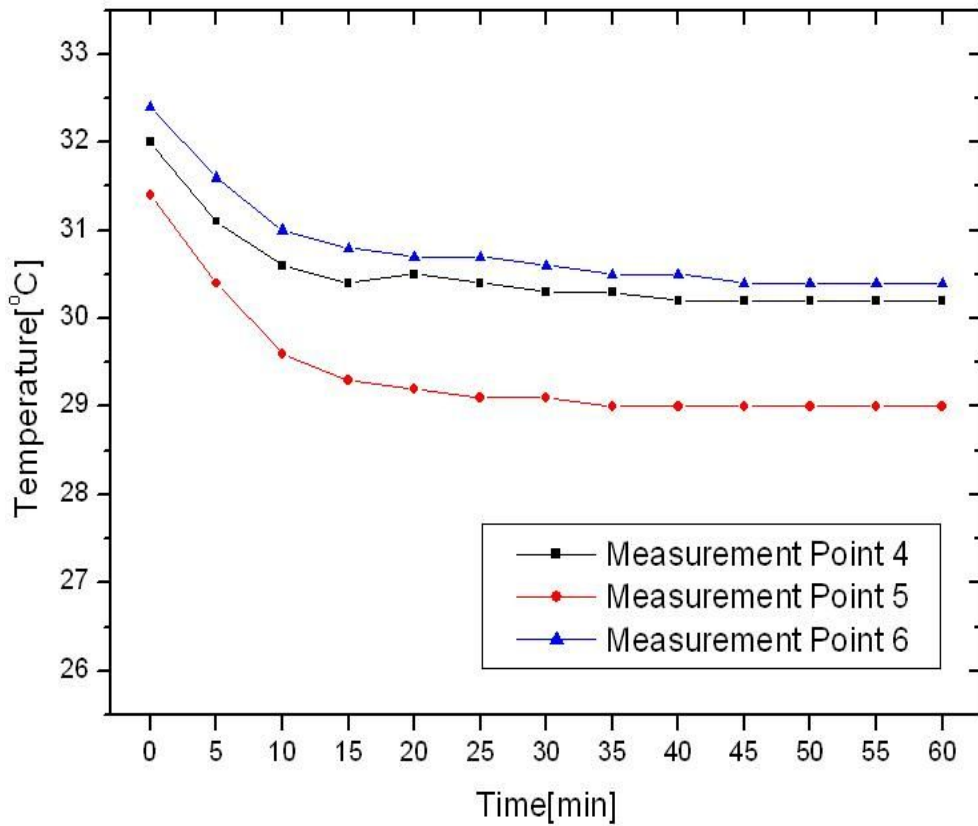


Fig. 36 Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached heat sink after 1 hour

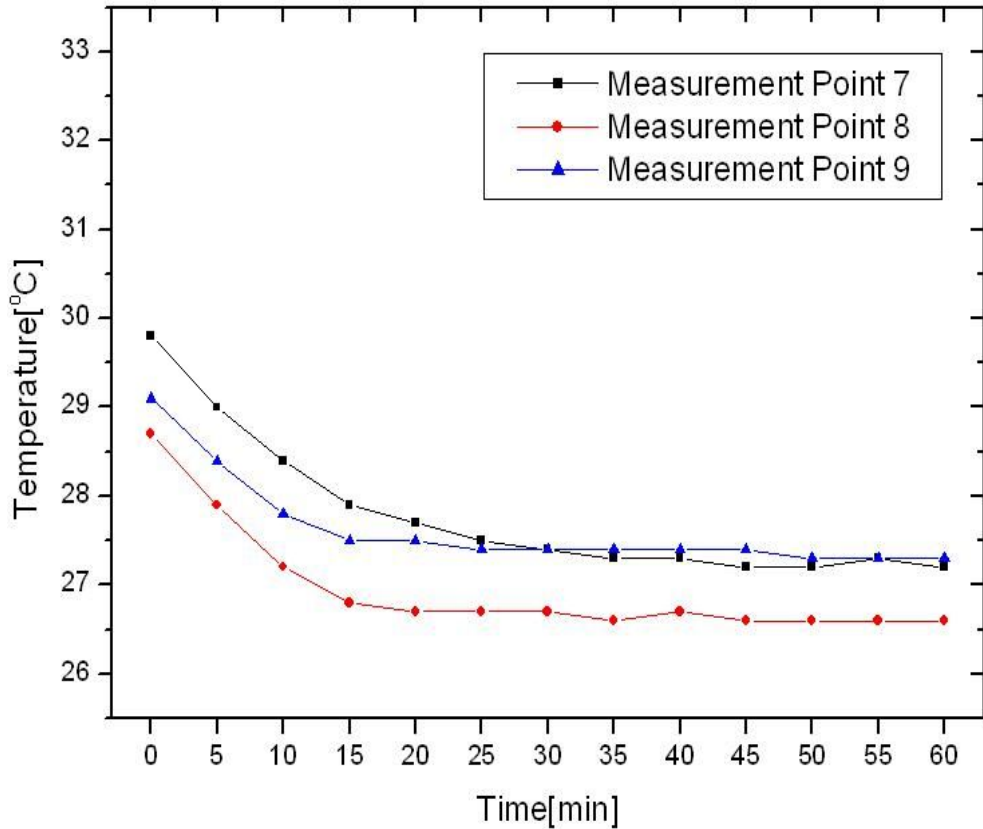


Fig. 37 Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached heat sink after 1 hour

Figs. 38 ~ 40은 단열된 아크릴 용기 내부에 설치된 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동하였을 경우에 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포를 1시간 동안 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 나타내고 있다.

실험 결과는 기존의 컴퓨터에서 사용하던 송풍구를 막았기 때문에 앞선 실험에서와 전혀 다른 패턴의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 38에서 Power supply가 위치한 1번 측정 포인트에서 약 37.3℃로 가장 높은 온도분포를 보였고, 3번 측정 포인트에서는 약 34.1℃로 다음으로 높은 온도를 보였다. 전자냉각시스템이 가장 가까이 위치한 2번 측정 포인트에서는 약 32.0℃로 다른 측정 포인트에 비해 상대적으로 낮은 온도분포를 보이고 있었다. Fig. 39에서 먼저 가장 열을 많이 발생하는 CPU, GPU가 위치한 4, 5번 측정 포인트에서 약 38.9℃, 약 35.3℃로 가장 높은 온도분포를 보인다. 다음으로는 6번 측정 포인트에서 약 33.1℃의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 40에서는 앞선 실험들과 마찬가지로 7, 8, 9번 측정 포인트는 열을 발생하는 장치들이 가까이 위치하지 않았기 때문에 약 29.4℃ ~ 32.9℃로 낮은 온도분포를 보이고 있었다. 모든 측정지점에서 단열을 시키지 않고 컴퓨터 내부의 온도를 측정한 경우에 비해 온도가 상승한 것을 확인 할 수 있었다. 각 측정 포인트에 따라 온도 상승의 폭은 다르게 나타났다. 송풍구에 가장 가깝게 위치한 1번과 4번 측정 포인트에서 약 6.6℃와 약 7.0℃가 상승하여 가장 높은 온도상승을 보였고, 전자냉각시스템과 가까이 위치한 2번과 발열체로부터 가장 멀리 위치한 9번 측정 포인트에서 약 0.6℃와 약 0.3℃가 상승하여 온도상승이 가장 낮다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 단열을 시켰기 때문에 컴퓨터 내부의 평균온도는 약 33.9℃로 단열을 시키지 않은 경우에 비해 약 3℃ 정도 높게 나타났고, 컴퓨터 내부의 온도와 전자냉각시스템의 냉각면의 온도차가 더욱 커지면서 냉각면에 장착된 방열판에 많은 양의 이슬이 맺히게 되었다.

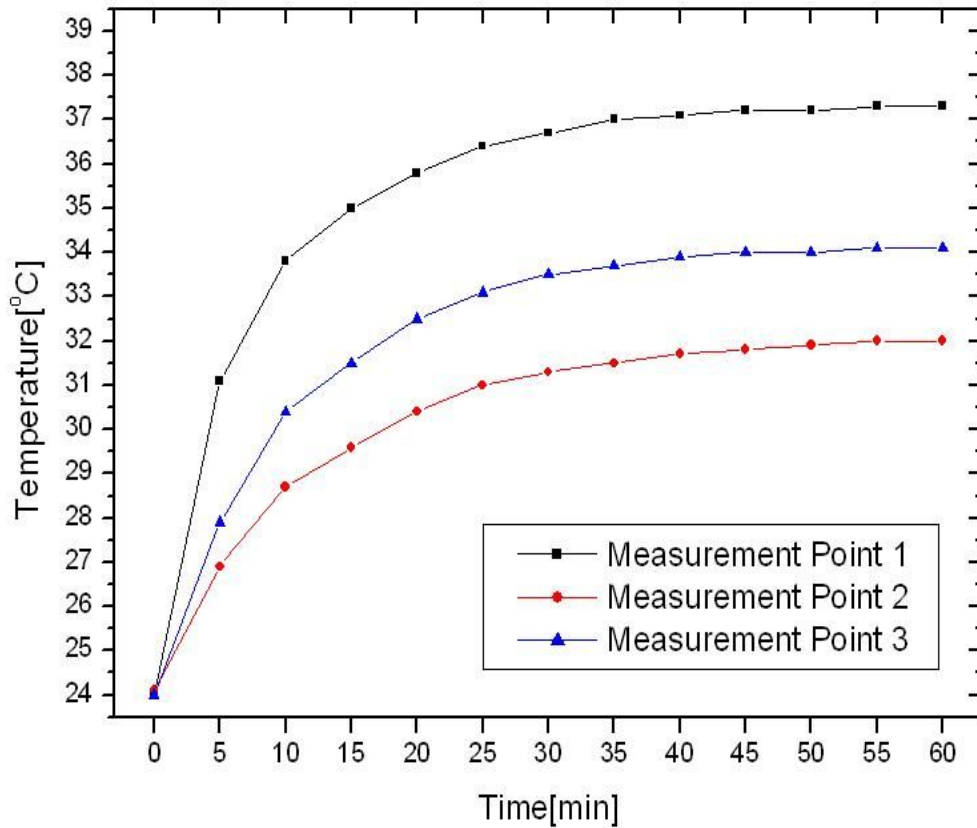


Fig. 38 Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached heat sink

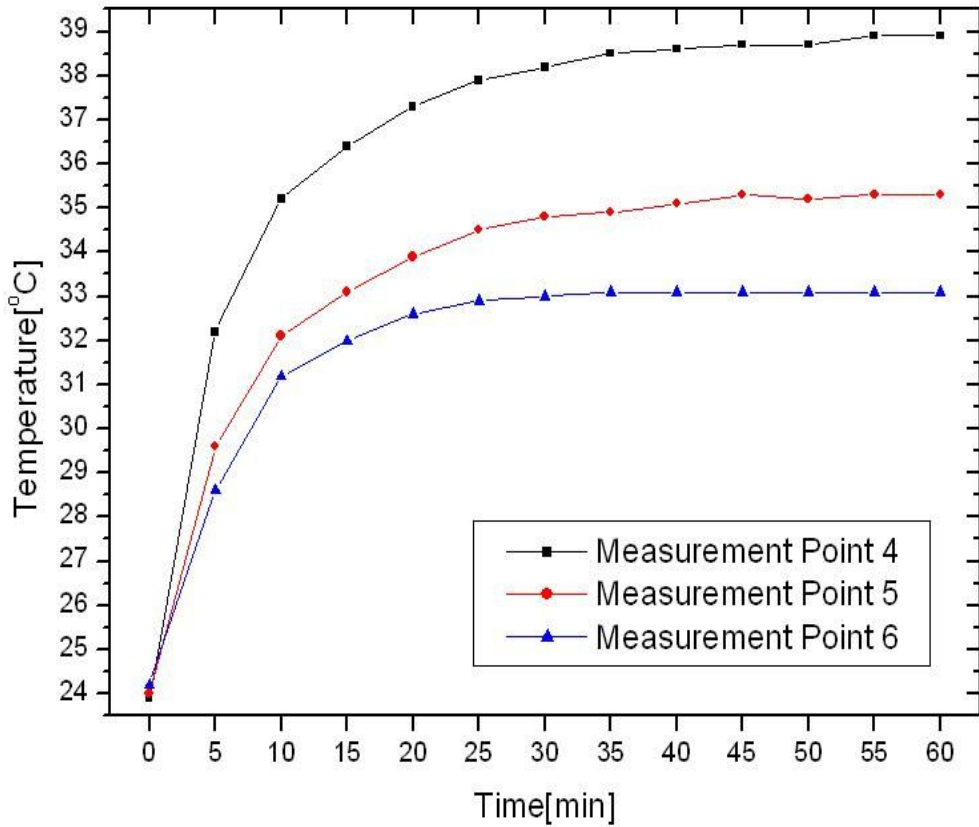


Fig. 39 Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached heat sink

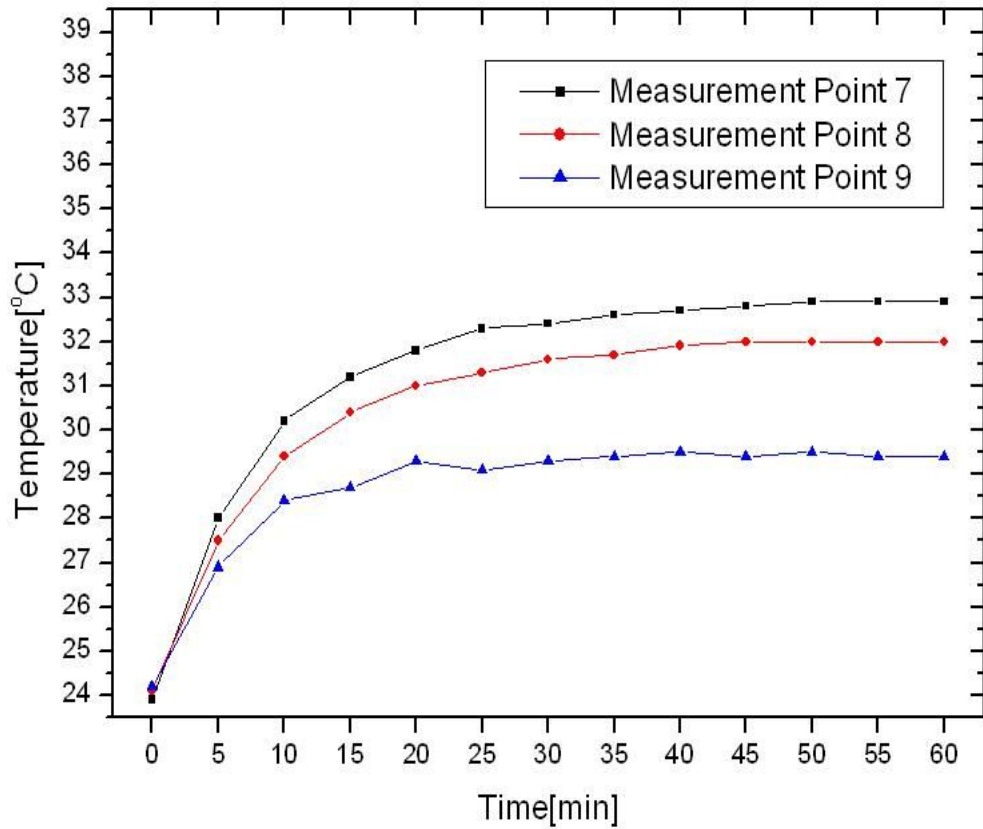


Fig. 40 Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached heat sink

5.3.2 송풍팬을 장착한 전자냉각시스템 온도 측정 결과

앞선 4.3.1절의 실험에서 사용하였던 열전소자 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템에 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템을 이용하여 컴퓨터 내부의 온도분포를 측정하였다.

Figs. 41 ~ 43은 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템을 컴퓨터에 직접 설치하고, 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동하였을 경우에 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포를 1시간 동안 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 나타내고 있다.

실험 결과는 앞선 실험에서와 다른 패턴의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 41에서 1, 2, 3번 측정 포인트의 온도는 약 26°C ~ 27.5°C 로 낮은 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 42에서 4, 5, 6번 측정 포인트의 온도는 약 27.9°C ~ 29°C 로 나타났다. Fig. 43에서 7, 8, 9번 측정 포인트의 온도는 약 26.2°C ~ 27.7°C 로 나타났고, 1, 2, 3번 측정 포인트에서와 유사한 온도분포를 보이고 있다. 모든 측정 포인트를 비교한 결과 전자냉각시스템에서 생성한 냉기를 송풍팬을 이용하여 컴퓨터 내부에 원활하게 순환을 시켜 모든 측정지점에서 온도가 적게는 2°C 에서 크게는 6.4°C 까지 낮아지는 것을 확인 할 수 있었고, 냉기가 컴퓨터 내부에 고르게 분포되어 발열체인 CPU, GPU, HDD가 가까이 위치한 4, 5, 6번 측정 포인트에서만 온도가 다른 측정 포인트에 비해 상대적으로 높게 나타났고, 나머지 측정 포인트에서는 낮은 온도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 특히 공기 냉각시스템만 사용할 경우에 발열하는 부품이 가까이 위치하지 않았지만 송풍이 원활하게 이루어지지 못해서 온도분포가 높게 나타났던 3, 6번 측정 포인트에서는 온도가 약 6.4°C 와 4.6°C 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 모든 측정 지점에서의 평균온도는 약 27.3°C 로 공기 냉각시스템만 사용한 컴퓨터 내부의 평균온도보다 약 2.9°C 낮게 나타났다. 또한, 앞선 실험에 비해 각 측정 포인트에서의 온도 편차도 약 3°C 로 상대적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 송풍팬의 영향으로 인해 컴퓨터 내부와 전자냉각시스템의 냉각면에서 다소 큰 온도차가 발생하더라도 이슬이 맺히지 않은 것을 확인할 수 있었다.

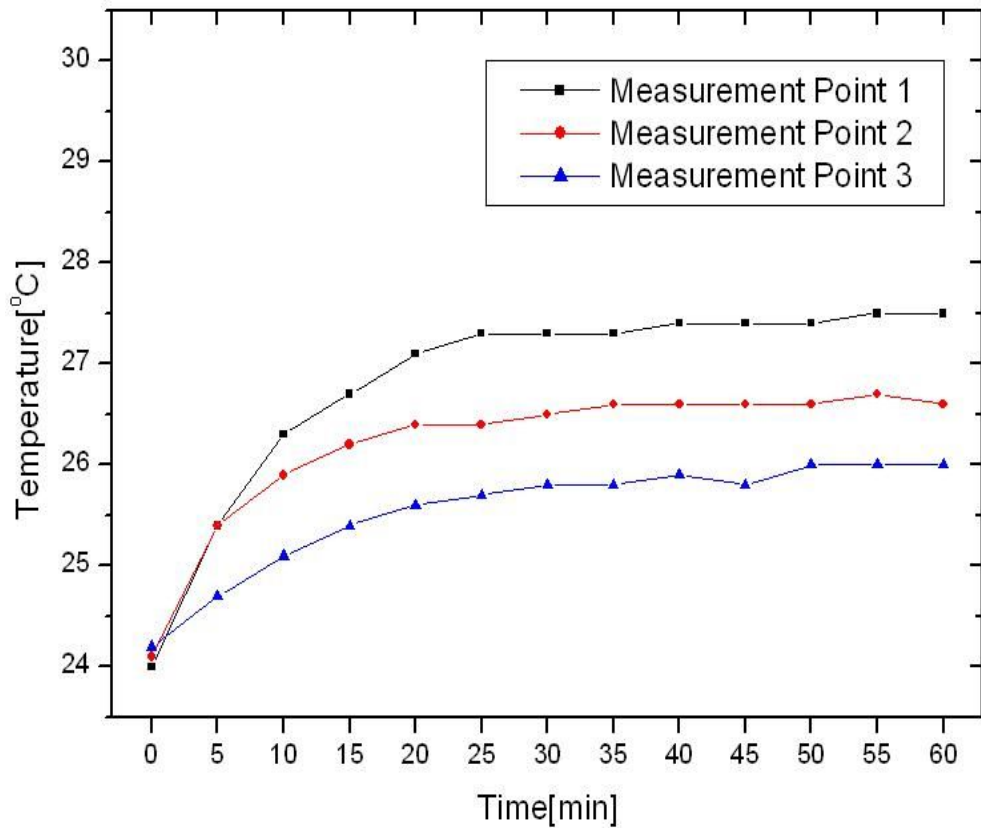


Fig. 41 Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached flow fan

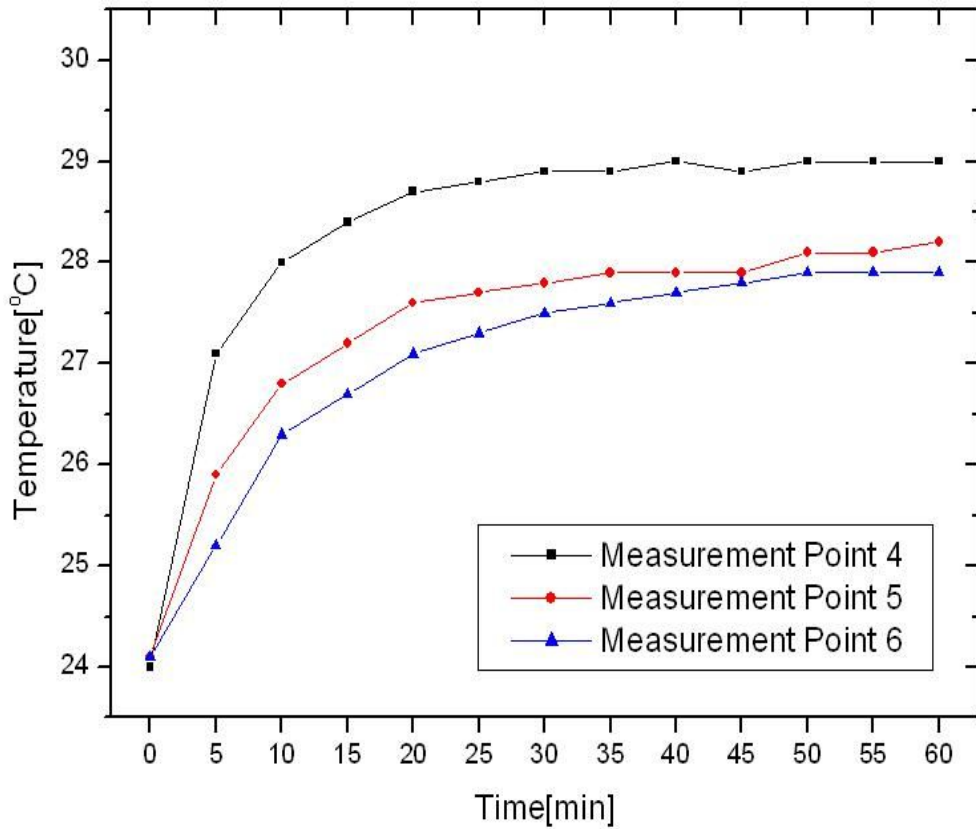


Fig. 42 Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached flow fan

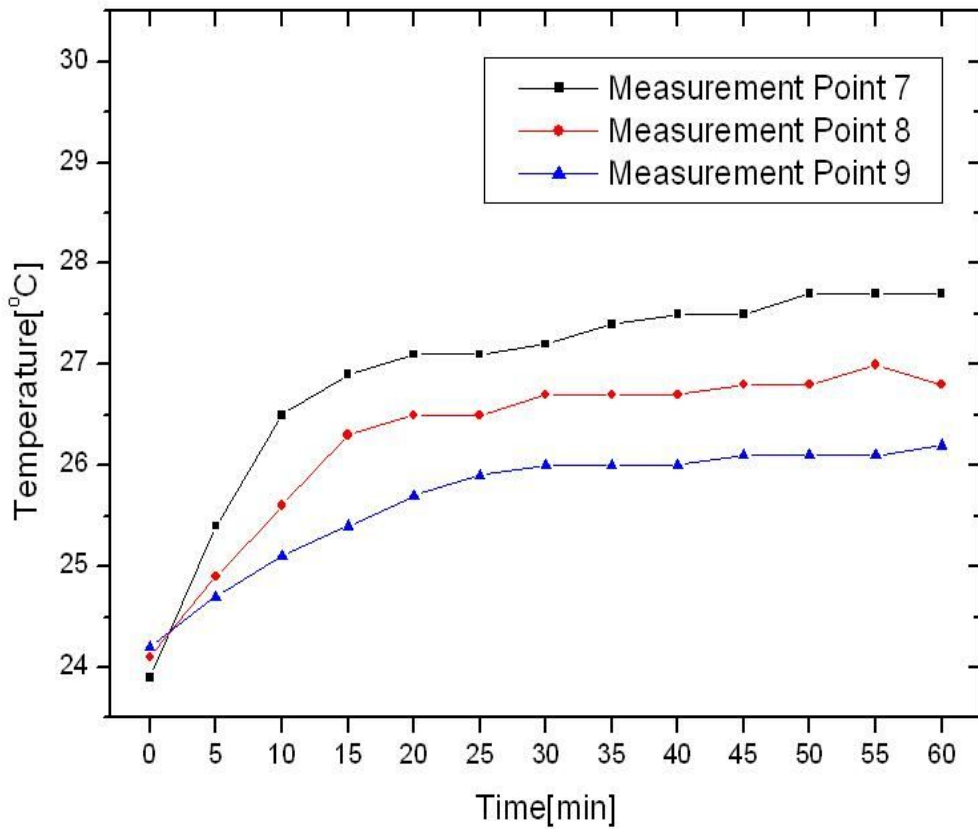


Fig. 43 Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached flow fan

Figs. 44 ~ 46은 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템을 직접 컴퓨터에 설치하고, 컴퓨터를 먼저 1시간 동안 작동시켜 컴퓨터의 내부온도를 일정하게 유지한 후 전자냉각시스템을 작동시켜 온도분포를 1시간 동안 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 나타내고 있다. 컴퓨터를 1시간 동안 작동시켜 내부의 온도가 상승된 상태에서 일정하게 유지시킨 후, 전자냉각시스템을 작동하면서 온도분포 측정 실험을 시작하였기 때문에 공기 냉각시스템만 사용하여 1시간 동안 컴퓨터를 작동시킨 후의 각 측정 포인트의 온도분포가 시작온도가 되었다. 따라서, 각 측정 포인트에서 발생한 열량이 다르기 때문에 시작온도 역시 각 측정 포인트에서 다르게 나타났다.

Fig. 44에서 1, 2, 3번 측정 포인트의 온도분포는 약 $25.8^{\circ}\text{C} \sim 27.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. Fig. 45에서 4, 5, 6번 측정 포인트의 온도분포는 약 $29^{\circ}\text{C} \sim 29.7^{\circ}\text{C}$ 를 보인다. Fig. 46에서 7, 8, 9번 측정 포인트의 온도분포는 약 $26.9^{\circ}\text{C} \sim 27.4^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 1, 2, 3번 측정 포인트에서와 유사한 온도분포를 보이고 있다. 전자냉각시스템에서 생성한 냉기를 송풍팬을 이용하여 컴퓨터 내부에 원활하게 순환시켜 모든 측정 포인트에서 온도분포가 공기 냉각시스템을 적용한 경우와 비교해서 적게는 1.8°C 에서 크게는 6.5°C 까지 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다. 컴퓨터와 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템을 동시에 작동시켰을 경우와 비교하면, 약간의 온도차를 제외하면 측정 포인트에서 발생하는 온도분포 패턴은 아주 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. CPU, GPU, HDD가 인접한 4, 5, 6번 측정 포인트에서만 다른 측정 포인트에 비해 상대적으로 높게 나타났고, 나머지 측정 포인트에서는 낮은 온도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 각 측정 포인트에서 발생한 온도 편차도 최대 3.9°C 로 동시에 작동시켰을 경우보다 약 0.9°C 정도 높게 나타다. 모든 측정 포인트에서 평균온도는 약 27.7°C 로 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동시켰을 경우에 비해 약 0.4°C 정도 높게 나타났지만, 그 차이가 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 실험결과를 바탕으로 컴퓨터 내부의 온도가 높아졌을 경우에 필요에 따라 전자냉각시스템을 작동시켜도 좋은 발열제어 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 송풍팬의 영향으로 전자냉각장치의 냉각면에 이슬이 맺히지 않았다.

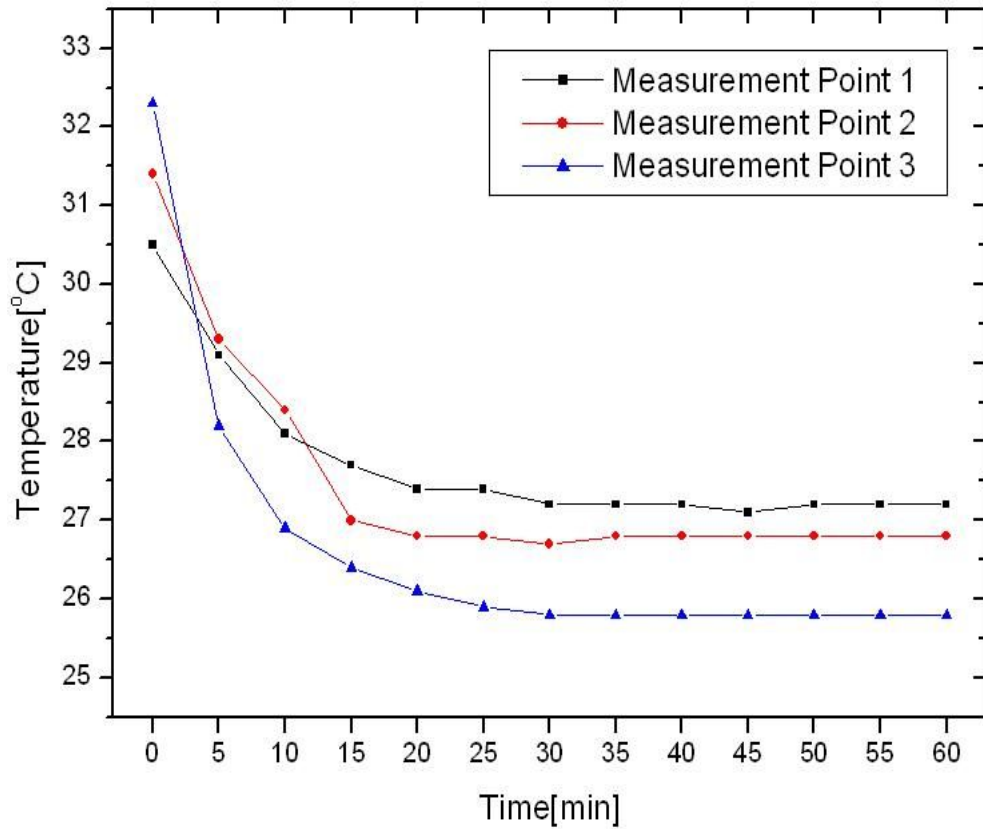


Fig. 44 Temperature distribution results in the PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached flow fan after 1 hour

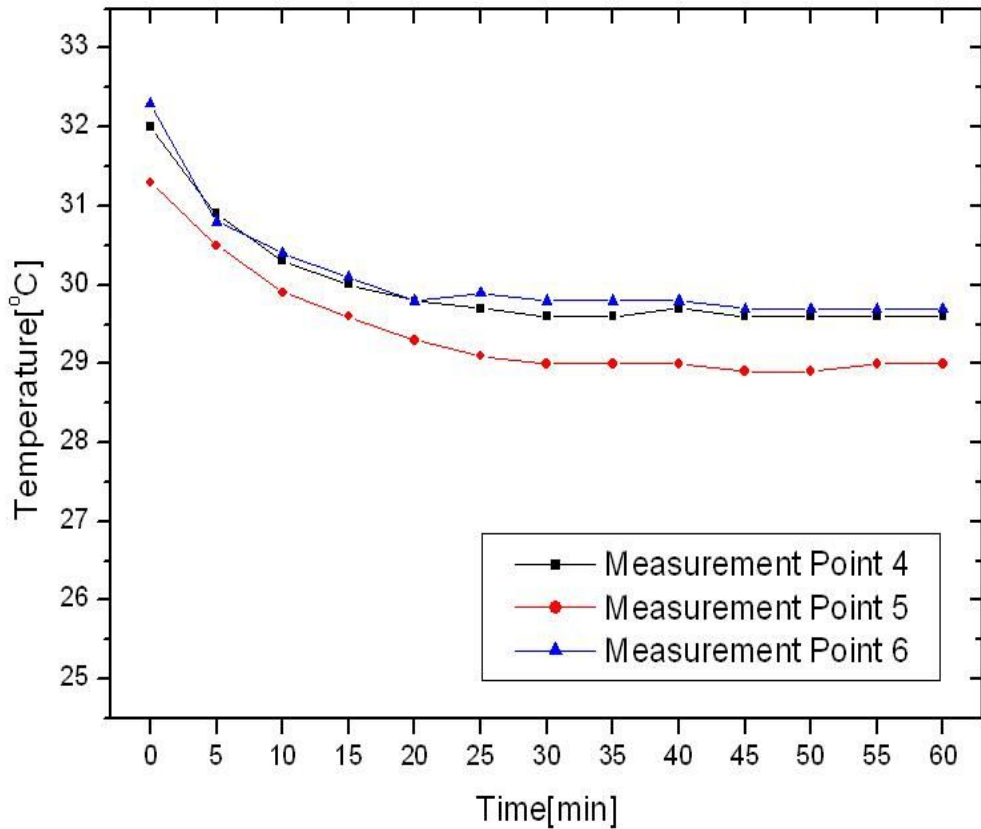


Fig. 45 Temperature distribution results in the PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached flow fan after 1 hour

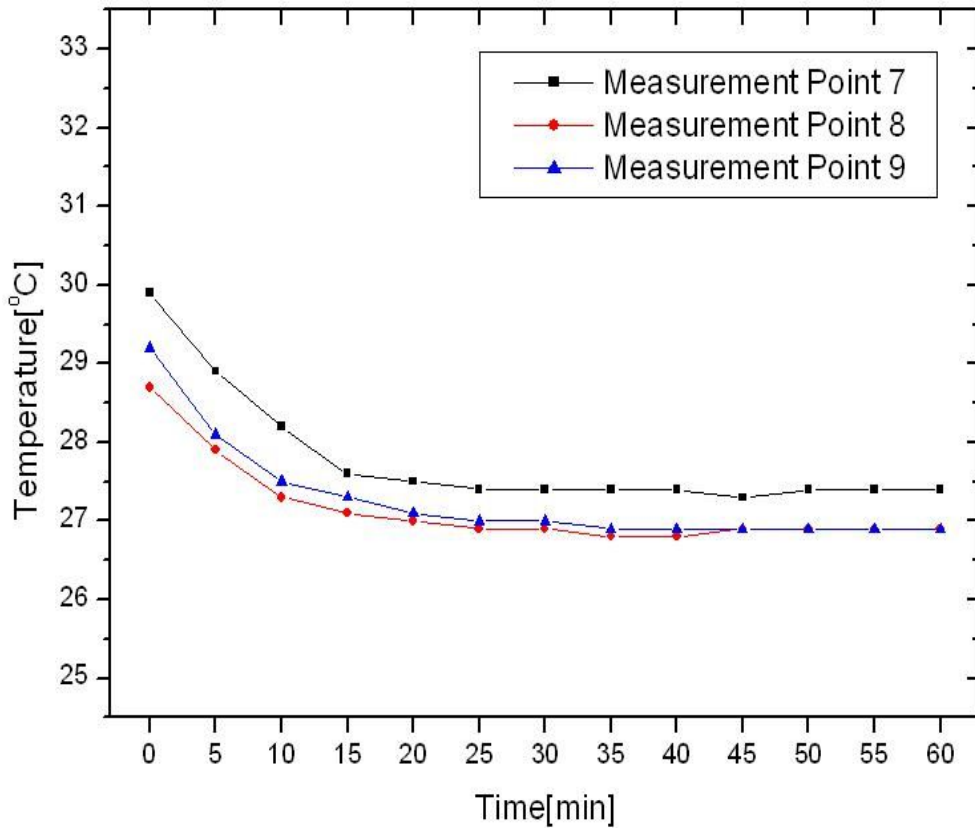


Fig. 46 Temperature distribution results in the PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached flow fan after 1 hour

Figs. 47 ~ 49은 아크릴 용기 내부에 설치된 컴퓨터와 송풍팬이 부착된 전자냉각 시스템을 동시에 작동하였을 경우에 컴퓨터 내부에서 발생하는 온도분포를 1시간 동안 측정하여 각 측정 포인트 별로 나누어 나타내고 있다.

실험 결과는 기존의 컴퓨터에서 사용하던 송풍구를 막았기 때문에 앞선 실험들과 다른 패턴의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 47에서 1번 측정 포인트는 약 35.7°C로 높은 온도분포를 보였고, 2, 3번 측정 포인트는 약 29.8°C와 27.5°C로 나타났다. Fig. 48에서 4번 측정 포인트는 약 36.3°C로 높은 온도분포를 보였고, 5, 6번 측정 포인트는 약 32.7°C와 31.6°C로 나타났다. Fig. 49에서 7, 8, 9번 측정 포인트는 약 27.7°C ~ 30.1°C로 상대적으로 낮은 온도분포를 보이고 있다. 모든 측정 포인트에서 온도분포를 비교한 결과 가장 열을 많이 발생하는 CPU, GPU, Power supply, HDD가 위치한 1, 4, 5, 6번 측정 포인트에서 가장 높은 온도분포를 보이고, 나머지 측정 포인트에서는 상대적으로 낮은 온도분포를 보인다. 3, 6, 9번 측정 포인트에서는 CPU, GPU와 같은 고열을 발생하는 부품이 가까이 위치하지 않기 때문에 전자냉각 시스템에서 발생한 냉기가 컴퓨터 내부의 발열보다 빠르게 전달되어 실험 초기에 온도가 약간 낮아졌다. 이후에 컴퓨터 내부의 발열에 의해 온도분포가 점점 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 모든 측정 포인트에서 평균온도는 약 31.2°C로 공기 냉각시스템을 사용한 컴퓨터 내부의 평균온도 30.9°C와 0.3°C 밖에 차이가 나지 않았으나, 각 측정 포인트에서 발생한 온도편차는 온도가 가장 높은 4번 측정 포인트와 가장 낮은 3번 측정 포인트의 차이가 약 8.8°C로 다른 실험에 비해 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이 실험을 공기 냉각시스템을 사용한 컴퓨터 내부의 온도분포 측정 실험과 비교한 결과, 발열제어에 월등히 효과적이지 않았으나 외부의 환경에 영향을 받지 않으면서 비슷한 발열제어 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있었고, 송풍팬의 영향으로 컴퓨터 내부와 전자냉각시스템 냉각면의 온도차가 다소 크게 되더라도 냉각면에 이슬 맺힘 현상이 전혀 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

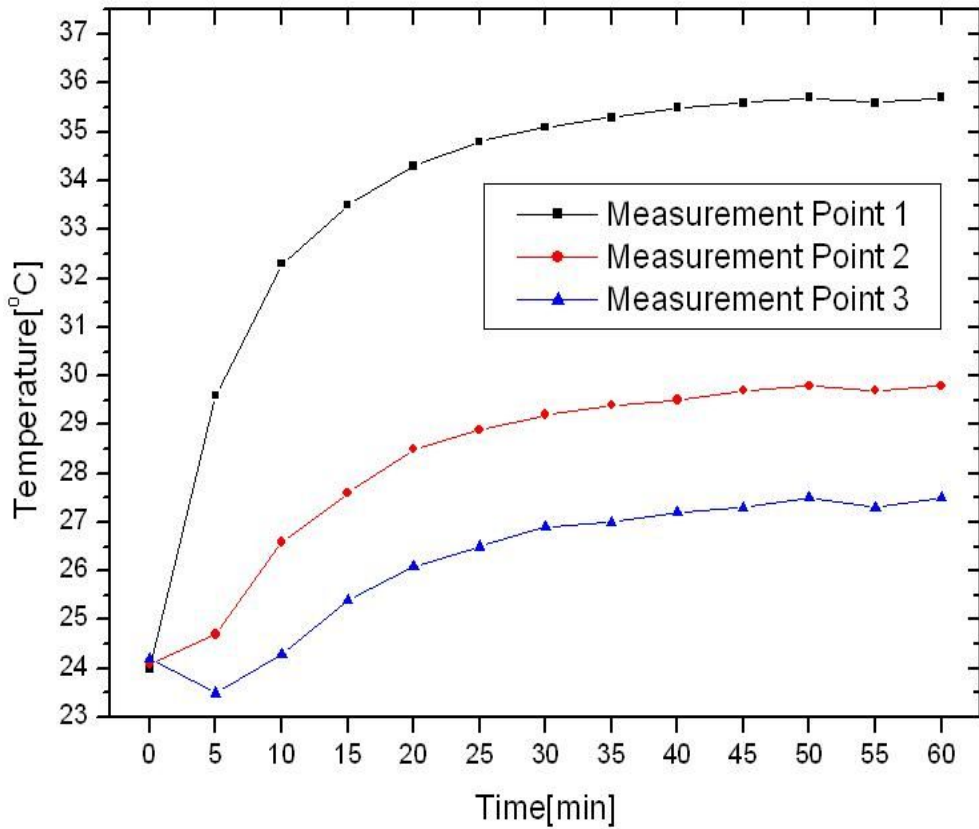


Fig. 47 Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 1, 2 and 3 using thermoelectric cooling system attached flow fan

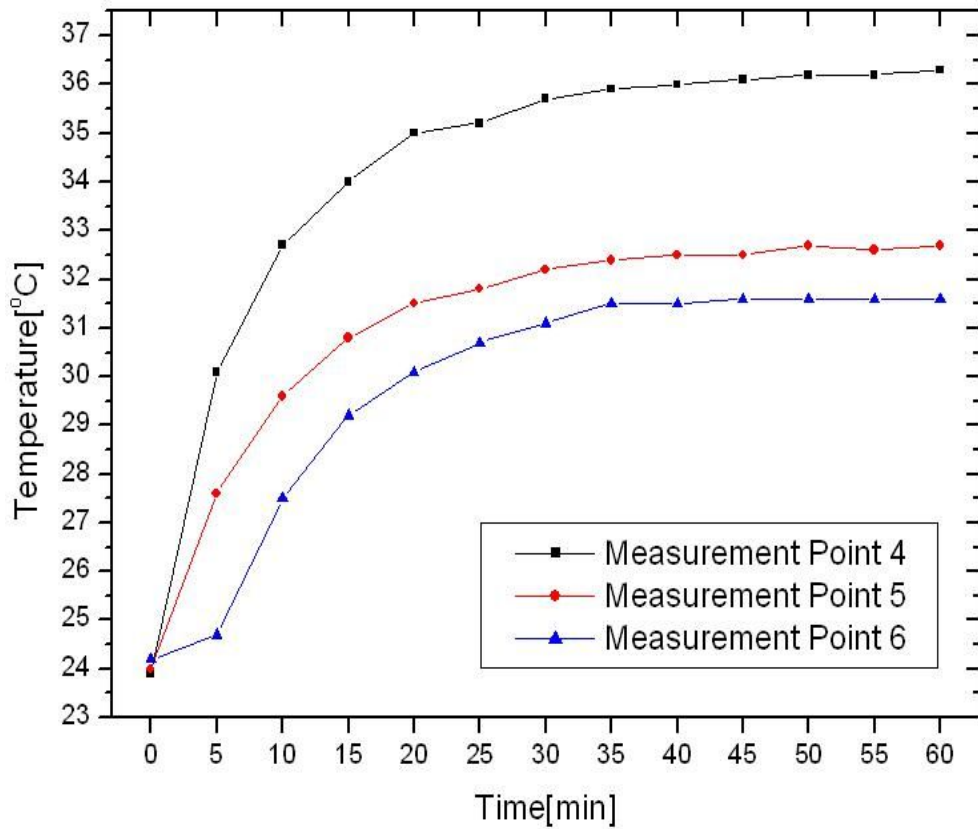


Fig. 48 Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 4, 5 and 6 using thermoelectric cooling system attached flow fan

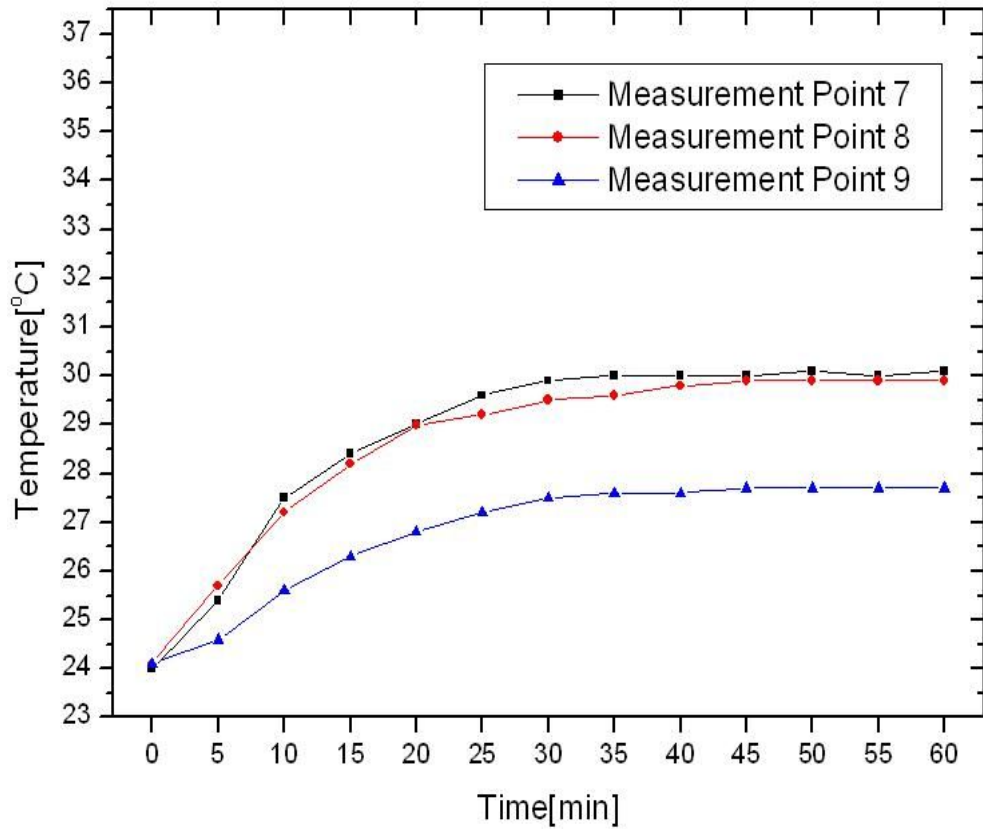


Fig. 49 Temperature distribution results in insulation PC at measurement point 7, 8 and 9 using thermoelectric cooling system attached flow fan

제 6 장 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 50은 기존의 공기 냉각시스템을 사용한 컴퓨터를 1시간동안 작동시켰을 경우에 컴퓨터 내부의 온도분포를 수치해석을 통해 계산한 결과이다. 이 결과를 Figs. 28 ~ 30의 실험을 통해 얻은 온도분포 데이터와 비교해 보았다. Fig. 51은 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 실험결과 6, 3번 측정 포인트에서 약 32.5℃와 약 32.4℃로 가장 높은 온도분포를 나타냈고, 수치해석에서도 실험결과와 동일하게 6, 3번 포인트에서 가장 높은 온도분포를 보였으며 이때의 온도는 약 32.2℃ ~ 32.3℃로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 실험에서 다음으로 온도분포가 높게 나타난 측정 포인트는 1, 2, 4, 5번으로 최종온도는 약 30.7℃ ~ 31.9℃의 온도분포를 나타내고 있었다. 수치해석에서도 실험에서와 마찬가지로 1, 2, 4, 5번 포인트에서 약 30℃ ~ 31.5℃의 온도분포를 보이며 두 번째로 온도분포가 높은 영역을 나타냈다. 마지막으로 실험과 수치해석에서 동일하게 7, 8, 9번 포인트에서 가장 낮은 온도분포를 나타내고 있었다. 실험에서는 약 28.8℃ ~ 29.8℃의 온도분포를 나타냈고, 수치해석에서는 약 29.7℃ ~ 30℃의 온도분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 실험을 통해 측정된 온도분포와 수치해석을 통해 계산된 온도분포를 비교한 결과, 모든 측정 포인트에서 최소 0℃에서 최대 0.7℃의 온도차가 발생하였다.

Fig. 52는 공기 냉각시스템과 전자냉각시스템을 사용한 컴퓨터를 1시간 동안 작동시켰을 경우에 내부의 온도분포를 수치해석을 통해 계산한 결과이다. 이 결과를 Figs. 41 ~ 43의 실험을 통해 얻은 온도분포 데이터와 비교해 보았다. Fig. 53은 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 실험결과 4, 5번 측정 포인트에서 약 29℃와 약 28.2℃로 가장 높은 온도분포를 나타냈고 수치해석에서도

실험에서와 동일하게 4, 5번 포인트에서 가장 높은 온도분포를 보였으나 온도는 약 30.9℃와 약 28.6℃로 나타났다. 이 포인트들에서 실험과 수치해석에서 최대 온도차는 약 1.9℃로 약간의 온도차가 발생하였다. 그 외의 측정 포인트에서도 최소 0℃에서 최대 1.1℃의 온도차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 54는 공기 냉각시스템을 사용한 컴퓨터를 1시간 동안 작동시켜 컴퓨터 내부의 온도를 상승시킨 후 전자냉각시스템을 1시간 동안 작동시켰을 경우에 컴퓨터 내부의 온도분포를 수치해석을 통해 계산한 결과이다. 이 결과를 Figs. 44 ~ 46의 실험을 통해 얻은 온도분포 데이터와 비교해 보았다. Fig. 55은 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 실험에서 4, 5, 6번 측정 포인트에서 약 29℃ ~ 29.7℃로 가장 높은 온도분포를 나타냈고 수치해석에서도 실험에서와 동일하게 4, 5, 6번 포인트에서 약 29.4℃ ~ 30.2℃가장 높은 온도분포를 보였다. 모든 측정 포인트에서 최소 0.1℃에서 최대 1.3℃의 온도차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 56은 단열된 용기 안에 설치된 컴퓨터와 전자냉각시스템을 동시에 작동시킨 후 1시간 동안의 컴퓨터 내부 온도분포를 수치해석을 통해 계산한 결과이다. 이 결과를 Figs. 47 ~ 49의 실험을 통해 얻은 온도분포 데이터와 비교해 보았다. Fig. 57은 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 실험에서 1, 4, 5번 측정 포인트에서 약 35.3℃ ~ 38.9℃로 가장 높은 온도분포를 나타냈고 수치해석에서도 실험에서와 동일하게 1, 4, 5번 포인트에서 약 34.4℃ ~ 38.4℃가장 높은 온도분포를 보였다. 모든 측정 포인트에서 최소 0.2℃에서 최대 3.1℃의 온도차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

실험과 수치해석을 통해 얻은 온도분포를 비교한 결과 수치해석을 위해 사용한 모델링에서 컴퓨터 내부의 모든 부품, 케이블, 칩, 미세한 틈새 등을 생략하고, 발열을 많이 하는 주요 부품들만을 고려하였기 때문에 약간의 온도차가 발생하였다. 그러나 실험과 수치해석에서 얻어진 온도분포의 패턴은 매우 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 실험과 수치해석의 비교를 통해 수치해석으로 계산된 결과를 신뢰할 수 있다고 판단하였다.

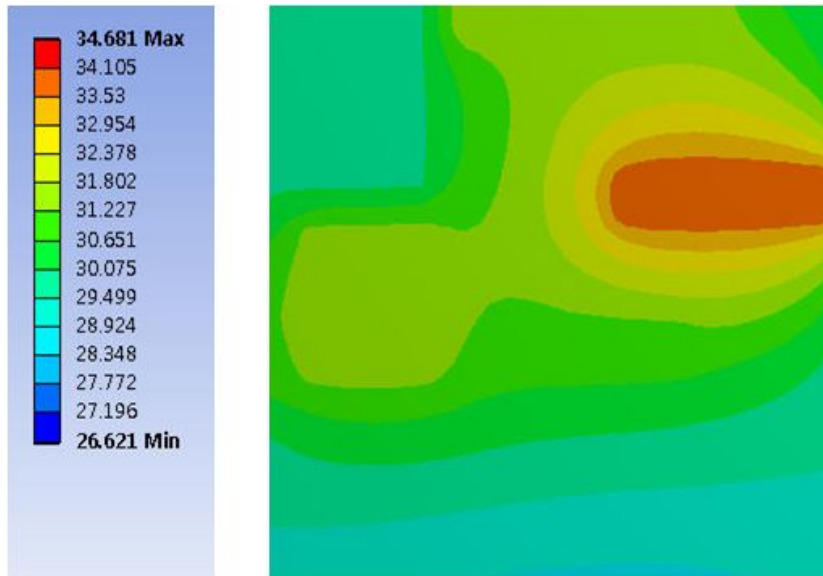


Fig. 50 Temperature distribution results in PC using air cooling system by numerical analysis

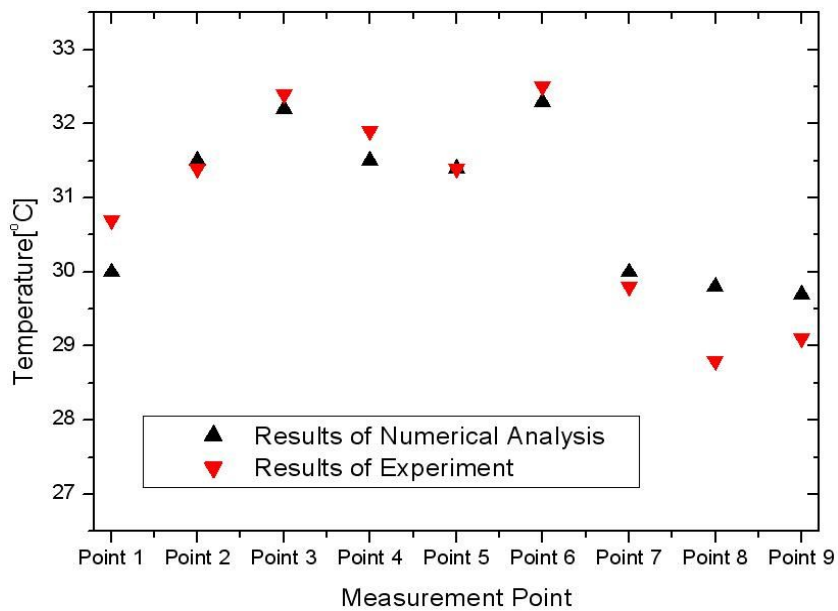


Fig. 51 Comparison between result of numerical analysis and experiment using air cooling system

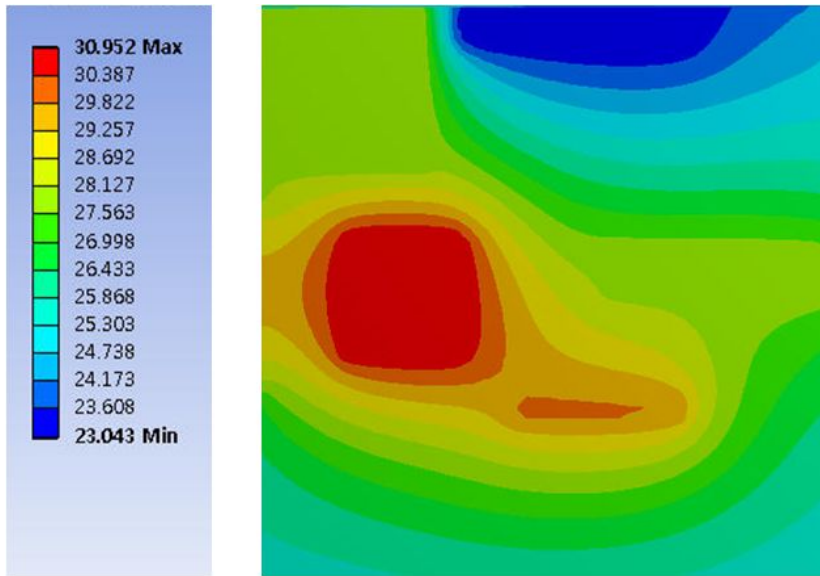


Fig. 52 Temperature distribution results in PC using thermoelectric cooling system by numerical analysis

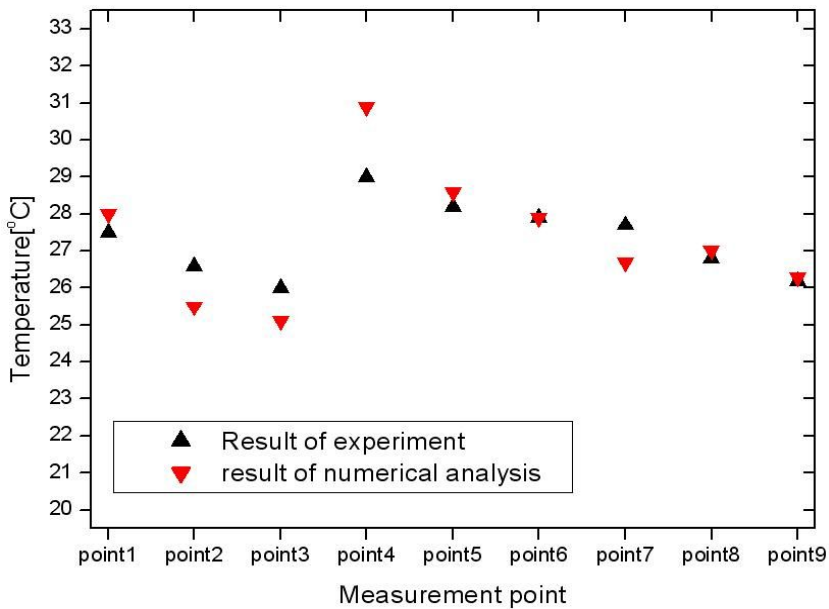


Fig. 53 Comparison between result of numerical analysis and experiment in PC using thermoelectric cooling system

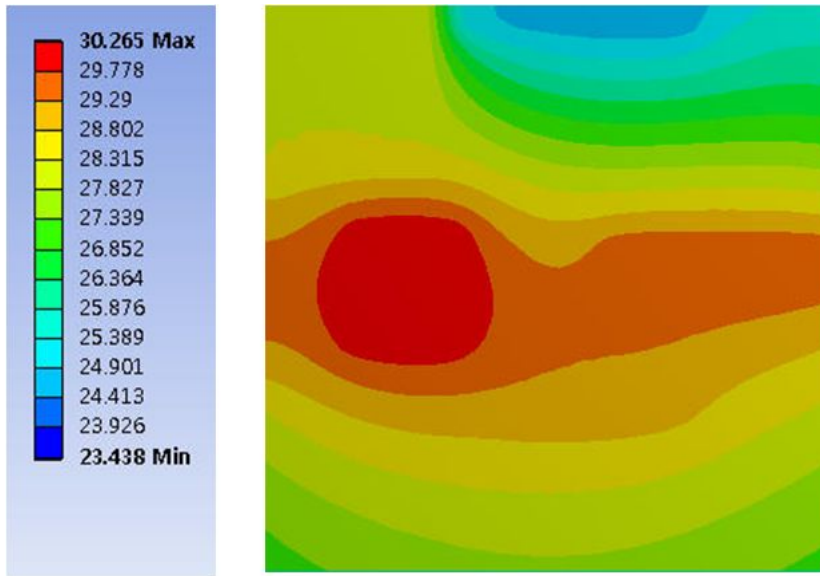


Fig. 54 Temperature distribution results in PC using thermoelectric cooling system after 1hour by numerical analysis

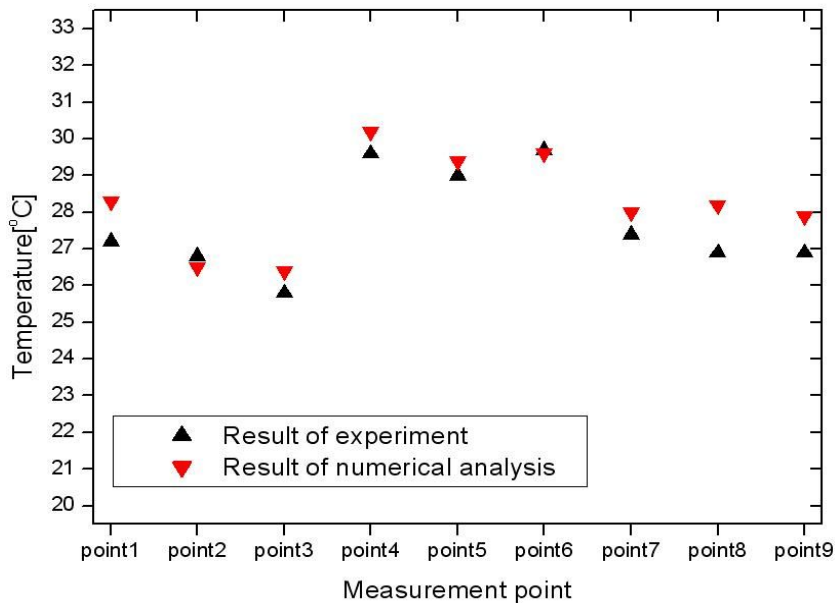


Fig. 55 Comparison between result of numerical analysis and experiment in PC using thermoelectric cooling system after 1hour

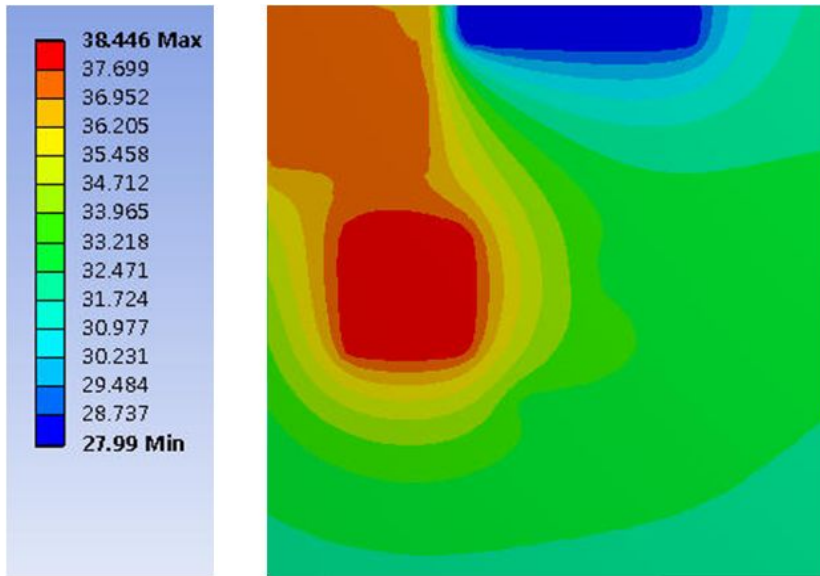


Fig. 56 Temperature distribution results in insulation PC using thermoelectric cooling system by numerical analysis

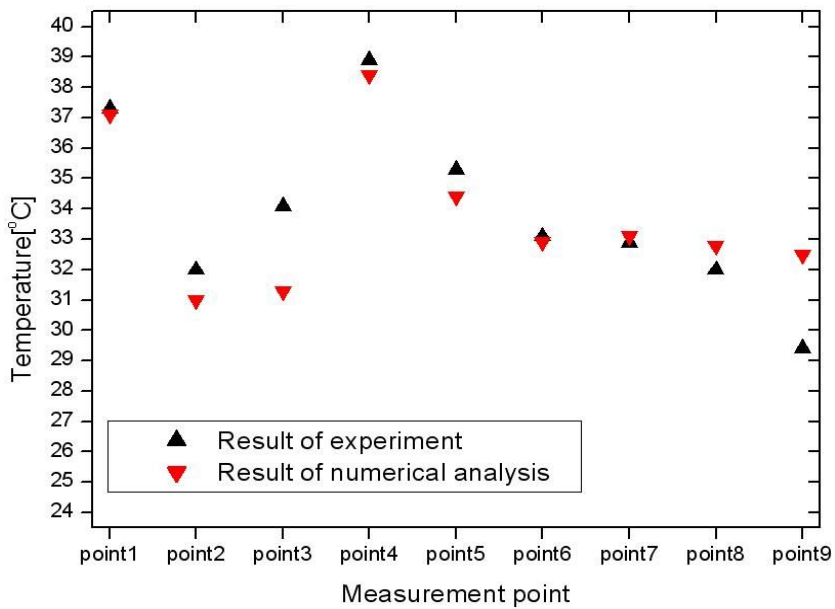


Fig. 57 Comparison between result of numerical analysis and experiment in insulation PC using thermoelectric cooling system

Fig. 58은 기존의 공기 냉각식 시스템을 사용하지 않고 컴퓨터를 작동시켰을 경우에 컴퓨터 내부의 온도분포를 수치해석을 통해 계산한 결과이고, Fig. 59은 공기 냉각식 시스템을 대신하여 열전소자를 이용한 전자냉각시스템을 사용하였을 경우에 컴퓨터 내부의 온도분포를 수치해석을 통해 계산한 결과이다. Fig. 60는 냉각 시스템을 사용하지 않은 경우와 전자냉각시스템을 사용한 경우에 수치해석을 통해 얻은 온도분포를 비교한 결과이다. 수치해석결과 냉각시스템을 사용하지 않은 컴퓨터의 내부에서는 CPU와 GPU 부근에서 약 40℃ 전·후의 열을 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 열전소자를 사용한 전자냉각시스템을 컴퓨터에 장착한 경우에 컴퓨터 내부의 온도는 가장 높은 발열을 보이는 CPU 부근에서도 약 32.3℃의 온도분포를 나타내는 것으로 계산되었다. 또한 전자냉각시스템의 영향으로 컴퓨터 내부의 온도차는 1번 포인트에서 약 4.6℃로 가장 적게 낮아졌으며, 2, 3, 4, 5번 포인트에서 약 9.2℃ ~ 10.5℃가 낮아지는 것으로 계산되었다. 1번 포인트에서 온도가 가장 적게 낮아진 이유는 전자냉각시스템의 냉기가 Power Supply의 벽면에 막혀 전자냉각시스템에서 발생한 냉기를 2, 3번 포인트 방향으로 원활하게 순환하였지만, 1번 방향으로 냉기가 순환하지 못하였기 때문에 1번 포인트에서 온도가 다른 포인트들에 비하여 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

모든 측정 포인트에서의 평균온도는 냉각시스템을 사용하지 않은 경우에 약 35.6℃였고, 전자냉각시스템을 사용한 경우에 약 28℃로 계산되었다.

Fig. 61는 전자냉각시스템을 사용한 컴퓨터 내부의 온도분포와 공기 냉각시스템을 사용한 컴퓨터 내부의 온도분포 비교한 그래프이다. 전자냉각시스템을 사용하였을 경우에 2, 3번 포인트에서 약 8.3℃ ~ 9.7℃ 정도의 온도차를 보이며 가장 크게 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 공기 냉각시스템에서 사용되는 냉각팬이 1, 4번 포인트에 아주 가깝게 위치해 있기 때문에 1, 4번 지점에서의 온도는 전자냉각시스템을 사용하는 경우보다 공기 냉각시스템을 사용하는 경우에 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그 외의 모든 지점에서는 온도값의 차이는 있었지만 전자냉각시스템을 사용하였을 경우에 온도가 대체로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 평균 온도 역시 전자냉각시스템을 사용하였을 경우에 약 28℃로 계산되었고, 공기 냉각시스템을 사용한 컴퓨터의 평균 온도는 약 30.1℃로 계산되었다. 전자냉

각시스템을 사용한 경우에 냉각성능이 더 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 각 측정 포인트에서의 온도 편차는 기존의 냉각시스템을 사용하였을 경우에 약 2.6℃로 적게 나타났고, 전자냉각시스템을 사용하였을 경우에 온도편차는 약 9.2℃로 매우 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

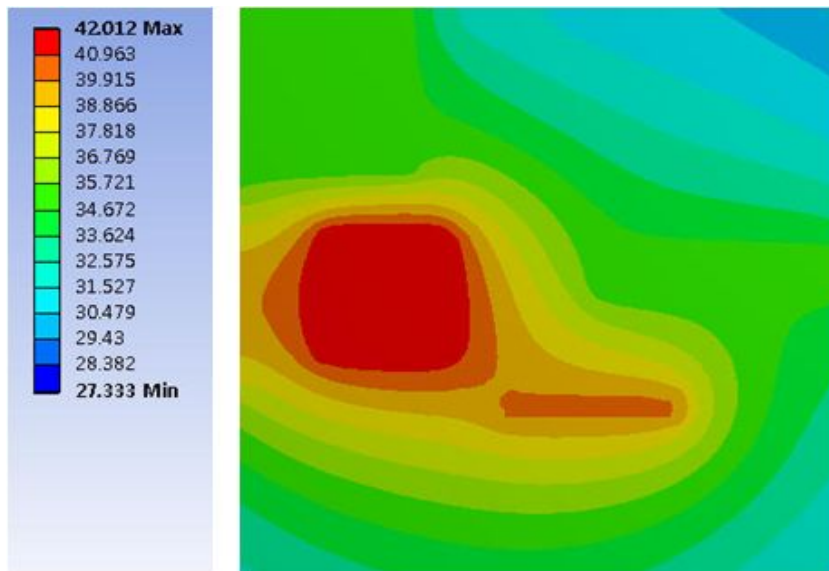


Fig. 58 Temperature distribution results in PC removed cooling system by numerical analysis

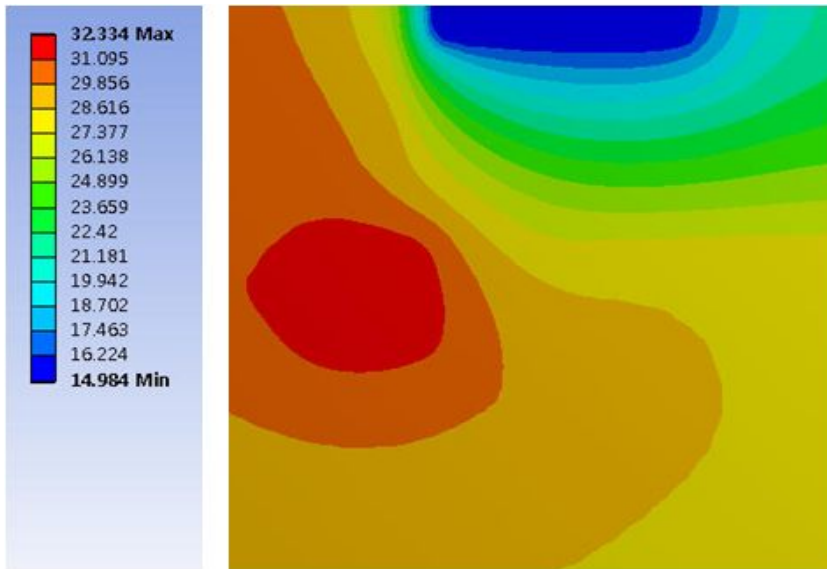


Fig. 59 Temperature distribution results in PC attached only thermoelectric cooling system by numerical analysis

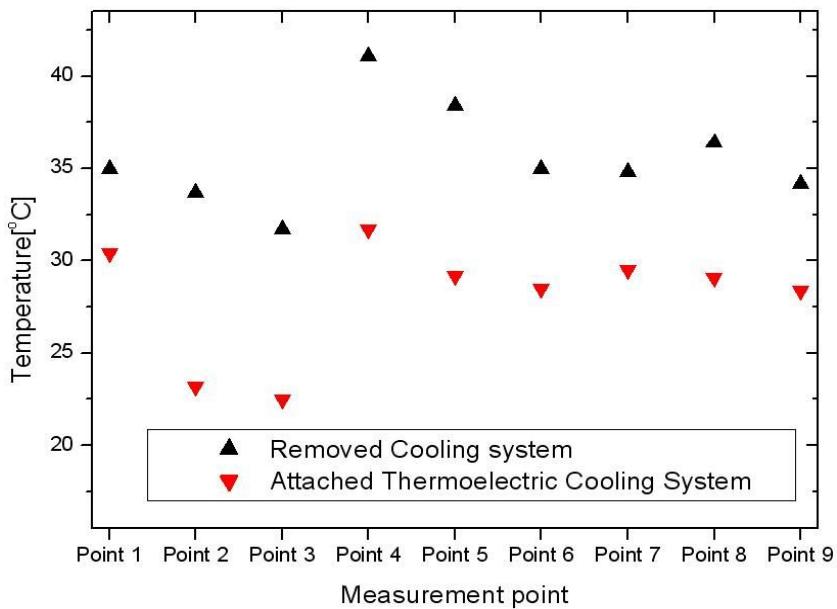


Fig. 60 Comparison between result of numerical analysis attached only thermoelectric cooling system and removed cooling system

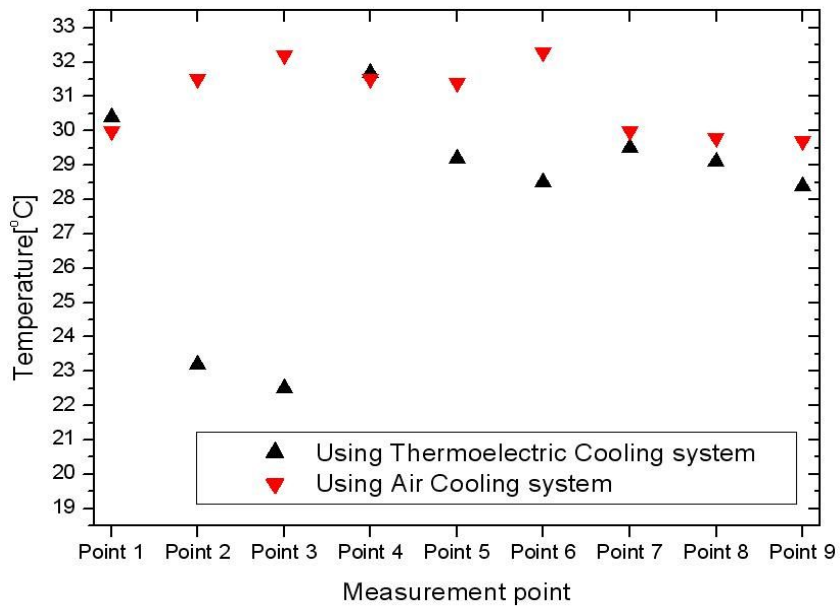


Fig. 61 Comparison between result of numerical analysis attached only thermoelectric cooling system and air cooling system

제 7 장 결 론

본 연구에서는 컴퓨터의 내부에서 발생하는 열을 효과적으로 제어하기 위하여, 열전소자의 냉각면에 방열판과 송풍팬을 적용한 전자냉각시스템을 제작하고 컴퓨터에 설치하여 컴퓨터 내부의 온도분포를 측정하였다. 또한, 실험에서와 같은 조건에서 수치해석을 실시하여 전자냉각시스템을 이용한 냉각 성능 개선을 위한 기초 자료를 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 열전소자의 냉각면에 방열판을 부착한 전자냉각시스템을 사용한 컴퓨터에서는 기존의 공기 냉각시스템만 사용한 컴퓨터에 비해 평균온도가 약 2.8℃ 정도 낮아지면서 약간의 온도분포 감소를 보였으나, 전자기기에 치명적인 고장이나 파손을 일으킬 수 있는 이슬 맺힘 현상이 발생하여 이 상태로는 전자기기에 적용하는데 어려움이 있다는 결론을 내릴 수 있었다.

2. 냉각면에 방열판과 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템은 공기 냉각시스템과 함께 사용하였을 경우 공기 냉각시스템만 사용한 컴퓨터에 비해 평균온도가 약 3.6℃ 낮게 나타났고, 온도가 상승한 후에 전자냉각시스템을 작동시키더라도 약 3.2℃ 정도 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 송풍팬의 영향으로 전자냉각시스템에서 이슬이 맺히지 않았다. 이 결과를 통해 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템은 많은 작업이나 장시간 사용으로 인해 컴퓨터 내부의 온도가 적정온도 이상으로 높아질 경우에 필요에 따라 컴퓨터 내부의 발열제어를 도울 수 있는 컴퓨터의 보조 냉각시스템으로 충분히 사용 가치가 있다고 사료된다.

3. 단열된 상태에서 송풍팬을 부착한 전자냉각시스템을 이용하여 컴퓨터 내부의 발열을 제어할 경우에 평균온도는 약 31.2℃로 공기 냉각시스템에서의 평균온도와 약 0.3℃ 밖에 차이가 나지 않았으며, 비슷한 발열제어 성능을 얻을 수 있고, 외부 환경으로부터 거의 영향을 받지 않기 때문에 주위의 온도가 높은 경우에도 일정한 발열제어 성능을 보일 수 있으며, 주위의 먼지나 이물질로부터 오염을 방지할 수 있다는 장점이 있다. 컴퓨터나 전자기기를 사용하는 환경에 따라 적절하게 사용하면 기존의 냉각시스템보다 전자기기의 수명을 연장하거나 성능을 향상하는데 도움이 될 것이라고 사료된다.

4. 실험을 통해 송풍팬을 사용한 전자냉각시스템은 송풍팬의 영향으로 컴퓨터 내부와 전자냉각시스템의 온도차가 크게 되더라도 이슬 맺힘 현상이 발생하지 않는 것을 확인하였기 때문에 더 좋은 냉각성능을 갖는 열전소자를 사용하여 전자냉각시스템을 제작한다면 충분히 기존의 냉각시스템 보다 우수한 발열제어 성능 얻을 수 있을 것이라고 판단하여, 전자냉각시스템의 온도를 약 15℃로 낮추어 설정하고 기존의 공기냉각시스템을 제거한 상태에서 수치해석을 수행하였다. 그 결과 기존의 공기냉각시스템을 사용한 경우에 비해 온도편차는 약 9.2℃로 크게 나타났지만, 평균온도는 약 28℃로 공기 냉각시스템을 사용한 경우에 비해 약 2.1℃ 정도 낮은 온도분포를 보였다. 이 수치해석 결과를 통해 향후 실험을 수행하는데 있어서 더 좋은 성능의 열전소자를 이용하여 전자냉각시스템을 제작하고, 장착위치를 발열량이 많은 CPU와 GPU에 가깝게 한다면 CPU와 GPU에서 발생하는 열을 더욱 효과적으로 제어하여, 각 포인트에서 발생하는 온도편차를 감소시키고, 전체적인 발열제어 성능 또한 향상 될 것이라고 사료된다.

5. 실험과 수치해석을 통해 얻은 결과는 기존에 사용하던 전자기기의 냉각시스템을 대신하여 발열제어 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 전자냉각시스템을 제작하는데 중요한 기초 연구 자료가 될 것이라고 사료된다.

참 고 문 헌

1. M. Pecht, "Handbook of Electronics Package Design", Marcel Dekker, Inc., pp. 40-43, 1990.
2. J.T. Choi, O.K. Kwon, D.A. Cha, J.H. Yun and Y.C. Kim, "Experimental Study of Liquid Cooling System for Computer", Journal of the SAREK, pp. 867-872, 2010
3. S.S. Lim, M.K. Son, W.K. Sung, B.H. Kim and D.U. Cho, "Comparison and Analysis of CPU Temperature According to the Program By Used", Journal of the KICS 2011 Summer Conference, pp. 978-979, 2011
4. S.H. Kim and M.H. Kim, "A Primary Study on the Increasing of Efficiency in the Computer Cooling System by means of External Air", Journal of the KSME 2009 Spring Conference, pp. 334-339, 2009.
5. B.H. Kang, Y. Jaluria and S.S. Tewari, "Mixed Convection Transport from an Isolate Heat Source Module on a Horizontal Plate", Journal of Heat Transfer, Vol. 112, pp 653-661, 1990.
6. S.Y. Kim, H.J. Sung and J.M. Hyun, "Mixed convection from Multi-Layered Boards with Cross-Sreamwise Periodic Boundary Conditions", International Journal Heat and Mass Transfer", Vol. 35, pp. 2941-2952, 1992.
7. 서민환, "컴퓨터와 냉각 기술", Journal of the KSME, Vol. 47, No. 5, pp. 44-50, 2007.

8. D. Dancer and M. Pecht, "Component Placement Optimization for Convectively Cooled Electronics", IEEE Transactions Reliability, Vol. 38, pp. 199-205, 1989.
9. E.M. Sparrow and J.W. Ramsey, "Heat transfer and pressure drop for a staggered wall-attached array of cylinders with tip clearance." International Journal of Heat and Mass Transfer, No. 21, pp. 1369-1377, 1978.
10. L. Madhusudau and B.C. Avram, "Optimization of Vertical Pin-Fin Heat Sinks in Natural Convective Heat Transfer", Heat Transfer Proceedings of 11th IHTC, Vol. 3, pp.501-506, 1998.
11. S.I. Park, J.H. Kim, J.H. Yun, C.S. Lee and Y. H. Choi, "An Experimental Study on the Thermal Resistance Characteristics for Layered Heat Sink" Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference, pp. 1166-1171, 2003.
12. M. Tasaka et al., "Cooling Performance of Heat Sinks with Corrugated-fins", Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp. 104-111, 1998.
13. S.H. Kim and M.H. Kim, "A Primary Study on the Enhancement of Efficiency in the Computer Cooling System using Entrance Tube of Outer Air" Journal of the KSPSE, Vol. 13, No. 4, pp. 56-61, 2009.
14. B.D. Yoon and K.H. Kim, "An Experimental Study on CPU Cooling System using Looped Heat Pipe", Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers 2002 Spring Conference, pp. 1241-1246, 2002.

15. M.H. Lee, J.W. Paek, S.Y. Kim and K.S. Lee, "Heat Transfer from a Fan-Aluminum Foam Heat Sink Assembly for CPU Cooling", Transactions of the KSME B, Vol. 26, No. 3, pp. 417-422, 2002.
16. H.C. Ham, I.H. Park and C.Y. Park, "An experimental study on the performance of a CPU cooling system with water", Proceedings of the Society Air-Conditional and Refrigerating Engineers of Korea 2009 Winter Conference, pp. 245-250, 2009.
17. M.H. Won, Y.H. Ahn, J.W. Kim and G.S. Kim, "Development of Desktop PC CPU Cooling Module using Heat Pipes", Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2002 Conference, pp. 1385-1388, 2002.
18. K.C. Lee, J.H. Kim, J.H. Yun, S.I. Park, Y.H. Choi and O.K. Kwon, "A Study on the Heat Dissipation Characteristics of Layered Heat Sink for CPU Cooling", Proceedings of the Society Air-Conditional and Refrigerating Engineers of Korea 2006 Summer Conference, pp. 182-187, 2006.
19. S.C. Kim, D.S. Jeon and Y.L. Kim, "Optimization of Evaporator for a Vapor Compression Cooling System for High Heat Flux CPU", Transactions of the KSME B, Vol. 32, No. 4, pp. 255-265, 2008.
20. O.K. Kwon, M.J. Choi, D.A. Cha and J.H. Yun, "A Study on Thermal Performance of Micro Channel Water Block for Computer CPU Cooling", Transactions of the KSME B, Vol. 32, No. 10, pp. 776-783, 2008.
21. D.A. Cha, O.K. Kwon and J.H. Yun, "A Study on Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of Radiator for Computer CPU Cooling", Transactions of the SAREK, Vol. 23, No. 1, pp. 1-7, 2011.

22. J.T. Choi, O.K. Kwon, J.H. Yun and Y.C. Kim, "A Numerical Study of the Effects of Heat Transfer and Fluid Flow on Tube Insertion Length in Computer-Cooling Radiators", Transactions of the KSME B, Vol. 35, No. 2, pp. 145-152, 2011.
23. J.H. Choi, J.H. Yoo, M.H. Seo, S.J. Kang and C.J. Kim, "Numerical analysis study of an optimal cooling system for desktop PC CPUs", Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2008 Spring & Summer Conference, pp. 2298-2303, 2008.
24. S.Y. Yoo, C.P. Hong and W.S. Shim, "A Study on the Performance of Thermoelectric Module and Thermoelectric Cooling System", Transactions of the SAREK, Vol. 16, No. 1, pp. 62-69, 2004.
25. H. Sofrata, "Heat rejection alternatives for thermoelectric refrigerators", Energy Conversion and Management, Vol. 37, No. 3, pp. 269-280, 1996.
26. J.G. Stockholm, "Current state of Peltier cooling", 26th International Conference of Thermoelectrics, Dresden, Germany, 1997.
27. Y.T. Cho and C.H. Lee, "Cooling Performance Improvement by Packing of Thermoelectric Module", The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 2010 Autumn Conference, pp.442~445, 2010
28. S.I. Lee, J.W. Choi and D.R. Lee, "Investigation of the Cooling Performance Using Peltier Module", Transactions of the SAREK, pp. 1156-1161, 2006.
29. B.J. Huang, C.J. Chin and C.L. Duang, "A Design Method of Thermoelectric

- Cooler", *International Journal Refrigeration*, Vol. 23, pp. 208-218, 2000.
30. B.H. Kang, H.J. Chang, S.Y. Kim and S.H. Kim, "Cooling Characteristics at Hot Side of the Thermoelectric Module for an Air Conditioner", *Transactions of the SAREK*, Vol. 14, No. 3, pp. 214-220, 2002.
 31. G.S. Attey, "Enhanced Thermoelectric Refrigeration System COP Through Low Thermal Impedance Liquid Heat Transfer System", *Proc. of the 17th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 519-524, 1998.
 32. M. Solomon, "Determination of TE Module Parameters", *18th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 519-524, 1998.
 33. D. Astrain, J.G. Vian and M. Dominquez, "Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 17, pp. 2183-2200, 2003.
 34. K.H. Lee and O.J. Kim, "Effect of the Thermoelectric Element Thickness on the Thermal Performance of the Thermoelectric Micro-Cooler", *Transactions of the SAREK*, Vol. 18, No. 3, pp. 211-217, 2006.
 35. A. Miner and A. Majumdar, "Thermo-Electro Mechanical Refrigeration Based on Transient Thermoelectric Effects", *Proceedings of the 18th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 27-30, 1999.
 36. S.Y. Yoo, C.P. Hong and W.S. Shim, "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, 2004.

37. M. Yamanashi, "A New Approach to Optimum Design in Thermoelectric Cooling Systems", *Journal of Applied Physics*, Vol. 80, No. 9, pp. 5494-5512.
38. J.H. Jin, J.R. Cho and M.G. Kim, "Study on the performance of showcase refrigerating chamber using thermoelectric module", *Proceedings of the Society Air-Conditional and Refrigerating Engineers of Korea 2002 Winter Annual Conference*, pp. 35-40, 2002.
39. N.F. Guler and R. Ahiska, "Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 1271-1276, 2002.
40. J.M. Kim, M.G. Kim and H.S. Chung, "Analysis of the thermal performance of cosmetics cooler by thermoelectric cooling", *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2006 Spring & Summer Conference*, pp. 146-151, 2006.
41. D. Astrain, J.G. Vian and J. Albizua, "Computational model for refrigerators based on Peltier effect application", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 3149-3162, 2005.
42. S.H. Lee, S.U. Gong, J.H. Kim and J.S. Kim, "A Study on the Cooling Performance of Cosmetic Refrigerator using Thermoelectric module and Pulsating Heat Pipe", *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2006 Autumn Conference*, pp. 140-145, 2006.
43. Q. Wan and A.V. Kuznetsov, "Numerical Study of the Efficiency of Acoustic Streaming for Enhancing Heat Transfer between Two Parallel Beams", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 70, pp. 89-114, 2003.

44. Q. Wan, T. Wu, J. Chastain, W.L. Roberts, A.V. Kuznetsov and P.I. Ro, "Forced Convective Cooling via Acoustic Streaming in a Narrow Channel Established by a Vibrating Piezoelectric Bimorph", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 74, pp. 195-206, 2005.
45. H.Y. Lee, J.H. Kang, S.J. Lim and S.W. Lee, "The Cooling System for Computer using Thermoelectric Module", *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering 2009 Conference*, pp. 27-28, 2009.
46. S. Masahiro, "Heat Transfer", Korean edition, Sigma press, Seoul, Korea, 1995.
47. S.T. Ro and J.S. Seo, "Principles of Thermoelectric Refrigeration and System Design", *Korean Journal of Refrigeration and Air Conditioning*, Vol. 19, No. 3, pp. 135-145, 1990.
48. K.S. Park, Y.J. Song, H.J. Im, S.Y. Jang, K.S. Lee, J. Jeong and D.H. Shin, " A study on a precision temperature control unit using thermoelectric module", *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2007 Spring Conference*, pp. 1049-1053, 2007.
49. J.S. Park and C.S. Huh, "A Study on Improve Efficiency and Cooling Performance of the LED lighting using a Seebeck Effect of the Thermoelectric element", *Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers 2012 Semmer Conference*, pp. 1225-1227, 2012.
50. S.D. Yeo, K.R. Lee, H.C. Kyu, T.H. Kim and S.K. Kim, "Study on the Energy Recycling of a Charging/Discharging System using Peltier Effects", *Proceedings of*

the Korean Institute of Electronic Communication Sciences Engineers 2011 Autumn Conference, pp. 492-494, 2011.

51. 이상렬, "나노기술 열전소자의 발전", 기계저널, Vol. 44, No. 12, pp. 26-27, 2004.
52. H.J. Lee, H.S. Park, and C.J. Kim, "Numerical Analysis on the Cooling of Laser Diode Package with Thermoelectric Cooler", Transactions of the KSME B, pp. 309-315, 1999.
53. Sonntag, Borgnakke and Van Wylen, "Fundamentals of Thermodynamics", 6th Edition, WILEY, USA, pp. 7-8, pp. 214-220, 2003.
54. J.H. Shin, H.S. Han, Y.H. Kim, S.Y. Kim and J.M Hyun, "Cooling Performance of Thermoelectric Module with Air-Cooled Heat Exchanger Fins", Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 22, No. 3, pp. 171-179, 2010.
55. Lineykin. S. and Ben-Taakov. S, "Userfriendly and intuitive graphical approach to the design of the thermoelectric cooling system", International Journal of Refrigeration, Vol. 30, pp. 798-804, 2007.
56. Lineykin. S. and Ben-Taakov. S, "Modeling and analysis of thermoelectric modules", IEEE Transactions of Industry Application, Vol. 43, No. 2, pp. 505-512, 2007.
57. "THERMOELECTRIC HANDBOOK", MELCOR, Trenton, USA, 2007.

58. M.Y. Choi and W.T. Kim. "Infrared Thermography Testing", Node Media, 2012
59. D.J. Yang, "Analysis on the Temperature Distribution of Tire Tread Part in a Running Infrared Thermal Vision Camera", M.S. Thesis, Chosun Univeristy, 2002.
60. "THERMOELECTRIC MODULE CATALOG", ACETEC Co., Ltd, Deagu, Korea, 2004.
61. K.U. Park, "A Study on Thermal Deformation Analysis of Aluminum Casting Tire Mold", Ph.D. Thesis, Chosun University, 2008.
62. S. C. Son, "Thermal Stress Analysis of Coated Materials Using the Finite Element Method, Master Thesis, Ulsan University, 1994.

감사의 글

박사학위과정을 마무리하고 새로운 시작의 문턱에 서서 돌이켜 생각해 보니, 그동안 저를 위해 많은 격려와 조언을 해주시고 도움을 주신 분들이 있었기에 학위과정을 잘 마칠 수 있었습니다. 이 글을 통해 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 항상 믿음과 사랑으로 용기를 주시고 올바른 길로 갈 수 있게 인도해 주시는 아버지, 어머니께 머리 숙여 진심으로 감사의 인사를 올립니다. 부족한 사위이지만 항상 응원과 격려로 용기와 자신감을 주신 장모님께도 진심으로 감사의 인사를 올립니다.

아낌없는 헌신과 내조로 항상 큰 힘이 되어준 아내 정은우에게 고맙다는 말과 함께 사랑한다는 말을 전합니다. 바쁘다는 이유로 잘 놀아주지도 못했지만, 예쁘고 건강하게 잘 자라고 있는 우리 공주들 수인이와 수형이에게도 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다. 얼마 전에 결혼한 처제 정수아와 이재호씨에게도 이 글을 빌어 다시 한 번 결혼과 임신 축하와 감사의 말을 전하고, 동생 한솔이에게 잘 챙겨주지 못한 미안함과 함께 부모님과 가족들을 항상 잘 챙기는 마음에 고맙다는 말을 전합니다.

1999년에 스승과 제자로 처음 만나 지금까지 짧지 않은 시간동안 학문적인 지식뿐만 아니라 사람으로서 지켜야할 도리를 깨우칠 수 있게 지도해 주시며 보살피 주신 오을권 교수님께 머리 숙여 감사의 인사를 드립니다.

부족하고 오류가 많았던 학위논문이 보다 더 충실한 논문이 될 수 있도록 날카로운 지적과 진심어린 조언을 아끼지 않으신 기계공학과 홍명석 교수님, 메카트로닉스공학과 유영태 교수님, 명지대학교 차경옥 교수님, 경희대학교 김상녕 교수님도 깊은 감사를 드립니다.

석사과정부터 지금까지 학문적 기초를 마련해 주시고 격려와 조언을 아끼지 않고 지도해 주신 심재기 교수님, 이동기 교수님, 김재열 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 학위과정동안 BK21-첨단소재부품 금형기술 인력양성 사업단의 다양한 산업을 통해 본 학위 논문이 완성될 수 있도록 연구수행에 도움을 주신 기계설계공학과 양인영 교수님께 감사의 인사를 드립니다.

학위과정동안 강의경험을 쌓을 수 있도록 자리를 마련해 주시고 격려와 조언을 아끼지 않으신 전남도립대학교 김종명 교수님과 김홍배 교수님께 감사드리며, 각별한 관심과 격려로 항상 많은 도움을 주신 조선이공대학교 최병희 교수님과 김창오 박사님 그리고 신호준 박사님께도 감사의 인사를 올립니다.

졸업 후에도 항상 관심과 격려를 아끼지 않으신 열공학실험실의 유재오 선배님, 박근욱 교수님, 서동표 박사님, 강원중 선배님, 윤정환 선배님, 임태훈 선배님 그리고 항상

가까운 곳에서 힘들고 어려운 일이 있을 때마다 큰 도움을 주시고 이끌어주신 조선대학교 박설현 교수님과 양호동 선배님께 이 글을 빌어 진심으로 감사드립니다. 또한, 동갑내기 친구이면서 한편으로는 믿음직한 선배인 김용범, 김영선, 윤희성 박사에게도 감사의 말을 전합니다.

아울러, 학위과정 동안 학문적 교류와 함께 많은 도움을 주신 동강대학교 양용준 교수님, 첨단부품소재공학과 황우채 박사, 최승현 박사, 김형석 박사, 최주호, 곽남수, 기계공학과 손재경에게도 진심으로 감사드립니다. 이 외에 일일이 명명할 수 없지만 저를 지켜봐 주시고 격려해 주신 모든 분들께 감사의 인사를 드립니다.

2014년 7월
최제세 올림