creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000236611

2008년8월 박사학위논문 압전소자의 진동을 받는 유체의 열전달 특성에 관한 연구 양 호 동

2008년 8월
박사학위논문

압전소자의 진동을 받는 유체의 열전달 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

양 호 동

압전소자의 진동을 받는 유체의 열전달 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Heat Transfer in a Fluid by Piezoelectric Vibration

2008년 8월 25일

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

양 호 동

압전소자의 진동을 받는 유체의 열전달 특성에 관한 연구

지도교수 오 율 권

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2008년 4월

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

양 호 동

양호동의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	김 진 홍	인
위 원	조선대학교 교수	김 병 철	인
위 원	조선대학교 교수	홍 명 석	인
위 원	조선대학교 교수	정 낙 규	인
위 원	조선대학교 교수	오 율 권	인

2008년 6월

조선대학교 대학원

목 차

제 1 장 서 론 ·····

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구동향 ····· 3

1.3 연구목적 및 내용 ·····

제 2 장 이 론 해 석 ·····

2.1 상변화 열전달 해석 ·····

2.1.1 해석모델 및 지배방정식 ·····

2.1.2 열전달계수 ·····

2.2 열전소자의 열전현상 해석 ·····

2.3 PIV 측정 이론 ····· 23

2.4 열화상카메라 측정 이론 ·····

2.5 결합형 유한요소-경계요소 해석 ·····

2.5.1 진동평판에 대한 유한요소 해석 ····· 29

2.5.2 음향계에 대한 경계요소 해석 ····· 3

2.5.3 구조-음향 연성해석을 위한 행렬방정식 해석 ····· 35

제 3 장 실험장치 구성 및 방법 ·····

3.1 상변화 열전달 실험 ·····

3.1.1 가열을 위한 실험장치 ·····

3.1.2 초음파 진동장치 ·····

3.1.3 가시화 실험장치 ·····

3.1.4 실험방법 및 절차 ·····

3.1.5 수치해석 방법 및 절차 ·····

3.2 열전냉각장치의 열전달 실험 ·····
3.2.1 열전냉각 실험장치 ·····
3.2.2 압전 액츄에이터 장치 ·····
3.2.3 가시화 실험장치 ·····
3.2.4 실험방법 및 절차 ·····

제 4 장 실험결과 및 고찰 ·····
4.1 상변화 열전달 실험결과 ·····
4.1.1 용융과정 동안의 온도분포 측정결과 ····· 61
4.1.2 열전달계수 측정결과 ·····
4.1.3 가시화 측정결과 ·····
4.1.4 음압분포 계산 및 열전달 향상결과 ····· 79
4.2 열전냉각장치의 열전달 실험결과 ····· 8
4.2.1 냉각과정 동안의 온도분포 측정결과 ····· 88
4.2.2 가시화 측정결과 ·····

제 5 장 결 론 ·····

참 고 문 헌 ·····3·····

LIST OF FIGURES

Fig. 1 2-D analysis model for melting process of PCM ····· 11

Fig. 2 Schematic diagram of flow and heat transfer at system boundary ····· 14

Fig. 3 An approximate dimensions of heat transfer coefficient ····· 15

Fig. 4 Measurement method of heat transfer coefficient ····· 17

Fig. 5 Schematic diagram of thermoelectric module (peltier module) ····· 20

Fig. 6 Schematic diagram of the image analysis by PIV ····· 23

Fig. 7 Schematic diagram of Cross-Correlation Function (CCF) ····· 25

Fig. 8 Atmospheric transmission over 1 nautical mile ····· 26

Fig. 9 Radiation patterns of the general measurement condition ····· 27

Fig.10 Principle of infrared thermal camera ····· 28

Fig.11 Schematic diagram of phase change experimental set-up ····· 41

Fig.12 Sectional view of a plate heater and heating region ····· 42

Fig.13 Schematic diagram of ultrasonic transducers ····· 44

Fig.14 Schematic diagram of experimental set-up for visualization in PCM ····· 45

Fig.15 Schematic diagram of test section showing the position of thermocouples and ultrasonic transducers ····· 47

Fig.16 Photograph the insulation process of a thermocouple ····· 48

Fig.17 Wave form of 40kHz measured at a frequency generator ····· 49

Fig.18 Finite element model for a vibrating plate ····· 51

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.19 Fixed boundary condition of boundary element model ····· 51

Fig.20 Schematic diagram of thermoelectric cooling experimental set-up ····· 53

Fig.21 Schematic diagram of thermoelectric module ····· 54

Fig.22 Schematic diagram of thermoelectric cooling system ····· 56

Fig.23 Schematic diagram of piezoelectric actuator ····· 57

Fig.24 Schematic diagram of experimental set-up for visualization in a thermoelectric cooling system ····· 58

Fig.25 Schematic diagram of temperature measurement points in cold region ····· 60

Fig.26 Variations of heater surface temperature over time for each heat flux ····· 62

Fig.27 Temperature variation in PCM in sequence of time for dimensionless coordinate, X and Y under the heat flux, q" = 11517.43 W/m^2 ····· 64

Fig.28 Temperature variation in PCM in sequence of time for dimensionless coordinate, X and Y under the heat flux, q" = 6436.21 W/m^2 ····· 66

Fig.29 Melting shape history at F_oSte^* = ①$0.3\times10^5$, ②$0.6\times10^5$, ③$0.9\times10^5$, ④$1.2\times10^5$, ⑤$1.5\times10^5$, ⑥$1.8\times10^5$ under the heat flux conditions ····· 69

Fig.30 Nusselt number($Nu/Ra^{*0.25}$) variations on the heater surface with F_oSte^* ····· 71

Fig.31 Nusselt number variation on the heater surface with F_oSte^* during conduction region under the heat flux conditions ····· 74

Fig.32 Nusselt number variation against normalized time (τ) under the heat flux conditions ····· 74

Fig.33 Two dimensional velocity profiles measured using the PIV ····· 76

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.34 Two dimensional velocity profiles by changed output power level measured using the PIV ····· 77

Fig.35 Comparison of thermally-oscillating flow fields in the liquid paraffin by infrared thermal camera ····· 78

Fig.36 Visualization of displacement variations of a vibrating plate ····· 80

Fig.37 Visualization of stress distributions at the top view ····· 81

Fig.38 Visualization of stress distributions at the bottom view ····· 82

Fig.39 Visualization of acoustic pressure distribution in the liquid paraffin induced by ultrasonic vibrations ····· 83

Fig.40 Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer augmentation in case of sound velocity, 1,000 m/sec ····· 86

Fig.41 Profiles of surface temperature on hot & cold side of thermoelectric module at dimensionless coordinate, Z = 0.5 ····· 90

Fig.42 Profiles of surface temperature on cold side of thermoelectric module at dimensionless coordinate, X ····· 91

Fig.43 Profiles of temperature variation on hot side & cold region without piezoelectric actuator ····· 93

Fig.44 Profiles of temperature variation on hot side & cold region with piezoelectric actuator ····· 95

Fig.45 Visualization of temperature distributions on cold side by infrared thermal camera ····· 97

Fig.46 Visualization of flow phenomena in the test section only operating thermoelectric cooling device ····· 99

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.47 Visualization of flow phenomena in the test section only operating piezoelectric actuator ····· 99

Fig.48 Visualization of flow phenomena in the test section added particle only operating piezoelectric actuator ····· 101

Fig.49 Visualization of flow phenomena in the test section operating thermoelectric cooling device and piezoelectric actuator ····· 101

LIST OF TABLES

Table 1. Thermophysical properties of paraffin (n-Octadecane) ····· 40

Table 2. Performance specifications of thermoelectric module ····· 55

Table 3. Performance specifications of piezoelectric actuator ····· 57

Table 4. Bulk modulus of elasticity of n-Octadecane ····· 84

NOMENCLATURE

$\{\bar{a}\}$: Laplace transform of displacement

$\{a\}_o$: Initial displacement value

$\{\dot{a}\}_o$: Initial velocity value

A : Area

A_m : Amplitude

C or c : Propagation velocity of sound wave

E : Emission rate

E_ρ : Energy of unit volume

E_i : Moving Energy on vertical area

C_P : Specific heat of paraffin

[C] : Breaking constant matrix

f : Frequency

Fo : Fourier number

g : Gravity

Gr : Grashof number

h : Heat transfer coefficient

H : Height of solid paraffin (Characteristic height)

I : Electric current or Current intensity

K : Thermal conductivity

K_i : Kinetic energy

[K] : Stiffness matrix

P_i : Potential energy

P · E : Composition energy

NOMENCLATURE (Continued)

m : Mass

[M] : Mass matrix

[N] : Distribution matrix

Nu : Nusselt number

p : Pressure or Power

$\{\bar{p}\}$: Real force of each node in finite element

Pr : Prandtl number

$\{\bar{q}\}$: Laplace transform of applying vibration force

q" : Heat flux

Q : Amount of heat

r : Emission rate of atmosphere

R : Resistance

Ra : Rayleigh number

Ra* : Modified Rayleigh number

Ste : Stefan number

Ste* : Modified Stefan number

t : Time

S : Correlation coefficient of CCD camera

s : Laplace transform variable

T : Temperature

V : Voltage

u, v : Velocity in x, y direction

U, V : Dimensionless velocity x, y direction

NOMENCLATURE (Continued)

x, y : coordinate

X, Y : Dimensionless x, y coordinates

z : A point of solid-liquid interface

Greeks

α : Thermal diffusivity of liquid phase

α' : Seebeck coefficient

β : Thermal expansion coefficient

γ : Correlation point

δ : Thickness of thermal boundary

ε : Radiation

Δh_f : Latent of fusion

Γ : Dimensionless location of solid-liquid interface

θ : Dimensionless temperature

λ : Thermal conductivity of fluid

ν : Kinematic viscosity

Π : Peltier coefficient

ρ : Density

τ : Dimensionless time on expression of melting ratio

ψ : Stream function

Ψ : Dimensionless stream function

ω : Vorticity

Ω : Dimensionless vorticity

NOMENCLATURE (Continued)

Subscript

C	:	Thermoelectric module
f	:	Fusion
F	:	Fourier
h	:	Heater surface
i	:	Solid-liquid interface
J	:	Joule
l	:	Liquid
m	:	Mean
o	:	Without ultrasonic vibration
P	:	Peltier
s	:	Solid, Surface
t	:	temperature
T	:	Thomson
aug	:	Augmentation of Heat transfer coefficient
atm	:	Atmosphere temperature
amb	:	Boundary temperature
∞	:	Selected location of liquid

ABSTRACT

A Study on Characteristics of Heat Transfer in a Fluid by Piezoelectric Vibration

Yang, Ho-Dong
Advisor: Prof. Oh, Yool-Kwon Ph.D.
Dept. of Precision Mechanical Engineering
Graduate School of Chosun University

The present study was investigated on characteristics of heat transfer when the piezoelectric vibration was applied in a fluid. This study was to investigate the characteristics of heat transfer in a medium for the cases: one without piezoelectric vibration and the other with piezoelectric vibration. Also, in order to find out the effect on enhancement of heat transfer, ultrasonic vibrator and piezoelectric actuator which consisted of the piezoelectric module was used in a phase change material (PCM) and an air cooling region in thermoelectric cooling system, respectively. In this study, the heat flow was measured in the absence of and in the presence of acoustic streaming. The streaming created by ultrasonic vibrations was visually by a particle image velocimetry (PIV), an infrared thermal camera and a CCD camera.

The experimental results revealed that convection state was activated with ultrasonic vibration and the melting of a PCM was accelerated from the dimensionless time, $F_oSte^*=0.9\times10^5$ and 1.2×10^5 when the heat flux $q''=11517.43W/m^2$

and 6436.21W/m^2 was applied, respectively. Also, the acoustic streaming created by ultrasonic vibration could accelerate the melting process of a PCM as much as 2.5 times. In addition, the profiles of the augmentation ratio of heat transfer coefficient were experimentally measured and were compared with those of the acoustic pressure obtained by numerical prediction using a coupled finite element-boundary element method (Coupled FE-BEM). The acoustic pressure induced by acoustic streaming in a medium has improved the enhancement of heat transfer about 1.5 times. Also, when the piezoelectric actuator was applied to the heat transfer process of thermoelectric cooling system, acoustic streaming was occurred in an air cooling region. And, the temperature distributions in an air cooling region were uniformly maintained about 15℃ ± 0.5℃ because the natural convection flow was changed to the locally forced convection flow happened by acoustic streaming. In the end, the results clearly show that the enhancement of heat transfer is closely related to variations in the acoustic pressure and the acoustic streaming is one of the prime effects to enhance the convection heat transfer.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

밀폐된 공간이나 용기 또는 관로 등에서 일어나는 자연대류 유동 및 열전달 현상은 일상생활뿐만 아니라 공학적인 측면에서도 다양한 분야에 걸쳐 많은 응용이 이루어지고 있다. 예를 들어, 기계설비나 건축공간내의 에너지 이동현상, 축열조 및 태양열 집열기 등의 설계, 원자력 발전소의 고효율 발전, 프로세스용 열교환기, 항공 우주 시스템 그리고 전자장치의 냉각 등이 이에 속하며, 공학의 각 분야에서 나타나는 복잡한 물리적 현상을 이해하기 위하여 광범위한 연구대상이 되어 왔고, 지금까지 실험적 또는 수치적으로 많은 연구가 수행되고 있다[1].

그 중 상변화를 동반하는 열전달의 경우, 고-액상이 존재하는 상변화 열전달이나 비등, 응축에 의한 열전달은 용융이나 응고에 의해 자유표면이 이동하는 유동현상이나 비등이 발생할 때 기포가 올라가고 응축시에 액적이 내려가면서 유체유동현상이 발생하기 때문에, 이것도 역시 대류 열전달 문제로 접근할 수 있다. 상변화란, 열전달 과정에서 물질의 상태가 본래의 상태에서 다른 상태로 변화되는 것을 말하는 것으로, 대다수의 상변화 열전달 문제는 전도와 대류의 현상을 포함하고 있다. 상변화의 대표적인 예로는 용융과 응고를 들 수 있지만 이 외에도 액체의 비등, 기체의 응축, 금속 결정구조의 변화나 자화 현상 등도 상변화에 포함되며, 상변화 문제의 대표적인 응용분야로는 잠열을 이용한 에너지 저장분야나 주조공정분야, 플라스틱 금형의 사출분야, 금속의 용접 및 제련분야 등이 이에 속한다. 특히, 상변화 물질(phase change material, PCM)의 잠열을 이용한 에너지 저장 기술은 태양열, 심야전기 등의 사용이 증가함에 따라 각광받는 연구 분야로 응용이 활발하게 이루어지고 있다.

또한, 2000년 이후 급속하게 성장, 발전하고 있는 전자부품 산업은 최근에 들어 IT산업을 비롯한 각종 산업분야에서 융합 발전을 추구하고 있으며, 초 소형화 및 고 집적화를 요구하고 있는 각종 시스템에 적용하기 위한 연구 및 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 전자부품의 소형화 및 집적화로 인해 전자장치에서 발생하는 열원을 제어하거나 냉각시키기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근에 들어 전류의 극성에 따라 열을 흡수하거나 방출하는 열전소자(thermoelectric module)를 이용한 전자냉각방식은 기존의 프레온 가스나 암모니아와 같은 냉매를 압축기에 의해 강제 순환시켜 냉각하는 증기압축식 냉각방식에 비해 냉매순환을 위한 기계적인 구동장치인 압축기와 같은 부품을 필요로 하지 않기 때문에 구성장치의 마모와 소음이 거의 없고, 냉매의 폐기처분에 따라 생기는 환경오염을 방지할 수 있으며, 국부적 냉각을 실시할 경우 매우 효과적이다. 이러한 냉각방식은 열전소자의 가격이 비싸고, 냉각성능이 다소 약하다는 단점이 있지만, 열전소자의 냉각용량은 직류전원을 사용하는 열전소자의 입력전압 조절만으로도 제어가 가능하기 때문에 정밀온도제어가 가능하고, 중력의 영향을 받지 않기 때문에 장소의 구애를 받지 않으며, 저소음, 소형화 등의 장점이 있다[2,3]. 이러한 장점으로 열전소자 냉각방식의 응용분야는 가전제품을 비롯한 항공우주분야, 의료 및 군사용 장비, 정밀계측 및 각종 시스템 등 산업분야 전반에 걸쳐 다양하다.

이 외에도 대류 열전달 현상을 이용한 응용 및 연구는 일상생활에서부터 산업분야에 이르기까지 매우 폭넓게 다뤄지고 있으며, 이러한 대류 열전달 해석 및 적용과 함께 끊임없이 연구, 개발되어 산업에 응용하고자 하는 것이 바로 열전달 촉진 기술을 통한 열전달 향상을 추구하는 것이다.

열전달을 향상시키기 위한 기술은 1950년대 중반 이후, 고효율의 발전 및 프로세스용 열교환기에 대한 수요의 증가와 함께 상업화를 위한 원자력 발전의 출현 그리고 항공 우주 시스템 등의 요구에 대응하기 위해 개발이 시작되어, 1970년대 석유 파동에 따른 대체 에너지 시스템 및 열회수를 위한 다양한 분야에서 급속한 발전이 이루어졌으며, 다양한 방법들이 소개되고 연구가 진행되어 왔다[4].

일반적으로 열전달을 향상시키기 위한 방법들로는 유동장에 격판을 설치하여 유동장의 형상을 변경하거나 열전달 표면을 증가시키는 방법과 유동장에 유체의 농도 차에 의해 부력장을 형성하거나 촉진제를 첨가하는 방법 등의 수동적인 방법과 유동장에 전기장이나 자기장을 형성하거나 표면진동 및 초음파를 이용하여 음장을 형성하는 등 외부의 힘에 의한 능동적인 방법으로 나눌 수 있다[5].

이러한 열전달 향상을 위한 방법들 가운데, 최근 능동적인 열전달 촉진 기술의 하나로 압전소자(piezoelectric module)를 이용한 초음파 진동자(ultrasonic vibrator)나 액츄에이터(actuator)를 사용하여 유동장에 음장을 형성하고 열전달이 증가되는 원인을 규명하는 등의 연구가 보고되고 있고, 실제로 일상생활 및 공학적인 측면에서도 그 응용이 활발하게 이루어지고 있는 추세이다.

1.2 연구동향

밀폐공간 또는 용기, 관로 등에서 상변화 열전달에 관한 연구는 실험적 방법과 수치해석적 방법을 통해 많은 연구가 진행되어 왔다.

평판이나 사각용기 내에서 상변화 해석은 실험적 해석방법의 가장 일반적인 경우로 평판의 형상이나 가열조건에 따라 상이한 문제가 된다. 용기 내부에서의 용융과정은 뜨거운 벽면에 의해서 가열된 액상이 자연대류로 인해 상부로 이동하게 되고, 응고과정은 차가운 벽에 의해서 냉각된 액상이 하부로 이동하며 열전달이 이루어지게 된다. 연구의 주된 내용은 수직 벽면을 가열하거나 냉각할 경우[6-9]와 상부나 하부의 벽면을 가열하거나 냉각하는 경우[10-13]에서의 열전달 해석이다. 그리고 용융과정에서의 열전달 현상을 지배적인 전달 방식에 의해 구분하고 열전달 상관관계식을 구하는 방법을 제시한 연구내용[14]도 있다.

원관 외부로의 상변화 현상의 경우는 상변화 물질의 내부에 위치하는 원관을 가열하거나 냉각할 때 관벽으로부터 외부로의 열전달 현상을 다룬다. 따라서 관 내부에 한정되어 일어나는 상변화와는 차이가 있다. 이와 관련된 연구로는 관벽을 가열

하여 상변화 물질이 용융될 때의 열전달[15-18]과 관벽을 냉각하여 관벽으로부터 외부로 응고가 진행될 때의 열전달[19,20]을 예로 들 수 있다.

수직으로 세운 원관 내에서의 용융 및 응고과정은 관의 상부에서 경계조건 설정이 어렵기 때문에 이론적인 해석이 행해진 경우는 거의 없고 대부분의 해석은 실험에 의존하여 진행되어 왔다. Sparrow와 Broadbent[21]가 수직원관 내에서 용융을 실험적으로 해석한 이후, 응고에 관한 연구[22]가 진행되었다. 응고과정에서 초기의 액상온도는 응고속도에 큰 영향을 미치지 못하고 관벽의 냉각온도가 응고속도를 좌우하는 것으로 밝혀졌다.

수평관 내에서의 용융과 응고는 최근의 여러 실험적, 이론적 연구가 입증하는 바와 같이 수직관에 비하여 열전달 속도가 빠르고 제작이 수월하기 때문에 관심의 대상이 되고 있다. 이런 연구의 대부분은 고-액 상변화를 이용한 축열과 정의해석에 목적을 두고 있다. 이에 대한 연구는 Saitoh와 Hirose[23]가 n-Octadecane과 물을 대상으로 하여 액상에서의 자연대류에 의한 유동장과 온도분포를 이론적으로 해석한 후, Reiger 등[24]이 n-Octadecane의 용융을 대상으로 하여 이론과 실험적 연구를 병행하여 해석하였다. 그 외에 Ho 등[25]과 Reiger 등[26]이 용융과정에 대하여 이론적, 실험적인 연구를 수행한 바 있다.

구의 내부에서 상변화 물질이 용융할 때에는 고상의 밀도와 액상의 밀도 차에 의해서 상의 이동이 수반된다. 그리고 응고가 일어날 때에는 관벽으로부터 고상층이 형성되므로 용융과 같이 복잡한 현상은 없다. 따라서 이 분야의 연구는 주로 응고과정[27-29]에 대하여 수행되었고, Moore와 Bayzitoglu[30]는 용융이 진행됨에 따라 고상이 가라앉는 경우에 대하여 구의 중심을 원점으로 잡고 용융할 때까지의 과정을 해석하였으며, 이동하는 구에 의한 외부로의 용융에 관한 연구[31]도 있다.

이에 반해, 상변화 과정에 대한 수치해석을 이용한 방법은 대부분 사각용기[32,33]나 수평원관[34,35], 구[36] 내부에서의 열전달 과정 해석에 국한되어 있고, 열전도 모델[37]에 의한 해석과 엔탈피 모델[38]에 의한 해석이 일반적으로 사용되고 있다. 순수 열전도 모델은 상변화를 해석할 때 사용되는 가장 간단한 방법이지만 수치해석적으로 해를 구할 수 있는 경우가 극히 일부분에 지나지 않는다. 따라

서 수치해나 근사해를 이용하여 접근을 시도하고 있고, 최근에도 응고과정을 해석하거나 경계조건이 복잡한 상변화 과정을 해석할 때 이 모델이 사용되고 있다. 그러나 이 모델은 자연대류의 영향을 고려하지 않으므로 상변화 과정의 해석에 사용할 경우에는 신중하게 접근해야 한다.

한편, 액상과 고상에서의 열전달 현상은 각기 다른 방식으로 일어나지만 고-액 경계면을 통해 서로 연관성을 갖고 있으므로 이 두 부분에 대한 해석이 동시에 수행되어야 한다. 용융이 진행되면 자연대류로 인하여 용기의 하부보다 상부에서 용융이 빠르게 진행되므로 용기하부로부터의 높이에 따라 고-액 경계면의 위치도 달라진다. 따라서 많은 연구자들[39-42]은 이 시점을 기준으로 이전까지는 고상과 액상 두 부분으로 나누고 이후부터는 고상이 존재하지 않는 액상으로 구분지어 계산을 수행하였으며, 지배방정식을 유한차분법(finite difference method, FDM)으로 전개하여 시간에 대한 음함수로 표시하고 반복법에 의해 수렴시키는 방법과 두 영역에 대한 유한요소법(finite element method, FEM)이 주로 사용되고 있다.

이 외에도 냉동공조 분야에서 환경오염 방지 및 에너지 절약 차원에서 대체냉매를 적용하기 위한 열교환기의 새로운 설계기술 및 고성능 열교환기의 개발에 대한 연구와 함께 열교환기의 소형, 경량화를 위한 상변화 열전달에 관한 연구들[43-47]이 진행되었다. 또한, 컴퓨터 CPU, 모바일 정보통신기기 및 고성능 CCD의 비약적인 발전에 따른 전자 장비의 냉각을 위해서 미세관이나 마이크로채널 내에서의 상변화 열전달 현상에 큰 관심을 갖게 되었고 이처럼 작은 공간에서의 상변화 및 열전달 특성을 정확하게 예측하기 위한 필요성의 제안[48]과 함께 많은 연구들[49-53]이 수행되어져 왔다.

이러한 선행연구들을 토대로, 최근에 들어 전자 제품의 초 소형화 및 고성능 다기능 제품의 개발 등으로 인해 국부 공간에서의 집중적인 열전달의 필요성은 점차 증대되고 있으며 이로 인하여 고효율을 요하는 초소형 전자장비나 전자부품의 냉각을 위해 열전소자의 사용이 증가하고 있고 이에 대한 연구도 확산되고 있는 추세이다.

열전소자의 하나로 사용되고 있는 펠티어소자(peltier module)는 두 개의 서로 다른 도체의 양끝을 접합한 다음, 회로에 직류전압을 인가하면 한쪽 면에서는 흡열, 다른 한쪽 면에서는 발열이 일어나는 일종의 히트펌핑 현상이 일어나는 펠티어 효과(peltier effect)를 이용한 소자로 높은 신뢰성이 요구되는 군사용이나 우주항공 분야에만 적용되다가 최근에 관심이 높아져 광통신 모듈 및 전기, 전자, 통신 및 정밀기계의 국소부위 냉각 등에 광범위하게 연구되고 있다[54-56].

최근에는 Solomon[57]에 의해서 열전모듈의 재료와 형상, 구조 등을 변화시킴으로써 냉동기의 성능을 향상시키는 연구가 수행되었고, Miner and Majumder[58]는 과도전류 열전효과를 이용하여 열전모듈의 성능을 향상시킨 바 있다. 또한, Huang 등[59]은 열전모듈의 고온측에 방열효과가 충분히 이루어져야만 성능을 개선시킬 수 있다는 점을 이용하여, 팬을 설치하고 공기로 열전모듈의 방열부를 냉각시켜 줌으로써 냉동기의 성능을 개선하기도 하였고, Attey[60]는 효과적인 Heat Sink의 방열을 위해 열전달매체로서 공기 대신 액체를 사용하여 성능을 향상시키는 연구를 수행하였다.

한편, Yamanashi[61]는 열전냉각시스템에서 Heat Sink의 열저항이 성능지수와 냉각성능에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Kang 등[62]은 공기와 냉각수를 동시에 사용하는 증발냉각방법을 이용하는 실험을 수행하여 열전모듈이 소형 에어컨 시스템의 성능에 미치는 영향을 규명하기도 하였다.

이 외에도, Astrain 등[63]은 상변화에 의한 발열부의 냉각방식을 택하여 방열효과를 높일 수 있다고 보고한 바 있고, Yoo 등[64]은 열전소자 및 열전냉각장치에 관한 이론해석과 실험을 수행하여 최대 성적계수와 온도특성의 관계를 규명한 바 있으며, Lee와 Kim[65]은 마이크로 열전냉각기의 열성능을 예측하기 위해 열전소자의 두께를 변화시켜 수치해석을 통한 3차원 해석을 수행하기도 하였다.

이러한 열전소자를 이용한 연구들은 냉각시스템의 성능향상을 위해 시스템에 적용하고 제품개발을 위하여 활발하게 연구를 수행하였다. Guler와 Ahiska[66]는 10℃ 이내의 온도를 유지하며 혈액이나 백신 등을 저장할 수 있는 의료용 냉장고에 적용한 바 있고, Jin 등[67]은 음료수 등을 저장할 수 있는 쇼케이스를 제작하는데 활

용하기도 하였다. 또한, Lee 등[68]은 고온측의 발열량을 제어하기 위해 진동형 히트파이프(pulsating heat pipe, PHP)를 열확산기로 적용하여 화장품 냉장고를 설계하고 냉각성능실험을 수행하였으며, Kim 등[69]은 열전소자를 이용한 화장품 냉장고에서 일정한 냉각온도를 유지하기 위해 고온부 방열팬의 속도를 변화시키는 연구를 수행하였다.

이와 같은 선행연구에서 제안한 열전달 현상을 해석하고 규명하는 연구는 점차적으로 열전달을 촉진시키고 열전달을 보다 더 향상시키기 위한 연구로 그 필요성이 증대되고 있다. 또한, 열전달 촉진을 위한 기술적 대안과 함께 그 응용이 활발하게 이루어지고 있으며, 이러한 열전달을 촉진시킬 수 있는 기술적 대안의 하나로 압전소자를 이용한 초음파 진동자나 액츄에이터를 사용하여 유동장내에 음장을 형성하고 열전달을 향상시키기 위한 연구가 수행되어 왔다.

일반적으로, 음장에 의한 입자의 맥동운동은 고체면 가까이에 정상류인 음향흐름(acoustic streaming)을 유발시키는데, 이는 Schliting[70]에 의하여 수학적으로 처음 해석되었다. Fand 등[71]은 등온 음장에 의한 국소 열전달율을 측정한 결과, 수평으로 음장이 가해질 때 원통의 상부와 하부에서 열전달이 크게 증가하고 양 측면에서 오히려 감소하는 것을 발견하였고, 유동 가시화를 통하여 상부에서 맥동하는 와류운동의 발생을 관측하였으며, 이것으로 열전달이 증가하는 원인을 설명하였다. 그리고 Iida 등[72]은 수중에 초음파 진동을 가진하였을 때 형성되는 음장이 열전달을 증가시킬 수 있다고 보고한 바 있다. 또한, Nomula[73]는 초음파 진동을 이용하여 내부 유동장 교란이 유동장 및 열전달에 미치는 실험적 연구를 수행하여, 미소기포 파열에 의해 열전달이 증가되는 것을 설명하였다. 그러나 상변화 열전달에서의 적용은 고-액상이 존재하는 경우나 비등 현상이 발생하는 경우에 있어 대부분의 연구가 해석 대상매질이 상변화 물질이냐 유체냐에 상관없이 특정 가열조건에서 존재하는 액상영역의 대류 열전달 해석에 초점이 맞춰져 있고, 초음파 진동을 통해 제안된 다양한 열전달 증대 요인들은 실험적 근거가 희박한 추론에 의한 것이고, 열전달이 촉진되는 원인을 명확히 규명하고자 하는 연구는 극히 소수에 지나지 않고

있다.

아울러, 전기와 기계의 상호변환 작용을 하는 압전세라믹에 전기에너지를 가하여 기계적 진동이 발생하도록 하는 압전 액츄에이터를 이용한 연구도 꾸준히 진행되고 있으며, 그 응용분야가 매우 넓어서 구조물의 형상 및 자세 제어, 진동 제어 및 압전 진단 등과 같은 분야에서 널리 사용되고 있다[74]. 특히, 압전소자를 이용한 유체의 유동현상 및 냉각장치의 성능 개선을 위한 연구는, 압전소자를 이용한 마이크로 펌프의 유동특성에 관한 수치해석적 연구[75]나 압전 액츄에이터를 이용한 구주위의 유동제어에 관한 연구[76]와 전자석 액츄에이터를 이용한 익형 후류의 제어를 위한 연구[77] 등이 보고된 바 있고, 국내 대기업으로부터 압전소자를 이용한 슬림형 에어컨의 개발이 진행되면서 풍량조절을 위한 액츄에이터모듈에 피에조 압전소자가 적용되는 사례가 보고된 바 있다. 이 외에도 초음파 진동이나 압전 액츄에이터를 사용한 압전소자의 진동효과는 최근에 발열량이 큰 마이크로 칩의 전 영역에 대한 직접냉각 시 그 효과를 증대시키는 가능성을 가지고 있다고 보고되고 있으나, 그 향상 원리에 대해서는 잘 알려져 있지 않고 열전소자를 이용한 전자냉각방식에 압전 액츄에이터를 적용하여 열전달을 향상시키고자 하는 연구는 거의 없는 실정이다.

1.3 연구목적 및 내용

앞 절의 연구동향에서 언급한 바와 같이, 대부분의 열전달 해석에 관한 논의는 열전달 방식에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 특히, 상변화 열전달의 경우는 열전달 방식에 따른 용융 및 응고과정에 관한 연구가 대부분이고 상변화 열전달 과정에서 용융을 촉진하고자 하는 방법은 대부분 대류 열전달 방식에 의존하고 있으며 자연대류를 촉진하고자 하는 연구는 미흡한 실정이다.

또한, 전류의 극성에 따라 열을 흡수, 방출하는 열전소자를 이용한 전자냉각방식에 관한 연구에 있어 열전달 방식은 열전소자의 재료, 형성, 구조 등의 변화나 냉

각방식 및 냉각팬의 속도 제어 등을 통한 연구가 대부분이고, 압전소자를 이용한 열전달 촉진을 통해 냉각성능을 개선하는 연구에 대해서는 충분히 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 상변화 열전달 촉진 및 열전냉각장치의 냉각영역 개선을 위해 압전소자로 구성되어 진동을 일으키는 초음파 진동자와 압전 액츄에이터를 상변화 물질의 액상영역 및 공기중의 냉각영역에 각각 사용하여 음장을 형성하고 압전소자에 의해 진동을 받는 유체 내에서 발생되는 열전달 특성 및 열전달 향상에 관하여 조사해 보고자 한다.

세부적으로, 상변화 열전달에 관한 연구에서는 단열된 용융용기에 고상의 파라핀(n-Octadecane)을 채우고 일정량의 열유속을 가하여 고-액상 경계면이 존재하는 열전달 프로세스를 구성하고 용융 과정을 고찰한 후, 압전소자를 사용한 초음파 진동을 열전달 프로세스에 가하여 열전달 촉진 원인을 규명해 보고자 한다. 이를 위해, 초음파 진동의 가진시 액상파라핀 내에 발생하는 물리적 거동을 입자영상추적계(particle image velocimetry, PIV)와 적외선열화상카메라(infrared thermal camera)를 이용하여 분석하여 보고, 초음파 진동의 가진에 의해 액상영역 내에 발생하는 음압분포를 결합형 유한요소-경계요소법(finite element-boundary element method, FE-BEM)을 사용하여 계산한 뒤 열전달 향상과의 상호관계를 고찰해 보고자 한다.

또한, 열전냉각장치의 열전달 현상 및 냉각성능 향상에 관한 연구에서는 열전소자와 방열판 그리고 냉각팬을 이용하여 열전냉각장치를 구성하며, 각각의 인가된 전압을 열전소자와 냉각팬에 공급하여 공기중에서 냉각영역을 형성하도록 하고 온도분포를 고찰한 후, 압전 액츄에이터를 열전달 프로세스에 가하여 냉각영역에서 발생하는 열전달 현상을 조사해 보고자 한다. 또한, CCD 카메라와 적외선열화상카메라를 이용하여 냉각영역에서 발생하는 유동현상을 가시화하고 압전소자의 진동이 열전달 향상에 미치는 요인을 규명해 보고자 한다.

제 2 장 이 론 해 석

2.1 상변화 열전달 해석

2.1.1 해석모델 및 지배방정식

Gau와 Viskanta[32], Hong[78]은 이동하는 고-액 경계면의 추적에 관한 이론식과 2차원 용융모델을 제시한 바 있고, Oh 등[33]은 Rayleigh수(Ra*)와 Stefan수(Ste*) 같은 무차원 수를 도입하여 고-액 상변화 과정을 고찰한 바 있다. 본 연구에서는 선행연구에서 제안한 기본적인 이론식과 해석모델을 채택하고 경계조건에 맞는 무차원 수를 도입하였으며, 상변화 과정에 있어서 다음과 같은 가정하에 이론해석을 실시하였다.

① 고상과 액상파라핀의 물성치는 동일하다.
② 액상파라핀의 밀도차에 관여하는 온도변화를 제외하면 모든 물성치의 변화는 온도변화와 무관하다.
③ 초음파 방사로 인하여 액상파라핀에서 발생할 수 있는 물성치 변화는 무시한다.
④ 액상파라핀은 뉴턴유체로 간주한다.
⑤ 점성소산과 압력에 의한 일은 무시한다.

Fig. 1은 본 연구에서 채택한 고-액 경계면이 존재하는 상변화 열전달 해석에 관한 2차원 해석모델을 보여주고 있으며, 이동하는 고-액 경계면을 추적하기 위해 경계면의 온도는 상변화 물질의 용융온도와 같다고 가정하였다.

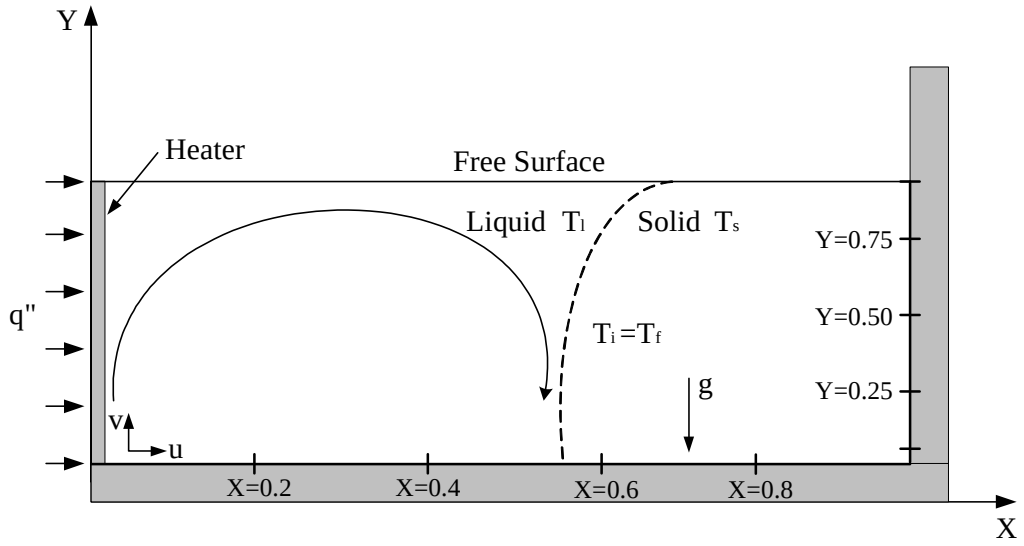


Fig. 1 2-D analysis model for melting process of PCM

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 고상 파라핀을 채운 용융용기내의 한쪽 벽면에서 히터에 의해 일정량의 열유속을 가하게 되면 열량은 액상파라핀을 거쳐 고상파라핀으로 전달되고 고-액 경계면에서 용융현상이 발생된다. 이때 가열된 히터 주위의 액상파라핀은 밀도가 낮아져 용기의 윗면으로 상승하게 되고 고상파라핀에 열을 빼앗겨 다시 하강하게 된다. 이는 초기온도에서 상변화 시점까지 전도의 지배적인 영향을 받다가 용융점 이후부터는 액상파라핀내의 대류현상에 의해 대부분의 열전달이 이루어지게 되는 것이다.

이러한 해석모델을 토대로 용기내에서 액상파라핀의 열전달 현상을 표현하기 위해서는 무차원 좌표 X, Y 방향의 운동량방정식 및 에너지방정식이 필요하며, 해석을 위한 각 조건을 일반화하여 무차원화 한 지배방정식은 다음과 같다.

[운동량방정식]

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\left(u\frac{\partial \omega}{\partial x}+v\frac{\partial \omega}{\partial y}\right)=\nu\nabla^2\omega+g\beta\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (2.1.1)$$

여기서, ψ (Stream Function) : $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$

ω (vorticity) : $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\nabla^2 \psi$

[에너지방정식]

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \alpha \nabla^2 T \tag{2.1.2}$$

또한, 고-액 경계면과 히터표면에서의 경계조건은 다음과 같이 정의된다.

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} - K \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial T}{\partial x} = \rho \Delta h_f \frac{\partial z}{\partial t} \tag{2.1.3}$$

$$q_o'' = -K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \tag{2.1.4}$$

따라서, 식 2.1.1과 2.1.2를 무차원화 된 식으로 정리하여 나타내면 다음과 같다.

[운동량방정식]

$$\frac{\partial \Omega}{\partial F_o} + \left(U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} \right) = \mathrm{Pr} \nabla^2 \Omega + Ra \frac{\partial \theta}{\partial X} \tag{2.1.5}$$

여기서, $\nabla^2 \Psi = -\Omega$

$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}$, $V = \frac{\partial \Psi}{\partial X}$

[에너지방정식]

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_o} + \mathrm{Pr} \left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \tag{2.1.6}$$

식 2.1.5와 2.1.6에서 사용된 무차원 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{T - T_f}{\Delta T},\ X = \frac{x}{H},\ \ Y = \frac{y}{H},\ U = \frac{Hu}{\upsilon},\ V = \frac{Hv}{\upsilon},\ \Omega = \frac{H^2\omega}{\upsilon}$$

$$F_o = \frac{\alpha t}{H^2},\ \mathrm{Pr} = \frac{\upsilon}{\alpha},\ \ Ra = \frac{g\beta\Delta T H^3 \mathrm{Pr}}{\upsilon^2},\ \ Gr = \frac{g\beta\Delta T H^3}{\upsilon^2}$$

따라서, 고-액 경계면과 히터표면에서의 경계조건을 각각 무차원화 된 식으로 표현하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_o} = -Ste\frac{\partial \theta}{\partial X}\left\{1 + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial Y}\right)^2\right\} \tag{2.1.7}$$

$$N = -\frac{\partial \theta}{\partial X}|_{X=0} \tag{2.1.8}$$

여기서, $\Gamma = \frac{z}{H}$이며 본 연구에서는 가열부의 온도가 계속 상승하기 때문에 $\Delta T = q'' H/K$ 의 관계를 이용하여 수정 Stefan수 (Ste*)와 수정 Rayleigh수 (Ra*)를 제시하고 다음과 같이 정의하였다.

$$Ste = \frac{C_p \Delta T}{\Delta h_f} \quad \Rightarrow \quad Ste^* = \frac{C_p q'' H}{K \Delta h_f} \tag{2.1.9}$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T H^3 \mathrm{Pr}}{\nu^2} \quad \Rightarrow \quad Ra^* = \frac{g\beta q'' H^4 \mathrm{Pr}}{K\nu^4} \tag{2.1.10}$$

결국, 식 2.1.7은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_o} = -Ste^* \frac{\partial \theta}{\partial X}\left\{1 + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial Y}\right)^2\right\} \tag{2.1.11}$$

2.1.2 열전달계수

고체면에서 기체 또는 액체 즉, 유체로의 열전달은 유체가 정지되어 있을 때는 열전도에 의하지만, 유체가 유동을 하는 대류상태에서는 열의 수송이 추가되어 열전도와는 다른 형태의 열전달이 되며 이를 대류열전달이라고 한다. 대류열전달은 유동형태와 밀접한 관련이 있으며 부력에 의한 자연대류와 유동을 기계적으로 일으키는 강제대류로 구분된다. 또한, 물체 주위의 유동과 물체 내부의 유동은 유동의 양상과 열전달의 계산 방법이 다르다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 물체표면의 온도가 T_s로 일정한 고온 물체의 주위를 저온 유체가 유동하고 물체표면으로부터 유체로 열이 이동하는 경우 물체표면에서 열전달의 크기 즉, 열유속 q''는 고체표면의 온도 T_s와 유체의 벌크온도 T_∞(고체면에서 충분히 떨어진 유체부분의 일정한 온도)의 차($T_s - T_\infty$)에 의존한다. 이것이 바로 Newton의 냉각법칙이며, 보통 다음과 같이 정의한다.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{2.1.12}$$

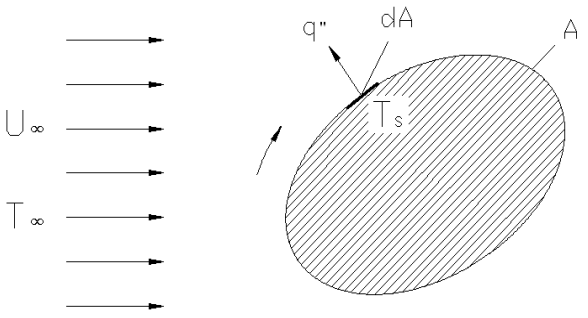


Fig. 2 Schematic diagram of flow and heat transfer at system boundary

여기서, h는 열전달계수라 부르며, [W/㎡ · K]의 차원을 갖는다. 열전달계수는 유체의 물성만으로 결정되지 않고, 흐름의 성질에 강하게 의존한다. 이러한 이유 때문

에 열전달계수의 크기를 일반적으로 나타내는 것은 어렵지만 대략 Fig. 3에 나타낸 것과 같은 범위의 값을 갖는다.

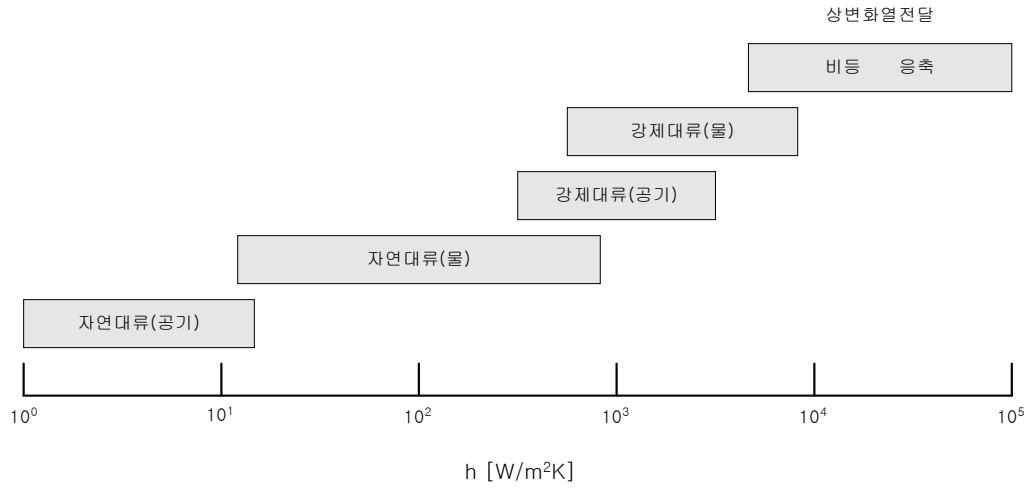


Fig. 3 An approximate dimensions of heat transfer coefficient

고체면을 따라서 흐를 경우, 유속은 고체 표면과 가까운 부분에서 크게 변화하는데, 이 때 엷은 층상 부분을 속도 경계층이라 부르고 고체면의 온도가 높거나 낮을 경우 온도도 고체면에 가까운 부분에서 크게 변화하는데 이 층을 온도 경계층이라고 부른다. 열전달은 이 경계층의 두께에 밀접한 관련이 있으며, 온도 경계층의 두께를 δ_t라고 하고 온도 경계층 내에서 유체의 온도가 T_s에서 T_∞로 직선적으로 변화할 경우, Fourier 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$q'' = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{n=0} = \lambda\frac{(T_s - T_\infty)}{\delta_t} \tag{2.1.13}$$

식 2.1.12와 2.1.13의 관계로부터 다음과 같은 식을 정리할 수 있다.

$$h = \frac{\lambda}{\delta_t} \tag{2.1.14}$$

즉, 열전달계수는 유체의 열전도율에 비례하고 온도 경계층의 두께에 반비례한다. 물론, 실제 경계층 내의 온도분포는 복잡하고 직선적으로 변하는 것은 아니지만 대략 식 2.1.14와 유사한 관계가 성립하여 열전달은 온도 경계층의 두께가 얇을수록 크게 되며 유체의 특성에 의존하며 상호관련성을 갖고 있어 열전달은 속도 경계층과도 깊은 관계가 있다.

앞에서도 언급하였듯이, 유동의 양상은 물체면에 따라서 변화하기 때문에 열전달계수 h는 위치에 따라서 다른 값을 가지며, 물체의 표면 전체에서 유체로 전달되는 전열량 Q는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \int_A h(T_s - T_\infty)dA = (T_s - T_\infty)\int_A hdA \tag{2.1.15}$$

여기서, A는 물체의 표면적이고, 평균 열유속을 q_m이라 하면, 평균열전달계수 h_m은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_m = \frac{Q}{A} = h_m(T_s - T_{inf}) \tag{2.1.16}$$

$$h_m = \frac{1}{A}\int_A hdA \tag{2.1.17}$$

이에 대해 열전달계수 h는 물체표면의 국소적인 위치에서 정의되는 값으로서 국소열전달계수라고 부르며, 열전달계수는 열전도율(thermal conductivity)이나 열확산계수(thermal diffusivity)와는 달리 유체의 물성치, 물체의 형상 및 유동형태에 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

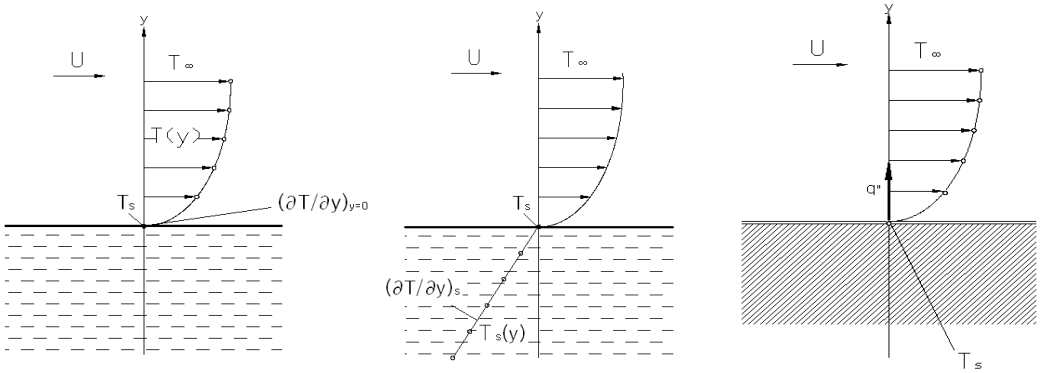
한정되어 있을 뿐 실험적으로 측정하는 일이 매우 많다. 따라서 Masahiro[79]가 제시한 3가지 방법을 이용하여 실험으로 열전달 계수를 측정할 수 있으며, 일반적으로 열유속과 열전달계수는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$q'' = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = h(T_h - T_\infty) \tag{2.1.18}$$

따라서, 식 2.1.18로부터 열전달계수에 대해 두 가지로 표현하면 다음 식과 같다.

$$h = \frac{-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}}{T_h - T_\infty} \tag{2.1.19}$$

$$h = \frac{q''}{(T_h - T_\infty)} \tag{2.1.20}$$



(a) (b) (c)

Fig. 4 Measurement method of heat transfer coefficient

식 2.1.19와 2.1.20을 이용하여 열전달계수를 실험을 통해 다음과 같이 측정할 수 있다.

1) 측정법-1

Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 주류의 온도 T_∞ 및 경계층내의 온도분포 $T(y)$를 정밀하게 측정하고 난 후 벽면의 온도 T_s와 온도구배 $(\partial T/\partial y)_{y=0}$을 구한다. 이들 측정치를 사용하여 식 2.1.19로부터 열전달계수 h를 구한다.

2) 측정법-2

Fig. 4(b)처럼 고체측의 온도분포를 측정하고 고체표면의 온도 T_s와 Fourier 식 2.1.2를 사용하여 열유속 q''을 구한다. 또, 주류의 온도 T_∞를 별도로 측정하여 식 2.1.20으로 부터 h를 구한다.

3) 측정법-3

Fig. 4(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 2.1.20을 이용해 h를 계산한다.

본 연구에서는 가열부 즉 히터의 발열량 q''을 알 수 있기 때문에 [측정법-3]을 적용하여 식 2.1.20을 이용해 초음파가 가진된 경우와 가진되지 않은 경우에 있어서 각각의 국부 열전달계수를 측정하였으며, 다음과 같이 정의하였다.

초음파 진동이 가진된 경우 $$h = \frac{q''}{(T_h - T_\infty)} \tag{2.1.21}$$

초음파 진동이 가진되지 않은 경우 $$h_0 = \frac{q''}{(T_h - T_\infty)} \tag{2.1.22}$$

2.2 열전소자의 열전현상 해석

일반적으로 어떤 물질의 양단에 열과 전류를 동시에 흘렸을 때 상호작용에 의해 서로 영향을 주는 현상을 열전현상이라고 말한다. 이러한 열전현상을 이용하여 서로 다른 물성치를 가지고 있는 도체나 반도체의 접합부에 일정온도를 유지하면서 전류를 흘렸을 경우 Seebeck 효과, Peltier 효과 및 Thomson 효과로 정의되는 열전현상이 나타난다.

1) Seebeck 효과

각기 다른 물성치를 갖는 도체 혹은 반도체 A와 B를 접합시키고 접합부에 일정온도를 유지시켰을 때, A와 B의 양단에는 일정한 기전력이 발생하는 것을 Seebeck 효과라고 하며, 기전력 V는 접점온도의 함수로서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{AB} = \int_{T_R}^{T} (\alpha'_A - \alpha'_B) dT \,|_{I=0} \tag{2.2.1}$$

여기서, I는 접점간의 전류량, T_R은 기준온도, α'는 Seebeck 계수를 말한다.

2) Peltier 효과

서로 다른 두 물질의 접합부에 전류를 공급하였을 때 접합부에서 열의 흡수 및 방출이 발생하는 현상을 Peltier 효과라고 하며, 접합부에서 열의 흡수 및 방출량 Q_P를 정의하면 다음과 같다.

$$Q_P = I(\Pi_A - \Pi_B) \tag{2.2.2}$$

여기서, Π는 Peltier 계수를 의미한다.

3) Thomson 효과

온도구배가 존재하는 도체 혹은 반도체에 전류를 공급하였을 때, 일반적으로 열과 전류는 동시에 흐르면서 서로 영향을 주게 되는 현상을 Thomson 효과라고 하며, 온도구배와 전류의 세기에 따른 열량 Q_T를 정의하면 다음과 같다.

$$Q_T = I\left(T\frac{d\alpha'}{dT}\Delta T\right) \tag{2.2.3}$$

여기서, $T(d\alpha'/dT)$는 Thomson 계수를 의미한다.

이러한 열전현상 중에서 peltier 효과를 적용한 펠티어모듈(peltier module)이라고도 불리는 열전소자(thermoelectric module)는 Fig. 5에서 보는 바와 같이, p형 반도체와 n형 반도체를 조합하고 전류를 공급하여 전기적 에너지를 직접 냉각에 이용할 수 있도록 개발된 소자이다.

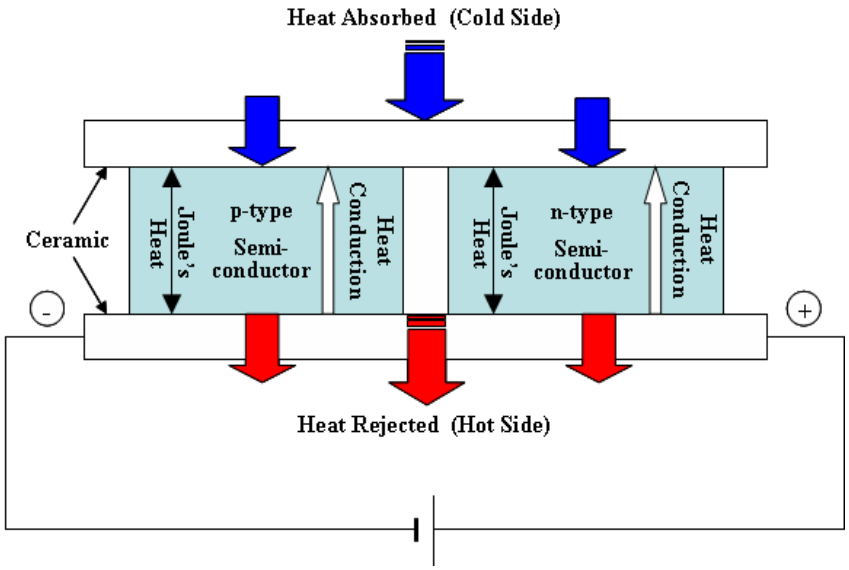


Fig. 5 Schematic diagram of thermoelectric module (peltier module)

p형과 n형 반도체를 조합한 소자에 전류 I를 공급하게 되면, 펠티어 효과를 적용한 열전소자에는 전위차가 발생하면서 냉각대상에 접한 저온접점 즉, 냉각면의 온도는 감소하고 반대로 고온접점인 열방출면의 온도는 증가하게 된다. 이때 열은 냉각대상으로부터 저온접점으로 흐르게 되고 고온접점에서 주위로 방출되는데, 이러한 현상을 열전냉각장치에 적용하여 열전소자에서 발생되는 전기적 에너지를 직접 냉각에 이용하게 되는 것이다.

이러한 열전소자의 열전달 해석과 관련된 이론식은 주어진 열전소자의 저온접점에서 흡수할 수 있는 열량을 다음과 같이 정의함으로써 전개될 수 있다.

$$Q_C = \alpha'_S T_C I_C \tag{2.2.4}$$

여기서, α'_S : Seebeck 계수

T_C : 열전소자의 저온접점에서 절대온도 [K]

I_C : 열전소자에 공급된 전류의 세기 [A]

또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 고온접점과 저온접점의 온도차 즉, 열방출면에서 냉각면으로의 열전도에 의한 열의 역류현상 발생에 따른 열량의 계산은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$Q_F = K_C A_C \frac{\Delta T}{\delta_C} \tag{2.2.5}$$

여기서, K_C : 열전소자의 열전도계수

A_C : 열전소자의 단면적

ΔT : 고온접점과 저온접점의 온도차

δ_C : 고온접점과 저온접점 사이의 거리

한편, 열전소자에 공급된 전류로 인하여 열전소자 내부에는 Joule열(Joule's heat)이 발생하게 되는데 이 열은 양분되어 각각 고온접점과 저온접점에 흐른다. 만약, 발생되는 Joule열이 저온접점으로 향하고 열전소자의 열저항을 R_C라고 한다면 이때의 Joule열은 식 2.2.6과 같이 나타낼 수 있으며, 열전소자에서의 전열량 계산은 식 2.2.7로 나타낼 수 있다.

$$Q_J = \frac{1}{2} I_C^2 R_C \tag{2.2.6}$$

$$Q = Q_C - Q_J - Q_F = \alpha'_S T_C I_C - \frac{1}{2} I_C^2 R_C - K_C A_C \frac{\Delta T}{\delta_C} \tag{2.2.7}$$

또한, 저온영역에서 제기되는 열의 양 Q_C는 펠티어효과에 의한 것, Joule열에 의해 발생하는 열의 절반이 저온영역으로 유입되는 것, 고온접점과 저온접점의 온도차에 따른 열전도성에 의한 열전달량 및 Thomson 효과를 무시할 경우, 저온영역의 흡열량 Q_C는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Q_C = \alpha' T_C I - \frac{1}{2}(I^2 R) - K\Delta T \quad [\mathrm{W}] \tag{2.2.8}$$

이러한 열전소자에 걸리는 전압 V는 Seebeck 효과에 의한 전압과 소자의 전기저항에 의한 전압이 함께 작용하기 때문에, 열전소자에 공급되는 실제전력 P[W]는 식 2.2.9와 같이 정의된다.

$$P = VI = V(\alpha' \Delta T + IR) \quad [\mathrm{W}] \tag{2.2.9}$$

결국, 열전소자의 성능계수(Coefficient of Performance, COP)는 소요전력에 대한 냉각능력의 비로써 식 2.2.8과 식 2.2.9를 토대로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$COP = \frac{Rate\,of\,Heat\,Transfer}{Input\,Power} = \frac{Q_C}{P} \tag{2.2.10}$$

2.3 PIV 측정 이론[80]

본 연구에서는 상변화 물질의 용융시 압전소자의 진동, 즉 초음파 진동으로 인해 액상영역에서 발생하는 물리적 거동을 관찰하기 위해 입자영상추적기(Particle Image Velocimetry, PIV)를 이용하였으며, Fig. 6은 유동영역에서 입자영상추적기의 입자추적 과정을 보여주는 개략도이다.

유동장의 국부속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격 동안 이동한 미소직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구할 수 있다. 이러한 기본원리는 간단하지만 dx/dt를 실제 운동속도에 근사시키려면 이동변위 즉, 입자가 그리는 궤적은 직진성과 등간격성이 보장되면서 충분히 작아야 한다. PIV를 이용하여 유동장의 속도 벡터를 얻기 위해서는 고속카메라를 이용하여 상관영역이라고 하는 2개의 작은 영상 프레임을 얻고 이를 토대로 미리 액상에 넣어둔 미세한 입자의 궤적을 추적한다.

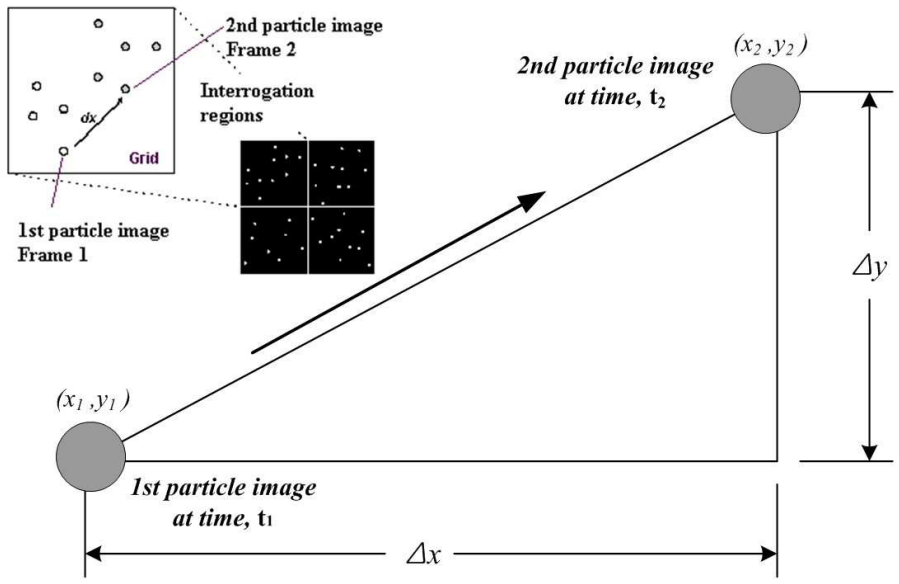


Fig. 6 Schematic diagram of the image analysis by PIV

이는 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 프레임 1과 프레임 2의 분석을 통해 입자간의 거리 dx를 구하고 레이저 조명의 펄스 간격을 통해 시간 dt를 결정함으로써 속도 벡터는 다음과 같은 식으로 구해질 수 있으며, S는 CCD 카메라의 상관계수이다.

$$V = S\frac{dx}{dt} \tag{2.3.1}$$

입자의 궤적 및 속도 벡터를 구하는 알고리즘 중 가장 널리 사용되는 방법은 상호상관함수법이다. Fig. 7과 같은 영역에서 2차원적 이산 상호상관함수는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$C(s,t) = \sum_x \sum_y f(x,y)\, w(x-s, y-t) \tag{2.3.2}$$

단, 미소영역 $w(x,y)$의 크기는 J × K 이며, 전체영역 $f(x,y)$의 크기는 M × N이다. 또한 s=0, 1, 2, 3,…, M-1, t=0, 1, 2, 3,…, N-1이다. 함수식의 $f(x,y)$ 및 $w(x,y)$는 진폭의 변화에 매우 민감하여 다음의 식으로 정의되는 상호상관관계를 구하여 최대상관의 위치를 찾아내는 것이 합리적이다.

$$\gamma(s,t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x,y) - f'(x,y)][\omega(x-s,y-t) - \omega']}{\left\{\sum_x \sum_y [f(x,y) - f'(x,y)]^2 \sum_x \sum_y [\omega(x-s,y-t) - \omega']^2\right\}^{1/2}} \tag{2.3.3}$$

여기서, w'는 $w(x,y)$영역 내의 평균치이며 $f'(x,y)$는 w가 현재 위치하는 곳의 평균값을 의미한다. 이때 상관계수 $\gamma(s,t)$는 -1과 1사이의 값을 갖게 된다. 상호상관관계에 관한 식으로부터 알 수 있듯이 상관함수 또는 상관계수는 주파수 영역에서 구해질 수 있다.

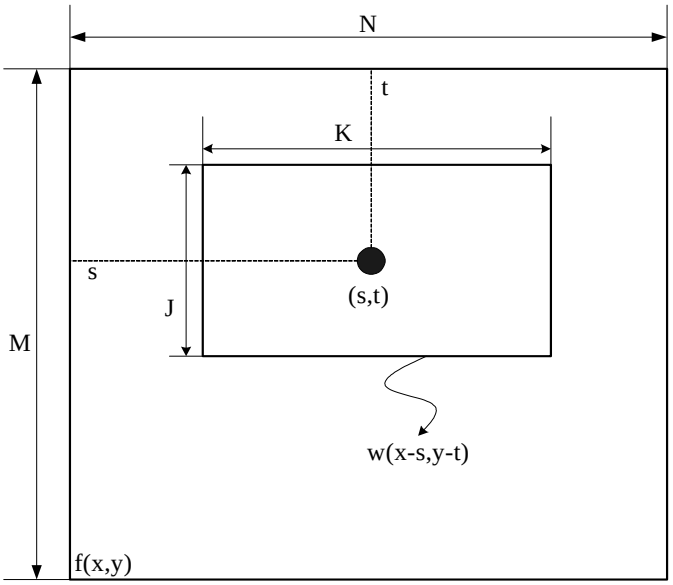


Fig. 7 Schematic diagram of Cross-Correlation Function (CCF)

2.4 열화상카메라 측정 이론[81]

적외선은 에너지 전달 현상의 일종으로 가시광선보다 파장이 길고 마이크로 광선보다는 짧은 약 0.8㎛ ~ 100㎛ 파장대역을 갖는 전파의 일종이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 적외선 열화상카메라는 2㎛ ~ 13㎛ 대역의 파장을 이용하고 있으며, 2㎛ ~ 5㎛ 대역의 SW(shortwave) 영역과 8㎛ ~ 13㎛ 대역의 LW(longwave) 영역으로 나누어 사용한다. 특히, SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.

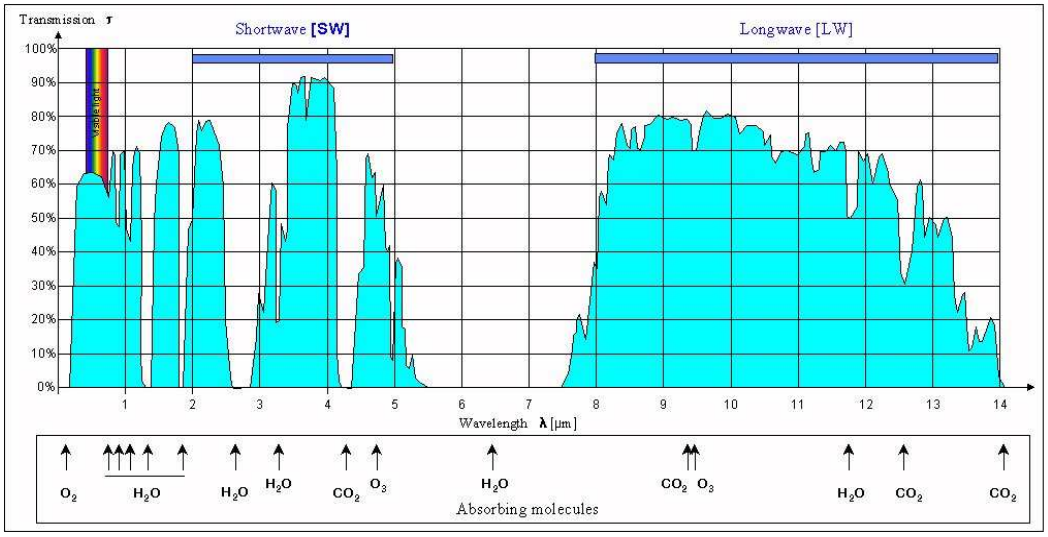


Fig. 8 Atmospheric transmission over 1 nautical mile

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.

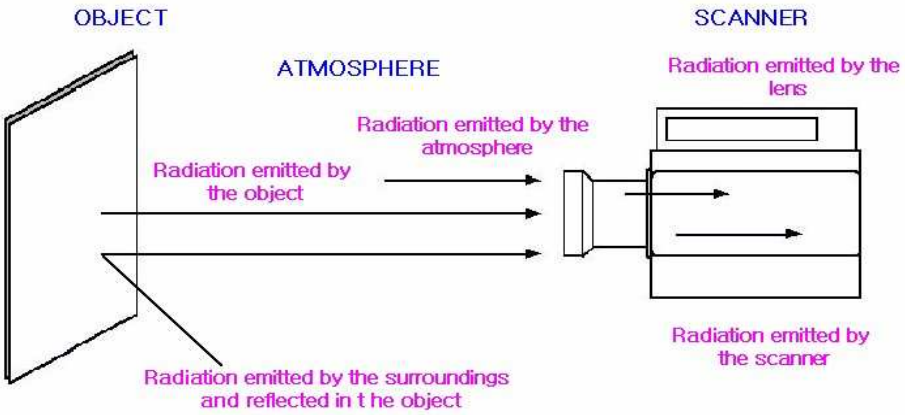


Fig. 9 Radiation patterns of the general measurement condition

Fig. 9는 일반적인 열화상카메라 측정과정에서 방사형태를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 적외선 열화상카메라(Thermovision 900, AGEMA)는 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장중에서 적외선 부분만을 검출하여 온도분포를 측정한다. 적외선 스캐너는 일정한 분광범위에서 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 온도측정 공식은 다음과 같이 표현된다.

$$E_m = E(T_{obj}) \times r \times \epsilon + r(1-\epsilon) \times E(T_{amb}) + (1-r) \times E(T_{atm}) \quad (2.4.1)$$

여기서, 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다. 또한, $E(T)$는 온도 T일 때 흑체로부터 방사된 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이고 E_m은 측정된 총 방사량의 온도 값이며 r은 유효한 대기 전달, T_{atm}와 T_{amb}은 각각 대기와 주위의 온도를 의미한다. 온도는 식 2.4.1을 기초로 하여 열화상카메라에서 자동적으로 계산되나 측정환경에 따라 방사, 피사체와의 거리, 상대습도, 대기온도 및 반사된 주위온도 등의 피사체 매개변수들을 고려하여 실험을 수행하여야 한다.

Fig. 10은 열화상카메라의 원리에 대해 개략적으로 정리한 다이어그램이다.

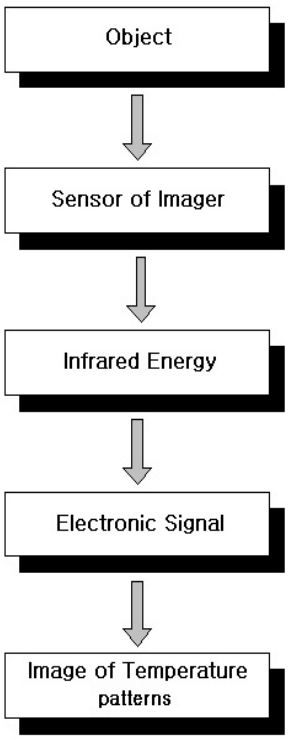


Fig. 10 Principle of infrared thermal camera

2.5 결합형 유한요소-경계요소 해석

1960년대에 들어서 Gladwell과 Zimmerman[82]에 의해 음향 유한요소법의 모델링이 소개된 후 Arllett와 Zienkiewicz[83]는 헬름홀츠(Helmholtz)방정식에 유한유소법을 적용하여 복잡한 경계조건을 가진 문제를 해결하는 방법을 소개하였다. 음향 및 음압해석에 유한요소법이 적용되기 시작한 후 구조-음향 연성해석을 위한 노력이 시도되었다. 1980년대에 와서 음향계의 수치계산에 유한요소법 대신 경계요소법의 사용이 급격히 늘어나기 시작하였다. 유한요소법 대신 경계요소법을 사용하게 되면 경계면만 모델링하면 되므로 모델링하는 시간을 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 무한 경계영역에서의 음압 및 소음예측이 가능하게 되어 경계요소법의 사용은 빠르게 확산되어 왔다. 하지만, 경계요소법 또한 아직까지 선형방정식과 균일 매체에만 응용이 가능할 뿐만 아니라 계산시간이 길며, 구조물의 진동이나 동적거동을 파악하는 데에는 유한요소법 보다 우위를 확보하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 압전소자의 진동 가진시 액상영역에 발생하는 음압분포를 수치해석적으로 계산해 보기 위해, 구조물-음향의 연성해석에 있어서 구조계는 유한요소법을 적용한 상용코드, ANSYS™를, 음향계는 경계요소법을 적용한 상용코드, SVS(structural vibration simulator)를 각각 사용하여 해석하였다.

2.5.1 진동평판에 대한 유한요소 해석

일반적인 평판에 대한 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$[M]\{\ddot{a}\}+[C]\{\dot{a}\}+[K]\{a\}=\{q\} \tag{2.5.1}$$

식 2.5.1은 시간에 대한 함수이므로 시간변수를 없애기 위하여 라플라스 변환을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$[M][s^2\{\bar{a}\}-s\{a\}_o]+[C][s\{\bar{a}\}-\{a\}_o]+[K]\{\bar{a}\}=\{\bar{q}\} \tag{2.5.2}$$

여기서, s : 라플라스 변환변수

$\{\bar{q}\}$: 가진력의 라플라스 변환형태

$\{\bar{a}\}$: 변위의 라플라스 변환형태

$\{a\}_o$: 초기 변위값

$\{\dot{a}\}_o$: 초기 속도값

식 2.5.2에서 초기변위와 초기속도가 없다면 다음과 같이 정리되어 진다.

$$[s^2[M]+s[C]+[K]]\{\bar{a}\}=\{\bar{q}\} \tag{2.5.3}$$

분산행렬(distribution matrix) [N]을 이용하여 식 2.5.3의 $\{\bar{q}\}$를 유한요소의 각 점마다의 실제적인 힘, $\{\bar{p}\}$로 표시할 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\bar{q}\}=\int\int_s [N]^T\{\bar{p}\}dA \tag{2.5.4}$$

또한, 식 2.5.4를 식 2.5.3에 대입한 후, 간략하게 재정리하면 식 2.5.6과 같다.

$$A_s\,\bar{a}=N^T\,\bar{p} \tag{2.5.5}$$

$$A_s=\{s^2[M]+s[C]+[K]\} \tag{2.5.6}$$

구조물과 음향계의 접합부에서 유한요소 모델과 경계요소 모델을 결합하기 위하여 양립(compatibility)과 평형(equilibrium) 조건이 만족되어져야 한다.

특히, 유한요소 행렬들은 경계요소 영역에서 경계요소 행렬들과 유사한 형태로 바뀌어져야 한다. 그러므로 접합경계면을 고려하면 유한요소 행렬을 나타내는 식 2.5.5는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$[A_{sl}\ A_l]\begin{bmatrix}\bar{a}\\ \bar{a}_l\end{bmatrix} = [N^T\ N_l^T]\begin{bmatrix}\bar{p}\\ \bar{p}_l\end{bmatrix} \tag{2.5.7}$$

여기서,

$\bar{a}_l$, $\bar{p}_l$: 접합경계면에서의 변위와 압력의 라플라스 변환형태

A_{sl} , N_l : $\bar{a}_l$와 $\bar{p}_l$에 상응하는 행렬 A_s와 N

여기서 이용되는 구조물과 음향계의 연성문제에 있어서 이용되어지는 구조물은 음향계와 완전한 접촉을 이루는 편이나 셸(Shell)과 같은 종류이다. 결론적으로, 변위를 나타내는 $\bar{a}$, $\bar{a}_l$는 같은 벡터를 의미하므로 식 2.5.7은 다음과 같이 줄여서 표시될 수 있다.

$$[A_s][\bar{a}] = [N^T\ N_l^T]\begin{bmatrix}\bar{p}\\ \bar{p}_l\end{bmatrix} \tag{2.5.8}$$

2.5.2 음향계에 대한 경계요소 해석

공간상에서의 3-D 스칼라 파동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla^2 p(\vec{x}, t) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p(\vec{x}, t)}{\partial t^2} = 0 \tag{2.5.9}$$

여기서도 마찬가지로 시간변수를 없애기 위하여 라플라스 변환을 적용하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\nabla^2 p(\vec{x}, s) - \frac{s^2}{c^2} p(\vec{x}, s) = 0 \tag{2.5.10}$$

또한, 식 2.5.10에 그린정리(green's theorem)를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C\bar{p}(\vec{y}, s) + \int_{\Gamma} \vec{p}(\vec{x}, s) \frac{\partial}{\partial n} \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}, s)\, d\Gamma(\vec{x}) = \int_{\Gamma} \left\{ \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}, s) \frac{\partial}{\partial n} \bar{p}(\vec{x}, s) \right\} \tag{2.5.11}$$

여기서, $g(\vec{x}, \vec{y}, s)$는 라플라스 영역에서의 파동방정식에 대한 기초해를 나타내고, 부드러운 경계면에 대하여 $C = 1/2$의 값을 사용한다. 식 2.5.11에서 주어진 영역 안에 있는 점, y를 경계면에 있는 점, y_o로 옮기면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{2}\bar{p}(\bar{y}_o, s) + \int_{\Gamma} \left\{ \bar{p}(\vec{x}, s) \frac{\partial}{\partial n} \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_o, s) \right\} d\Gamma(\vec{x}) = \int_{\Gamma} \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_o, s) \frac{\partial}{\partial n} \bar{p}(\vec{x}, s)\, d\Gamma(\vec{x}) \tag{2.5.12}$$

식 2.5.12로부터 주어진 계에 대해 n개의 요소를 이용하여 경계면을 이산화시킬 수 있다. 이와 같은 경계면의 이산화는 임의의 경계에 대한 음압을 예측할 수 있는 파동방정식의 이산화를 유도할 수 있다.

$$\frac{1}{2}\bar{p}^n + \sum_{k=1}^{n} \bar{p}^k \int_{\Gamma_n} \frac{\partial \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_n, s)}{\partial n} d\Gamma_k(\vec{x}) = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial \bar{p}^k}{\partial n} \int_{\Gamma_k} \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_n, s)\, d\Gamma_k(\vec{x}) \tag{2.5.13}$$

식 2.5.13을 간단히 표시하기 위하여 다음과 같은 표현을 도입할 수 있다.

$$H^{kn} = \frac{1}{2} + \int_{\Gamma_k} \frac{\partial \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_n, s)}{\partial n} d\Gamma_k(\vec{x}) \qquad n = k$$

$$H^{kn} = \int_{\Gamma_k} \frac{\partial \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_n, s)}{\partial n} d\Gamma_k(\vec{x}) \qquad n \neq k \tag{2.5.14}$$

$$G^{kn} = \int_{\Gamma_k} \partial \bar{g}(\vec{x}, \vec{y}_n, s) d\Gamma_k(\vec{x}) \tag{2.5.15}$$

식 2.5.14와 식 2.5.15를 식 2.5.13에 대입하여 정리하면 다음과 같고,

$$\sum_{k=1}^{n} H^{kn} \bar{p}^k = \sum_{k=1}^{n} G^{kn} \frac{\partial \bar{p}^k}{\partial n} \tag{2.5.16}$$

식 2.5.16을 줄여서 다시 쓰면, 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$H\bar{P} = G\bar{P}_n \tag{2.5.17}$$

여기서, 행렬 H와 G는 식 2.5.14와 식 2.5.15의 계산에 의해 구해진다. 또한 $\bar{P}$와 $\bar{P}_n$은 $\bar{p}^k$와 $\frac{\partial \bar{p}^k}{\partial n}$을 의미한다. $\bar{P}_n$은 음향계 내에서 법선방향으로의 압력분포를 나타내므로 음향계 내의 변위, $\bar{U}_a$를 이용하여 $\bar{P}_n$을 표시할 수 있다.

$$\bar{P}_n = -\rho_o s^2 \bar{U}_a \tag{2.5.18}$$

여기서, ρ_o는 액상파라핀의 밀도를 나타내며, 식 2.5.18을 이용하여 식 2.5.17을 다시 쓰면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\rho_o s^2 G\overline{U}_a = H\overline{p} \tag{2.5.19}$$

식 2.5.19의 행렬 방정식을 풀면, 음향경계면에서 알고자 하는 압력 값이나 변위 값을 구할 수가 있다. 하지만, 이 방정식을 풀기 위해 초기 경계조건 값들이 주어져야 하므로 경계면에는 알고 있는 경계조건과 계산되어져야 하는 경계조건이 공존하게 된다.

그러므로 식 2.5.19의 행렬 방정식에서 알고 있는 경계조건을 방정식의 우변에 모으고 계산되어져야 하는 경계조건을 좌변에 모아서 다시 정리하면 식 2.5.20과 같이 나타낼 수 있다.

$$[-H_u \ -\rho_o s^2 G_u]\begin{bmatrix} \overline{p}_u \\ \overline{U}_{au} \end{bmatrix} = [H_k \ \rho_o s^2 G_k]\begin{bmatrix} \overline{p}^k \\ \overline{U}_{ak} \end{bmatrix} \tag{2.5.20}$$

여기서,

$\overline{P}_k$, $\overline{U}_{ak}$: 경계면에서 알고 있는 압력과 변위

H_k, G_k : 경계면에서 알고 있는 P_k와 q_k에 해당되는 H와 G의 열벡터

$\overline{P}_u$, $\overline{U}_{au}$: 경계면에서 계산되어져야 하는 압력과 변위

H_u, G_u : 경계면에서 계산되어져야 하는 $\overline{P}_u$와 $\overline{U}_{au}$에 해당되는 H와 G의 열벡터

식 2.5.20으로부터 다음과 같은 표현법을 도입한 후,

$$[G] = -\rho_o s^2 [G] \tag{2.5.21}$$

식 2.5.20을 몇 개의 다른 경계조건으로 분류할 수 있다. 즉, 임피던스 경계조건, 음향 경계조건, 접촉부 경계조건 등을 세분하여 분류하면 복잡한 경계조건의 문제

들을 해결하는 데 도움이 된다.

식 2.5.21을 식 2.5.20에 대입한 후 분류된 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$[-[H_u]_l[G_r]_l-[H_u]_B[G_u]_B-[H_u]_z[G_u]_z]\times\begin{bmatrix}\{\overline{P}_u\}_l\\ \{\overline{U}_{au}\}_l\\ \{\overline{P}_u\}_B\\ \{\overline{U}_{au}\}_B\\ \{\overline{P}_u\}_z\\ \{\overline{U}_{au}\}_z\end{bmatrix}=[H_k\ \ G_k]\begin{bmatrix}\overline{P}_k\\ \overline{U}_{ak}\end{bmatrix} \qquad (2.5.22)$$

여기서,

$[H_u]_l$, $[G_u]_l$: 접촉경계면에서 계산되어져야 하는 $\{\overline{P}_u\}_l$와 $\{\overline{U}_{au}\}_l$에 해당하는 열벡터 $[H]$와 $[G]$로 이루어진 행렬

$[H_u]_B$, $[G_u]_B$: 음향경계면에서 계산되어져야 하는 $\{\overline{P}_u\}_B$와 $\{\overline{U}_{au}\}_B$에 해당하는 열벡터 $[H]$와 $[G]$로 이루어진 행렬

$[H_u]_z$, $[G_u]_z$: 임피던스 경계면에서 계산되어져야 하는 $\{\overline{P}_u\}_z$와 $\{\overline{U}_{au}\}_z$에 해당하는 열벡터 $[H]$와 $[G]$로 이루어진 행렬

2.5.3 구조-음향 연성해석을 위한 행렬방정식 해석

구조물과 음향계의 접촉부에서 경계조건들은 양립과 평형 연성조건을 만족하여야 한다. 여기서, 먼저 양립의 조건을 먼저 생각하여 보자. 접촉 경계면에서 보면 구조물의 변위와 음향계의 변위는 일치하며, 식 2.5.23과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^a\cdot n^a = u\cdot a \qquad (2.5.23)$$

여기서, n^a는 음향계에서 바깥방향으로의 법선벡터를 나타내고, n은 구조물에서 바깥방향으로의 법선벡터를 나타낸다. 그리고 또한 u^a와 u는 음향계와 구조물의 각각의 변위영역을 나타낸다.

식 2.5.23에 라플라스 변환을 하여 정리하면 식 2.5.24와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{u}^a \cdot n^a = \overline{u} \cdot n \tag{2.5.24}$$

경계면에서, 변위와 압력의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_o \frac{\partial^2 u^a}{\partial t^2} \tag{2.5.25}$$

또한, 식 2.5.25를 라플라스 영역으로 옮기면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial \overline{p}}{\partial x} = -\rho_o s^2 \overline{u}^a \tag{2.5.26}$$

특히, 경계면에서 단위법선 방향으로 방향도함수(directional derivative)를 적용하였을 경우 식 2.5.27과 같이 정리할 수 있으며,

$$\frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \cdot n = \frac{\partial \overline{p}}{\partial n} = -\rho_o s^2 \overline{u}^a \cdot n^a \tag{2.5.27}$$

식 2.5.24를 식 2.5.27에 대입하면 접촉면에서 라플라스 변환된 양립 조건을 얻을 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial n} = -\rho_o s^2 \bar{u} \cdot n \tag{2.5.28}$$

구조물의 일반적인 변위량은 형상함수 $[N]$을 이용하여 절점에서의 변위량으로 표현할 수 있다.

그러므로, 절점 i에서의 변위량은 구조물과 음향계의 접촉부에서도 마찬가지로 변위량에 대해서 식 2.5.29와 같은 방법으로 표현할 수 있다.

$$u_i = [N_i][a_i] \tag{2.5.29}$$

$$\bar{u} = [N]\{\bar{a}\} \tag{2.5.30}$$

여기서, 식 2.5.28과 식 2.5.30을 결합시키면 구조-음향 접촉면에서 양립 조건을 만족시키는 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial n} = -\rho_o s^2 [N]\{\bar{a}\} \cdot n \tag{2.5.31}$$

다음으로 접촉부에서의 평형조건에 대해서 고려하여 보자. 접촉부에서 구조물의 진동에 의한 법선방향의 힘, q_n은 접촉부에서의 음압의 총합, p^a와 크기가 같고 방향이 반대이다.

$$q_n = -p^a \tag{2.5.32}$$

일반적으로, 접촉부에서의 구조물의 법선력은 형상함수 $[N]$과 표현함수 $\{T\}$를 이용하여 식 2.5.33과 같이 표현된다.

$$q_n = \int\int_s [N]^T \{T\} \cdot n ds \tag{2.5.33}$$

여기서, $\{T\}$대신에 경계면에서의 가진 압력, $\{p_l\}$로 대치하고 식 2.5.32와 식 2.5.33을 결합하면, 접촉부에서 평형조건을 얻을 수 있다.

$$p^a = -\int\int_s [N]^T \{p_l\} \cdot n ds \tag{2.5.34}$$

라플라스 변환영역에서 식 2.5.34는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{p^a} = -\int\int_s [N]^T \{\overline{p}_l\} \cdot n ds \tag{2.5.35}$$

앞에서 구한 연성조건들은 행렬방정식에 적용하여 행렬방정식의 연성조건들을 구할 수 있다. 평형과 양립조건을 고려하여 식 2.5.22의 음향계에 대한 행렬방정식을 다시 쓰면,

$$\left[\left[\overline{G}_N \right] - [H_u]_l - [H_u]_B \left[\overline{G}_u \right]_B - [H_c]_z \right] \times \begin{bmatrix} \{\overline{a}\}_l \\ \{\overline{P}_u\}_l \\ \{\overline{P}_u\}_B \\ \{\overline{U}_{au}\}_B \\ \{\overline{P}_u\}_z \end{bmatrix} = [H_k \;\; \overline{G}_k] \begin{bmatrix} \overline{P}_k \\ \\ \overline{U}_{ak} \end{bmatrix} \tag{2.5.36}$$

$$\begin{aligned} \left[\overline{G}_N \right] &= [\overline{G}_u]_l [N] \\ [\overline{H}_G]_z &= -[H_u]_z + [G_u]_z [Z_a] \end{aligned} \tag{2.5.37}$$

접촉부에서 구조물에 대한 행렬방정식 또한 연성을 위하여 다시 쓰면,

$$[A_s \;\; N_l^T]\begin{bmatrix} \overline{a} \\ \overline{p}_l \end{bmatrix} = [N^T \;\; 0]\begin{bmatrix} \overline{P} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.5.38}$$

여기서, 식 2.5.36과 식 2.5.38을 합치면 구조-음향 연성해석을 위한 FEM과 BEM의 연성된 최종 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_s & -N_l^T & 0 & 0 & 0 \\ [\overline{G}]_N & -[H_u]_l & -[H_u]_B & [\overline{G}_u]_B & -[\overline{H}_c]_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \{\overline{a_l}\} \\ \{\overline{P}_u\}_l \\ \{\overline{P}_u\}_B \\ \{\overline{U}_{au}\}_B \\ \{\overline{P}_u\}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N^T & 0 & 0 \\ 0 & H_k & \overline{G}_k \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \overline{P} \\ \overline{P}_k \\ \overline{U}_{ak} \end{bmatrix} \tag{2.5.39}$$

제 3 장 실험장치 구성 및 방법

3.1 상변화 열전달 실험

본 연구에서는 상변화 열전달 실험을 위한 상변화 물질로서 파라핀을 선정하고, 파라핀의 종류 중에서 n-Octadecane을 선택하였다. n-Octadecane은 다른 정제된 파라핀에 비해 가격이 저렴하고, 용융온도가 상온보다 높기 때문에 상변화 영역에서의 상변이가 안정적으로 이루어질 수 있다. 본 연구에서 사용된 파라핀의 물성치는 제조사(Shinyo Pure Chemical Co.)에서 제시한 값을 인용하였고 그 물성치는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 Thermophysical properties of paraffin (n-Octadecane)

Properties	Unit	Value
Melting Temperature	℃	53.2
Boiling Temperature	℃	315
Thermal Conductivity of Solid	W/m · K	0.242
Thermal Conductivity of Liquid	W/m · K	0.336
Solid Density	kg/㎥	820
Liquid Density	kg/㎥	863.03
Specific Heat	kJ/kg · K	2,872.47
Viscosity	㎡/s	0.00028
Heat of Fusion	kJ/kg	241.6
Thermal Expansion Coefficient	-	0.001

본 연구에서 실험은 압전소자의 진동에 따른 열전달 특성을 알아보기 위해, 용융용기 내에서 상변화 물질의 용융과정에 따른 열전달 특성 실험과 유동장의 가시화 실험으로 나누어 수행하였다. Fig. 11은 상변화 열전달 실험을 위한 실험장치의 개략도를 보여주는 것으로, 실험장치의 구성은 크게 가열을 위한 장치, 초음파 진동장치 그리고 액상파라핀의 물리적 거동을 관찰하기 위한 가시화부로 나누어진다.

용융용기 내부의 크기는 가로 × 세로 × 높이가 각각 150mm가 되도록 제작하였고, 용융용기의 벽면을 통한 대기중으로의 열손실을 최소화하기 위해 용기외부에 석면판, 압축 스티로폼과 베이크라이트로 단열처리를 하였으며 용기 상부에는 파이렉스글라스(pyrex glass)를 덮어 외부로 열이 방출되지 않으면서 용기내부를 관측할 수 있도록 하였다.

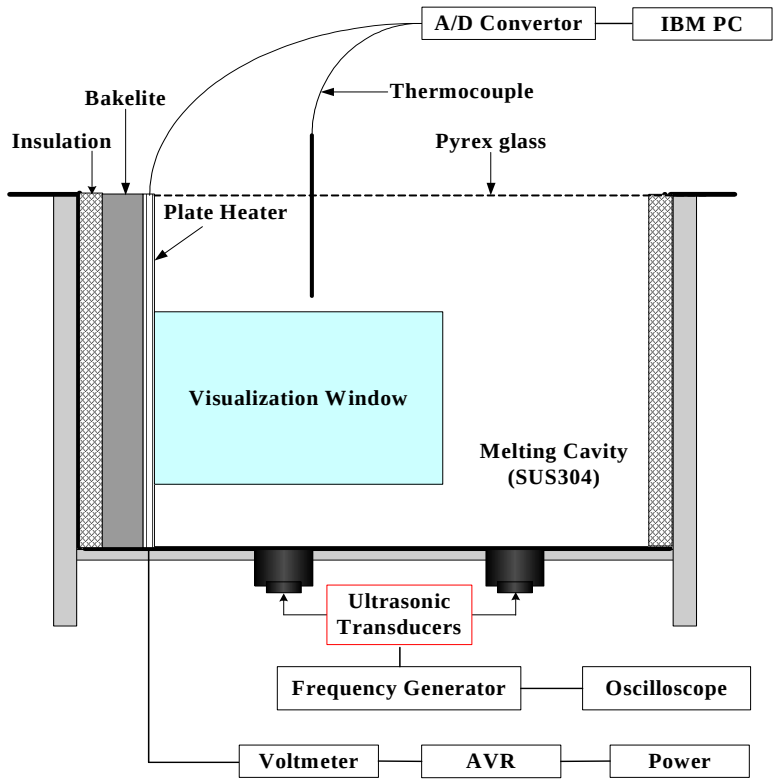


Fig. 11 Schematic diagram of phase change experimental set-up

3.1.1 가열을 위한 실험장치

본 연구에서는 상변화 물질의 용융을 위한 가열방식으로, 등열유속 가열조건(constant heat flux condition)을 선정하였다. 등열유속 가열조건은 일정한 전압을 히터에 인가하여 가열하는 방식으로 가열이 지속되는 동안 가열면의 온도는 히터의 용량에 따라 지속적으로 상승하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 일정한 열유속 조건을 구성하기 위해 자동전압공급장치(automatic voltage regulator, AVR)을 사용하여 인가된 전압을 판히터에 공급하도록 하였고, 히터에 공급된 전압은 전압계(voltmeter)를 이용하여 실시간으로 모니터링 하도록 하였다. 또한, Fig. 12에서 보는 바와 같이, 가열을 위해 사용된 판히터는 SUS304, 운모(mica), 칸달(cantal)로 구성하고 일정한 열량을 공급할 수 있게 하였으며, 가열이 지속되는 동안 발생된 열유속이 용융용기 내의 상변화 물질인 파라핀에만 공급될 수 있도록 하기 위해 히터의 발열부를 제외한 나머지 부분은 석면과 베이크라이트를 사용하여 절연처리 하였다.

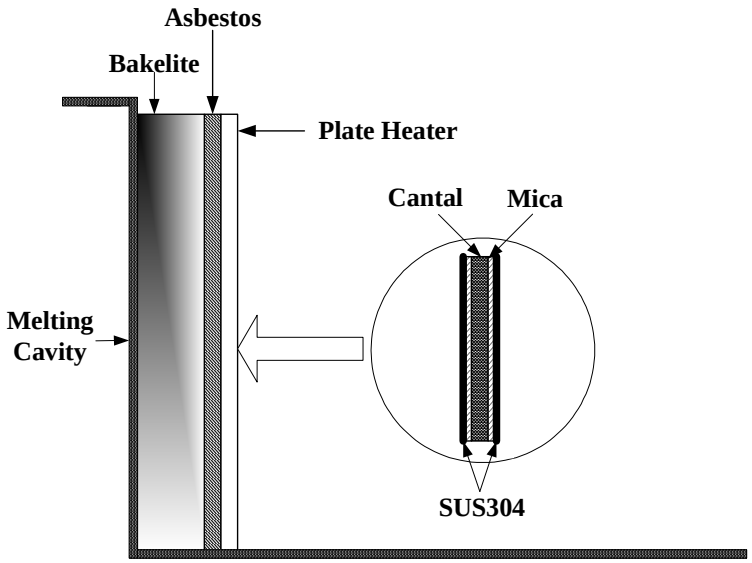


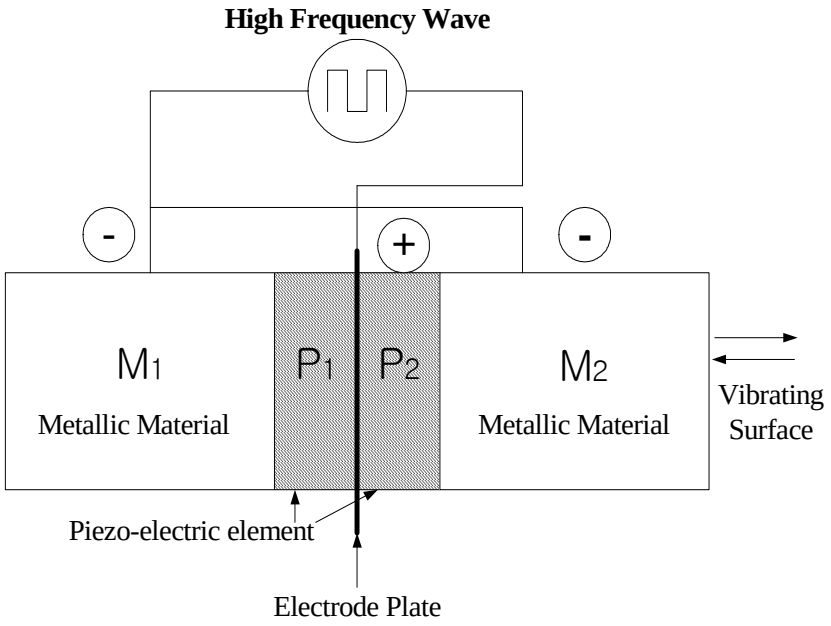
Fig. 12 Sectional view of a plate heater and heating region

3.1.2 초음파 진동장치

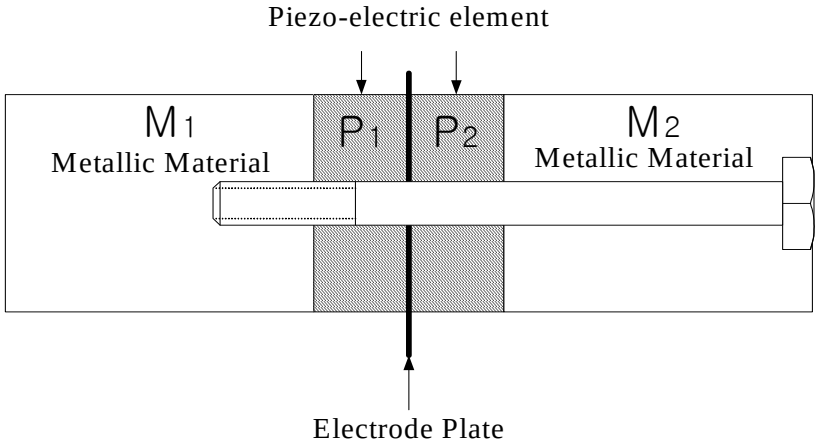
본 연구에서는 압전소자에 의해 진동을 유발시킬 수 있도록, 2개의 금속체 사이에 압전소자를 끼운 구조로 되어있는 란즈방형 진동자(langevin type transducer)를 초음파 진동자로 사용하였다.

Fig. 13(a)는 란즈방형 진동자의 구성을 나타낸 것으로, 서로 마주보고 있는 두 장의 압전소자 P_1, P_2 사이에 전극판 S를 끼우고 압전소자 좌우에 금속체 M_1, M_2를 샌드위치형으로 끼워 하나의 진동체를 구성하도록 되어 있다. 그러나 란즈방형 진동자의 경우, 각 부품간의 접촉이 충분히 이루어지지 못하기 때문에 접착제를 사용하여야 하고, 이는 압전소자에서 발생되는 높은 열량과 각 부품간의 열팽창으로 인하여 접착성능이 떨어져 큰 동력전달에 있어서 매우 취약하다. 따라서 이를 보완하기 위해, 개선된 볼트 조임 란즈방형 진동자(bolt clamped langevin type transducer, BLT)를 선정하여 본 연구에서 사용하였으며, Fig. 13(b)에 개략도를 나타내었다. 볼트 조임 란즈방형 진동자는 직경이 40mm이고, 40 ± 1kHz의 주파수를 방사할 수 있도록 설계되어 있으며, 용융용기에 장착된 진동자는 특수접착제 및 자동가열 등을 통한 고도의 진동자 접착기술을 적용하여 고강도로 접착하고 진동자가 이탈되는 것을 방지하도록 하였다.

또한, 실험과정 동안 용융용기 내에 40kHz의 일정한 주파수를 발생시킬 수 있도록 주파수 발생장치(frequency generator)를 제작하여 사용하였고, 40kHz의 고정 주파수와는 별도로 출력강도를 70W에서 340W까지 변화시킬 수 있도록 하였으며, 주파수 발생장치에서 초음파 진동자로 공급되는 주파수는 오실로스코프를 이용하여 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 하였다.



(a) Langevin type transducer



(b) Bolt clamped langevin type transducer

Fig. 13 Schematic diagram of ultrasonic transducers

3.1.3 가시화 실험장치

본 연구에서 가시화 실험은 상변화 열전달 과정에 있어 용융용기 내에 초음파 진동이 가진될 경우, 액상파라핀의 유동장 내에서 발생하는 물리적 거동을 가시적으로 고찰해 보기 위해 입자영상추적계와 적외선열화상카메라를 사용하였다.

파라핀의 용융과정에서 발생하는 물리적 거동의 관찰을 위해, Fig. 14에서 보는 바와 같이, 가로, 세로의 크기가 각각 100mm인 가시화 창을 용융용기 외부 벽면에 특수 제작하였다. 입자영상추적계는 Argon-Ion Laser와 CCD카메라, CCD제어기, 이미지보드 및 해석프로그램(cactus2000)으로 구성되어 있고, 적외선열화상카메라는 AGEMA 사의 Thermovision 900을 사용하였으며, Fig. 14는 가시화 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

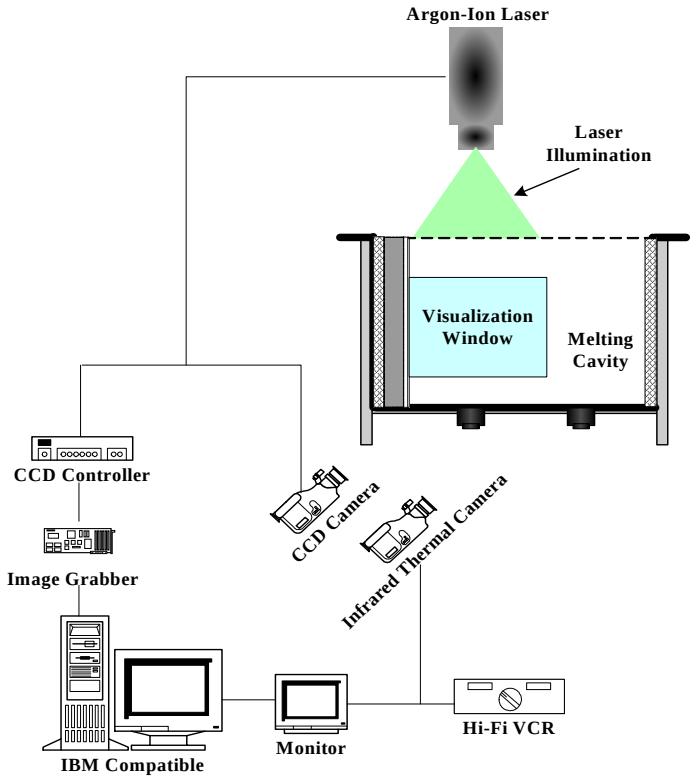


Fig. 14 Schematic diagram of experimental set-up for visualization in PCM

3.1.4 실험방법 및 절차

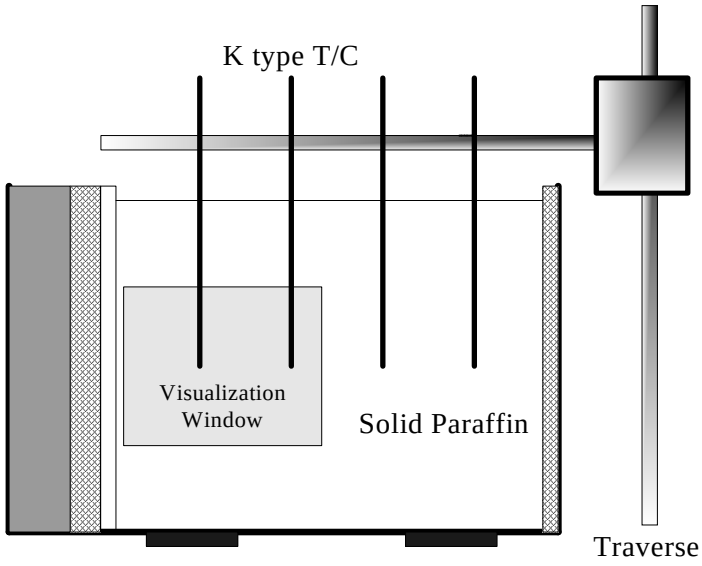
실험은 먼저, 상변화 물질로 선정한 고체 상태의 파라핀을 가열하여 용융액으로 만든 후 용융용기에 120mm 높이 즉, 특성높이(characteristics height)까지 채워 넣고 응고시켜 완전 응고된 파라핀의 온도가 실내온도와 같도록 20℃의 상온에서 하루 동안 놓아두었다. 그리고 액상파라핀이 응고되는 과정에서 수축으로 인해 발생된 함몰부위와 표면을 평평하게 하기 위해 파라핀 용융액을 보충하여 주고 표면의 불규칙한 면을 긁어내는 과정을 실시하였다.

앞의 3.1.1에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 가열조건으로 등열유속조건을 선정하였고 일정한 열유속 경계조건은 ±20%의 입력전압에 따른 변동에도 ±1%의 오차로 출력전압을 유지할 수 있는 정전압 공급장치를 사용하였다. 또한, 열유속(q'')은 판히터의 단면적(A)과 판히터에 가해지는 전류(I)와 전압차(V)를 토대로 계산된 저항값을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

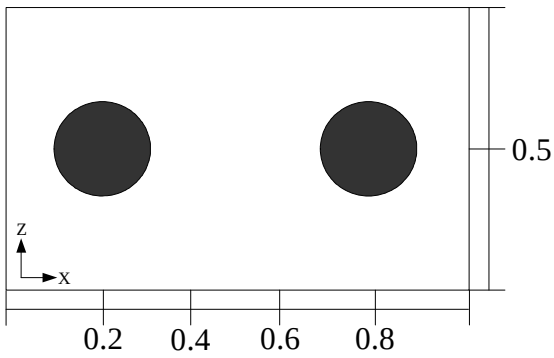
$$q'' = \frac{I^2 \cdot R}{A} \quad , \quad (R = \frac{V}{I}) \tag{3.1.1}$$

한편, 상변화 물질인 파라핀을 용융하기 위한 가열히터의 열유속 선정에 있어서 파라핀 즉, n-Octadecane의 온도가 200℃ 이상으로 가열되는 경우에는 탄소결합의 붕괴로 인해 파라핀의 물성치가 쉽게 변할 수 있다[81]는 실험조건의 제약으로 인해, 본 연구에서는 액상파라핀의 온도가 200℃를 넘지 않고 용융현상이 끝날 때 까지 안정적인 열유속을 공급할 수 있도록 다음과 같은 열유속 조건을 선정하여 실험을 수행하였다.

1) q" = 6436.21 W/m^2 (Ra* = 3.25 × 10^7)
2) q" = 11517.43 W/m^2 (Ra* = 5.82 × 10^7)



(a) Front view



(b) Bottom view

Fig. 15 Schematic diagram of test section showing the position of thermocouples and ultrasonic transducers

상변화 물질인 파라핀의 용융과정에서 열전달 현상을 고찰하기 위해, 판히터 표면에 K-type의 열전대를 부착하여 고정시키고 히터표면의 온도분포를 측정하였다. 또한, 파라핀 내부에 발생하는 온도측정을 위한 실험은 Fig. 15(a)에서 보는 바와 같이 K-type 열전대를 사용하여 파라핀의 용융과정 동안 온도를 측정하였으며, 측정지점은 Fig. 15(b)에 나타낸 바와 같다. 이 때 0.1mm의 정밀도를 가진 위치제어장치(traverse)를 사용하여 열전대의 위치를 정확하게 제어할 수 있도록 하였고, 온도측정 데이터는 동일한 조건 하에서 용융을 3회 실시하여 평균온도를 실험결과 값으로 사용하였다. 그리고 열전대를 통해 측정된 온도데이터는 데이터획득장치(data acquisition unit, DA100)에 의해 매 1분마다 PC에 저장하도록 하였다.

(a) Winding a thermocouple with insulation tape

(b) Sheathing a thermocouple in a stainless steel tube

Fig. 16 Photograph the insulation process of a thermocouple

정확한 온도측정을 위해서 실험 전에 모든 열전대들은 온도보정을 실시하였고, Fig. 16에서 보는 바와 같이 모든 열전대는 온도측정부분을 제외한 나머지 부분을 스테인리스튜브와 절연테잎을 사용하여 절연처리 하였으며 열전대 자체를 통한 열전도 현상을 최소화 하였다.

본 연구에서는 상변화 물질인 파라핀의 용융과정 동안 파라핀 내의 유동장에 음장을 형성하기 위해 40kHz의 초음파 진동을 가진하였다. 초음파 진동을 가진하기 위해 사용된 주파수 발생장치는 앞서 언급한 바와 같이, 고정된 40kHz의 발진주파수를 갖고 있지만 초음파 진동 강도의 영향이 상변화 열전달에 미치는 영향을 알아보기 위해 전압출력을 70W ~ 340W로 변화시키면서 용융을 실시할 수 있도록 하였다. 또한, 실험이 지속되는 동안 주파수 발생장치로부터 발생되는 40kHz의 주파수를 오실로스코프를 이용하여 모니터링 하였고, Fig. 17은 오실로스코프에서 모니터링 된 40kHz의 주파수 파형을 나타낸 것이다.

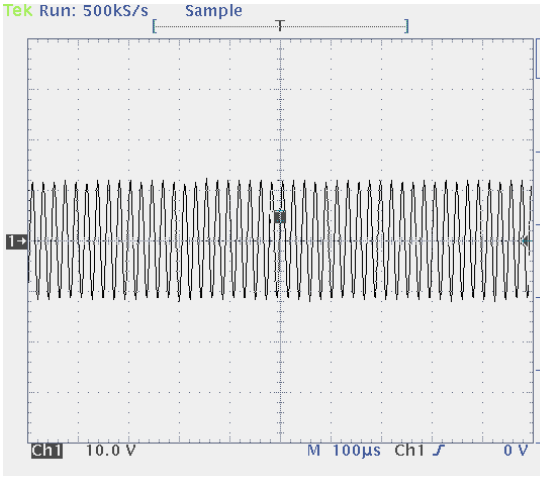


Fig. 17 Wave form of 40kHz measured at a frequency generator

가시화 실험은 액상파라핀 내에서 초음파 진동의 가진으로 인해 발생하는 물리적 거동을 확인하기 위해, 가시화 입자인 나일론 12를 용융용기 내에 투입하고 가진된 초음파 출력에 따라 Argon-Ion Laser의 출력을 조정하여 시험부에 수직으로 가시광을 조사하였다. 또한, 용기외부의 가시화창을 이용하여 레이저 가시광에 의해 형성된 조사단면과 수직인 방향에 CCD카메라를 설치한 후 초당 30프레임의 속도로 영상촬영을 실시하였으며, 획득된 영상은 이미지보드를 통해 이미지 파일로 변환시켜 PC에 저장하였다. 그리고, 저장된 이미지들은 상호상관알고리즘을 적용한 해석프로그램인 Cactus2000을 이용하여 해석하고 분석하였다.

또한, 액상파라핀 내에서의 열유동 현상을 확인해 보기 위해, 적외선열화상카메라를 용융용기의 가시화창 정면에 설치하고 가시화 창 의 표면에서 실시간으로 측정되는 온도분포와 영상을 이미지보드와 PC를 이용하여 저장, 분석하도록 하였다.

3.1.5 수치해석 방법 및 절차

본 연구에서는 초음파 진동을 가진하였을 때 액상파라핀내에 발생하는 음압분포를 고찰해 보기 위해, 결합형 유한요소-경계요소법을 이용하여 수치해석적으로 계산해 보았다. 이를 위해, 초음파 진동에 의해 파생되는 각종 물리량을 유한요소법을 이용하여 계산한 후, 액상영역에서의 음압 분포를 경계요소법을 적용하여 해석하였다.

먼저, 유한요소법에 의한 평판의 수치해석은 Fig. 11의 초음파 진동자가 부착된 진동판 밑면을 유한요소법을 이용하여 Fig. 18과 같이 모델링하고 진동판의 진동해석을 수행하였다.

이 때 진동부의 해석을 위한 선행조건은, 진동판 밑면에 부착된 진동자들이 가진하였을 때 진동판에는 횡진동이 발생하게 되고, 한 진동부 안의 진동자들은 하나의 발진기에 의해 구동되며 모두 병렬로 연결되어 있기 때문에 동일 위상의 진동을 진동판에 가하는 것으로 전제하였다.

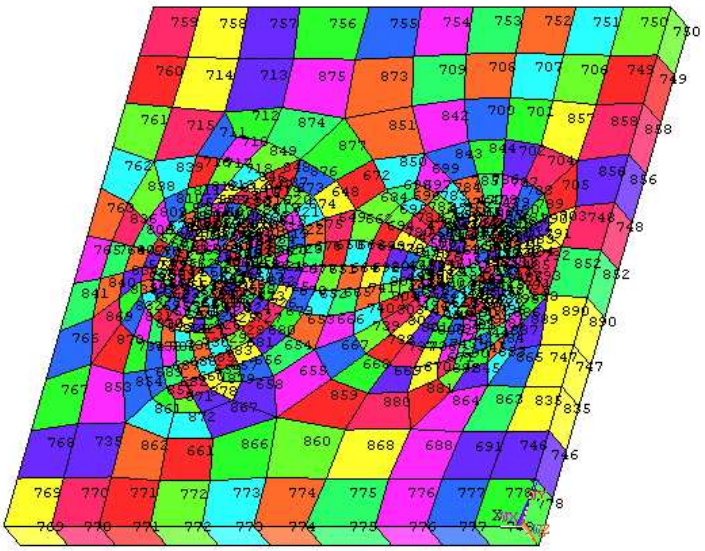


Fig. 18 Finite element model for a vibrating plate

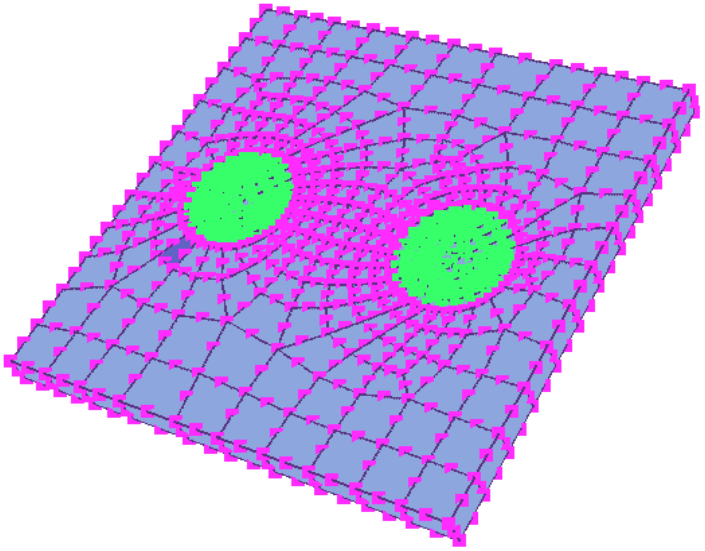


Fig. 19 Fixed boundary condition of boundary element model

Fig. 18의 진동부 해석모델은 ANSYS^{TM}의 Brick 20 node type 95를 이용한 후 전처리기를 사용하여 약 215개의 element와 1614개의 node로 구성되는 유한요소 모델링을 실시하였으며, 경계요소 해석을 위하여 SVS의 Node 정렬 순서에 맞게 재배열하여 Fig. 19와 같이 진동부의 모델링을 완성하였다. 또한, Fig. 19에서 보는 바와 같이 중앙부분의 동그라미를 형성하고 있는 진동자가 부착된 영역을 제외한 나머지 영역에 고정조건을 부여하고, 실험조건과 동일한 40kHz의 주파수를 진동자에 설정하였을 때 진동부만 상하진동을 일으킬 수 있도록 하였다.

다음으로, 음향해석을 위한 경계요소법을 이용한 수치해석에서는 element의 크기를 파장의 1/5 이내로 설정하였다. 일반적으로 액상파라핀에서 전파속도 c는 온도에 따라 다르지만 대략 1,000m/sec이고, 진동주파수 f는 40kHz이기 때문에 파장 $\lambda(=c/f)$는 약 25mm이다. 따라서, element 크기의 최대 한계는 약 5mm이지만, 실제 해석을 위한 모델링에서는 이보다 훨씬 작은 3.5mm 크기의 element를 사용하였고, 이는 주파수의 진동을 해석하는 데에 필요한 기본조건을 충족시킬 수 있는 상태에서 해석이 진행되었다고 할 수 있다.

여기서, 경계요소법을 이용한 해석의 선행조건으로는 스테인리스강으로 구성되어 있는 진동판의 음향임피던스가 액상파라핀의 음향임피던스보다 훨씬 커서 액상영역내에서 초음파 자체가 진동판의 진동에 영향을 거의 미치지 못하게 됨을 감안하여, 일방연성된 문제로 간주하고 해석을 수행하였다. 또한, 일반적으로 실제 발생하는 파동은 매질내에서 에너지 손실에 의해 그 크기가 감소하게 된다. 특히 기체에서 손실이 상당히 크기 때문에 공동현상(cavitation)에 의해 발생된 기포를 초음파가 통과할 때 이러한 파동은 감쇄가 일어나게 된다. 그러나, 본 경계요소 해석에서는 이러한 영향을 무시하고 에너지 손실이 없는 전파에 대한 해석을 수행하였다.

3.2 열전냉각장치의 열전달 실험

본 연구에서는 열전소자를 이용하여 열전냉각장치의 냉각특성을 알아보기 위해, 열전소자의 발열부와 냉각부에서 전압인가에 따른 온도분포 측정 실험과 가시화 실험으로 나누어 수행하였다. Fig. 20은 열전소자를 이용한 열전냉각장치의 열전달 실험을 위한 실험장치의 개략도를 보여주는 것으로, 실험장치의 구성은 크게 열전소자를 이용한 열전냉각 실험장치, 압전 액츄에이터 장치, 그리고 열전소자의 냉각면에서 발생하는 열전달 현상을 관찰하기 위한 가시화부로 나누어진다. 또한, 열전냉각장치의 열전달 실험을 위한 시험부를 구성하기 위해, 가로 × 세로 × 높이가 각각 150mm인 1.5mm 두께의 투명아크릴을 제작하여 열전냉각장치와 압전 액츄에이터를 용기 내부에 장착하고 공기의 흐름을 원활하게 하기 위해 용기의 상부는 개방시켜 두었다.

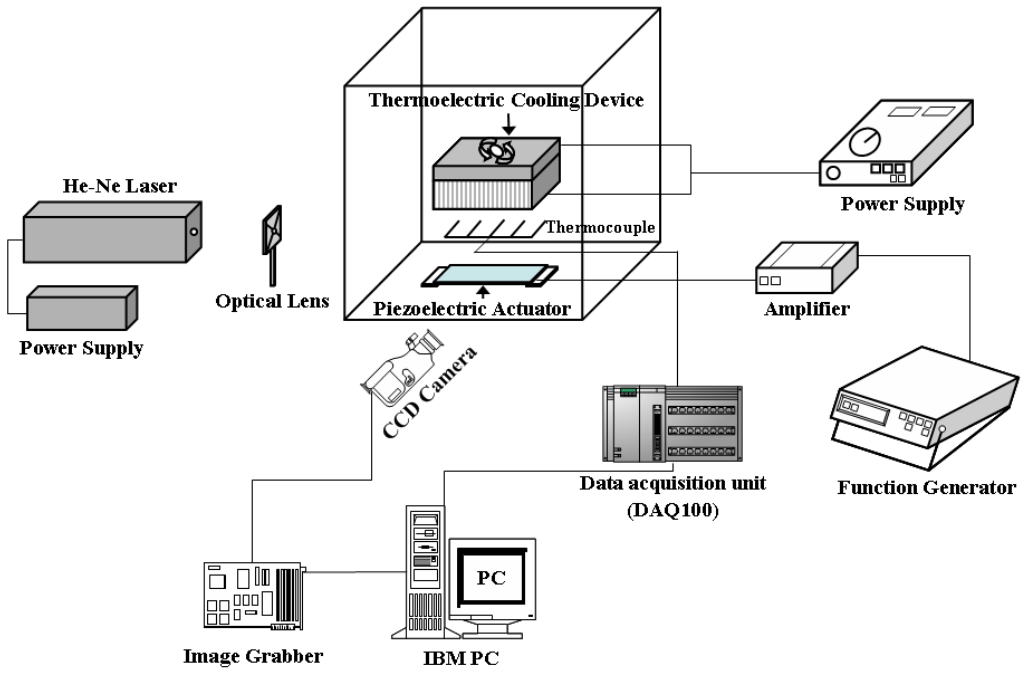
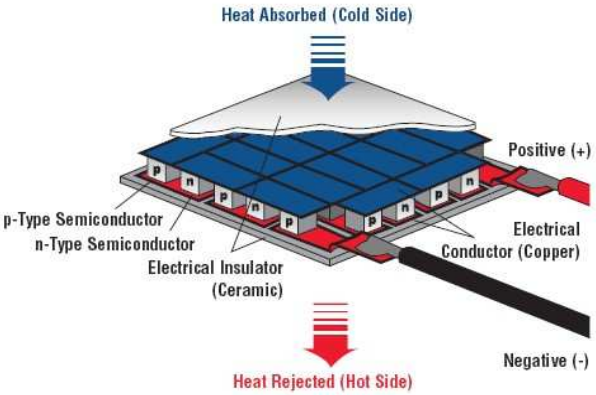


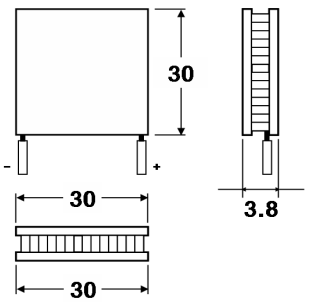
Fig. 20 Schematic diagram of thermoelectric cooling experimental set-up

3.2.1 열전냉각 실험장치

본 연구에서는 컴퓨터 CPU나 레이저 발진기 등에서 발열부의 냉각을 위해 많은 응용이 이루어지고 있는 열전소자를 이용하여 열전냉각 실험장치를 구성하였다. Fig. 21은 본 연구에서 적용한 열전소자(Melcor®, Model : CP1.4-71-06L)의 구성과 크기를 보여주는 것으로, 전압을 공급하였을 때 발열면과 냉각면이 동시에 발생할 수 있도록 p형 반도체와 n형 반도체의 접합으로 구성되어 있다. 또한, 열전소자의 크기는 가로 × 세로 × 높이가 각각 30mm × 30mm × 3.8mm이고, 71쌍의 p-n 접합으로 이루어져 있으며, 열전소자의 주요 Spec.은 Table 2에 정리하여 나타내었다.



(a) Composition



(b) Dimensions

Fig. 21 Schematic diagram of thermoelectric module

Table 2 Performance specifications of thermoelectric module

Specifications	Unit	Value
Hot Side Temperature (T_h)	℃	25
Q_{max}	W	28.7
I_{max}	A	6.0
V_{max}	V	8.6
ΔT_{max}	℃	67
Module Resistance	Ω	1.26
Number of Thermocouples (p-n Type semiconductor)	pair	71

Fig. 22는 열전냉각 실험장치의 구성을 보여주는 것으로, 열전소자, 열전소자의 발열면 냉각을 위한 방열판(heat sink)과 냉각팬(cooling fan)으로 이루어져 있다. 열전소자에 공급되는 전압은 열전소자의 최대허용전압인 8.6V와 방열판, 냉각팬의 용량을 고려하여 5V로 설정하였고, 정전압 공급장치를 사용하여 인가된 전압을 열전소자에 공급하도록 하였다. 또한, 열전소자의 발열면 냉각을 위한 방열판은 컴퓨터 CPU의 방열판으로 사용되고 있는 알루미늄 재질로 된 가로 × 세로 × 높이가 각각 75mm × 60mm × 35mm인 제품을 선정하여 사용하였고, 방열판의 냉각을 위해 24V, 0.13A의 용량을 갖는 냉각팬을 사용하였다. 냉각팬의 구동을 위한 전압 또한 정전압공급장치를 이용하여 24V의 전압을 공급하도록 하였다.

열전소자의 발열면과 방열판의 방열면 사이에 방열 컴파운드(heat sink compound)를 도포하고 열전소자를 방열판에 부착시켰다. 이는 열전소자와 방열판의 접촉저항에 의한 열손실을 최소화시키고 열전도율을 극대화하기 위한 것이다. 또한, 열전소자가 부착된 방열판은 0.1mm의 정밀도를 가진 위치제어장치를 이용하여 위치조절이 가능하도록 하였다.

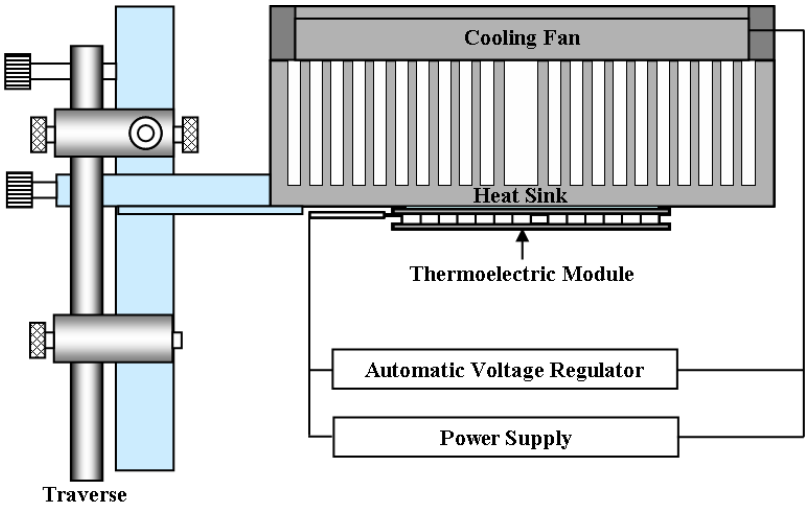
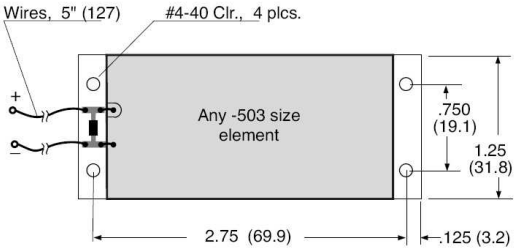


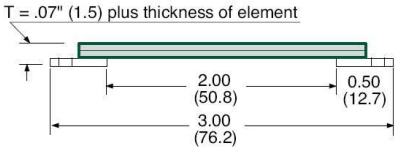
Fig. 22 Schematic diagram of thermoelectric cooling system

3.2.2 압전 액츄에이터 장치

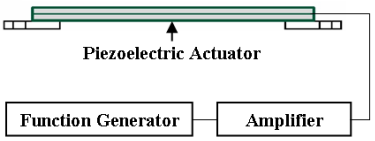
본 연구에서는 열전냉각장치의 냉각영역에 음장을 형성하여 열전달 현상을 고찰하고 냉각성능을 개선하기 위해 압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)를 사용하였다. 앞 3.1절의 상변화 열전달 실험에서는 유동장에 음장을 형성하고 열전달 현상을 고찰하기 위해 초음파 진동자를 사용하였으나, 열전냉각장치 열전달 실험의 경우는 공기 중에 음장을 형성하여야 하는 점을 감안하여, 초음파 진동자와 유사한 압전소자를 이용한 압전 액츄에이터를 사용하였다.

Fig. 23은 본 연구에서 사용된 압전 액츄에이터(Piezo Systems, Inc., Model : 503-Double Quick Mount Transducer)의 규격 및 장치구성을 보여주고 있는 것으로, 펑션 제네레이터(function generator)로부터 발생된 Sine파형은 증폭기(amplifier)의 신호입력(signal input) 단자로 공급되고 증폭기의 신호출력(signal output) 단자에서 압전소자(piezoelectric element)의 (+), (-)단자로 약 50Hz의 주파수가 공급되어 압전 액츄에이터를 가진시킨다.





(a) Dimensions



(b) Experimental set-up for vibration of piezoelectric element

Fig. 23 Schematic diagram of piezoelectric actuator

Table 3은 압전 액츄에이터의 주요 Spec.을 제조사에서 제시한 값을 준용하여 나타낸 것이다.

Table 3 Performance specifications of piezoelectric actuator

Specifications	Unit	Value
Weight	g	10.4
Stiffness	N/m	188
Capacitance	nF	232
Rated Voltage	$\pm V_P$	± 90
Resonant Frequency	Hz	52
Free Deflection	±㎛	± 1,600
Blocked Force	±N	± 3.0

3.2.3 가시화 실험장치

본 연구에서 가시화 실험은 열전냉각장치의 냉각면에서 발생되는 냉각영역에 압전 액츄에이터를 가진하였을 경우 시험부에 발생하는 유동현상을 가시적으로 고찰해 보기 위해 CCD카메라를 이용하였다. Fig. 24는 열전냉각장치와 압전 액츄에이터 사이의 유동현상을 고찰하기 위한 실험장치의 개략도로서, 투명아크릴로 제작된 용기 내부에 35mW 고출력 He-Ne Laser로부터 방사된 레이저 가시광은 Optical Lens에 의해 시험부에 조사단면을 형성하고 CCD카메라(Sony, XC-HR300)를 통해 시험부에서 발생하는 유동현상을 관측하여, Image Grabber(Matrox, Meteor-Ⅱ MC/4)에 의해 이미지를 획득, PC에 저장하도록 하였다. 또한, 상변화 열전달 실험에서 사용하였던 적외선열화상카메라를 사용하여 열전소자의 냉각면에서 형성되는 온도분포와 영상을 이미지보드와 PC를 이용하여 저장, 분석하도록 하였다.

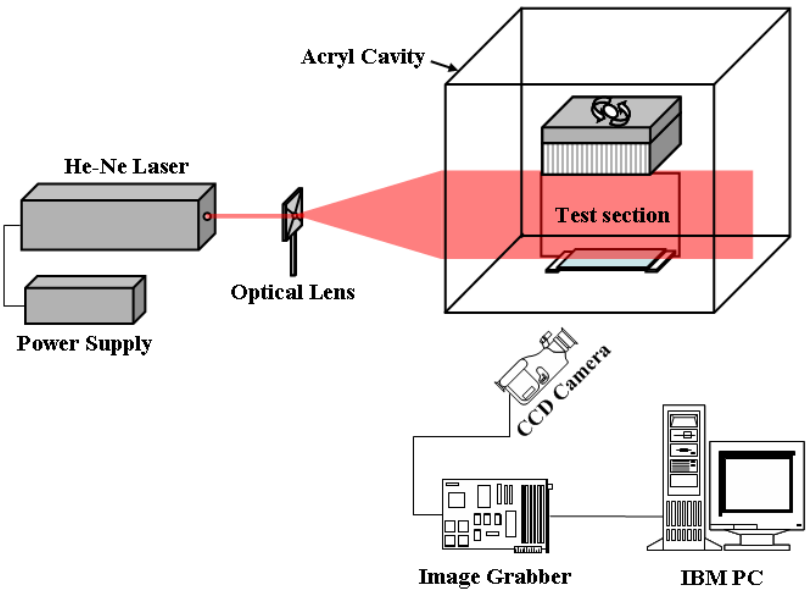


Fig. 24 Schematic diagram of experimental set-up for visualization in a thermoelectric cooling system

3.2.4 실험방법 및 절차

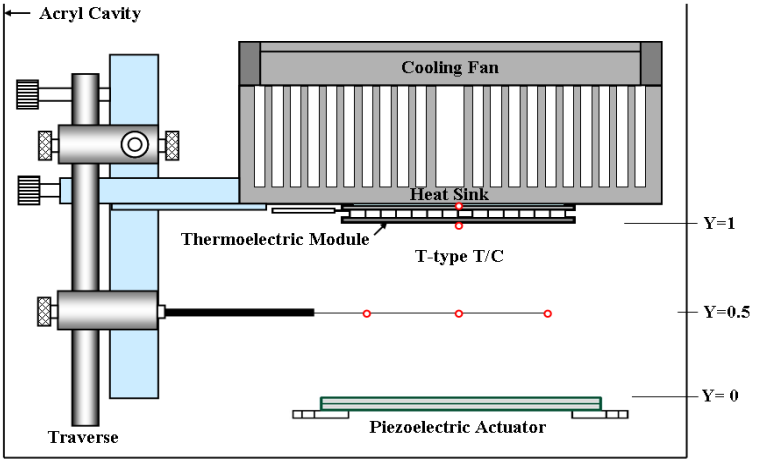
본 연구에서는 제작된 투명아크릴 용기 내에 열전소자, 방열판, 냉각팬을 사용하여 제작한 열전냉각장치와 압전 액츄에이터를 고정시키고, 열전소자의 냉각면과 압전 액츄에이터 사이의 간격을 조절하면서 냉각영역에서 발생하는 열전달 특성 실험을 수행하였다.

열전달 프로세스의 구성은, 열전소자에 5V의 전압을 공급하였을 때 열전소자의 발열면에서 급속도로 발생하는 고온의 열원을 방열판과 냉각팬을 이용하여 냉각시키고 열전소자의 냉각면에서 발생되는 냉온에 의해 냉각영역이 형성되도록 하였다. 이때, 열전소자의 발열면에서는 고온의 열원이 급속도로 발생하기 때문에 이를 냉각시키지 않고 계속 작동시켰을 경우 열전소자는 파손될 우려가 있다. 따라서, 열전소자에 전압을 공급하기 전, 열전냉각장치의 방열판에 부착되어 있는 냉각팬을 먼저 구동시킨 후, 열전소자를 작동시켜 발열면의 발열온도을 일정하게 유지하여 냉각면의 냉각영역에 열전달 프로세스를 형성하였다.

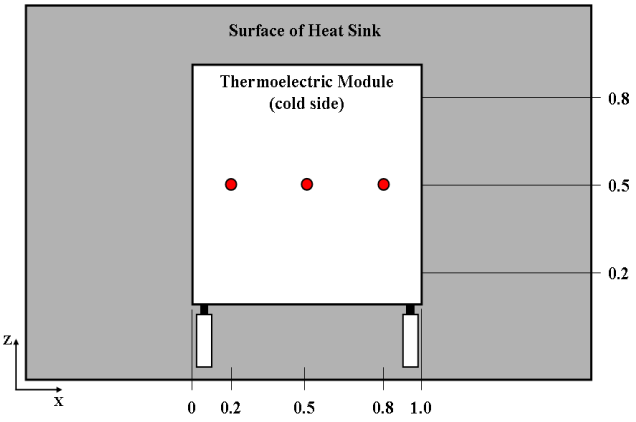
열전냉각장치를 작동시켜 열전소자의 냉각면에서 냉각영역이 형성되었을 때, Fig. 25(a)에서 보는 바와 같이, 열전냉각장치와 압전 액츄에이터의 거리가 5mm가 되도록 하고 열전대의 높이 Y를 2.5mm (무차원좌표, Y=0.5)에 고정시키킨 후, T-type의 열전대를 미리 선정한 위치(X=0.2, 0.5, 0.8, Z=0.5, Fig. 25(b) 참조)에 설치한 후, 압전 액츄에이터를 가진하지 않았을 때와 가진하였을 때 각각의 냉각영역에서 발생하는 온도분포를 측정하였으며, 열전소자의 발열면과 냉각면의 표면온도 측정을 위해 T-type 열전대를 발열면과 냉각면에 부착하였다. 정확한 온도 데이터 획득을 위해 실험 전에 모든 열전대들은 보정을 실시하였고 동일 조건 하에서 3회에 걸쳐 반복실험을 수행하고 얻어진 온도데이터의 평균온도를 결과 값으로 사용하였다. 또한, 모든 열전대들은 온도 측정부분을 제외한 나머지 부분을 절연테잎으로 절연하여 열전대 자체를 통한 열전도 현상을 최소화시켰고, 열전대에서 측정된 온도는 데이터 획득 장치에 의해 매 1초마다 PC에 기록하고 저장하였다.

냉각영역의 유동장 가시화 실험은 투명아크릴 용기 내에 스모그를 투입하고 He-Ne Laser에서 발진된 가시광을 Optical Lens에 통과시켜 시험부에 조사단면을 형

성하였다. 또한, 시험부에 형성된 조사단면과 수직인 방향에 CCD카메라를 설치한 후 초당 30프레임의 속도로 영상촬영을 실시하였으며 획득된 영상은 이미지보드를 통해 이미지 파일로 변환시켜 PC에 저장하였다. 그리고, 저장된 이미지들은 Matrox Inspector 8.0(Matrox Electronics Systems Ltd.)를 이용하여 해석하였다.



(a) Front view



(b) Bottom view

Fig. 25 Schematic diagram of temperature measurement points in cold region

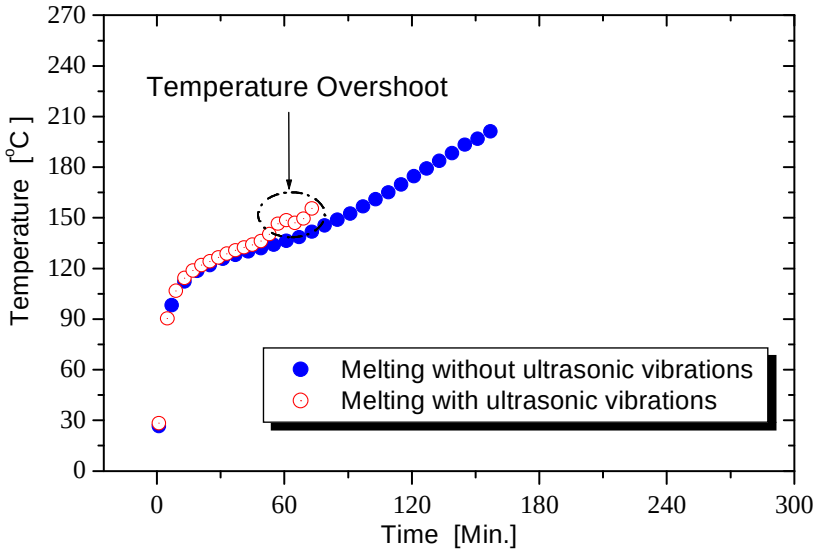
제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 상변화 열전달 실험결과

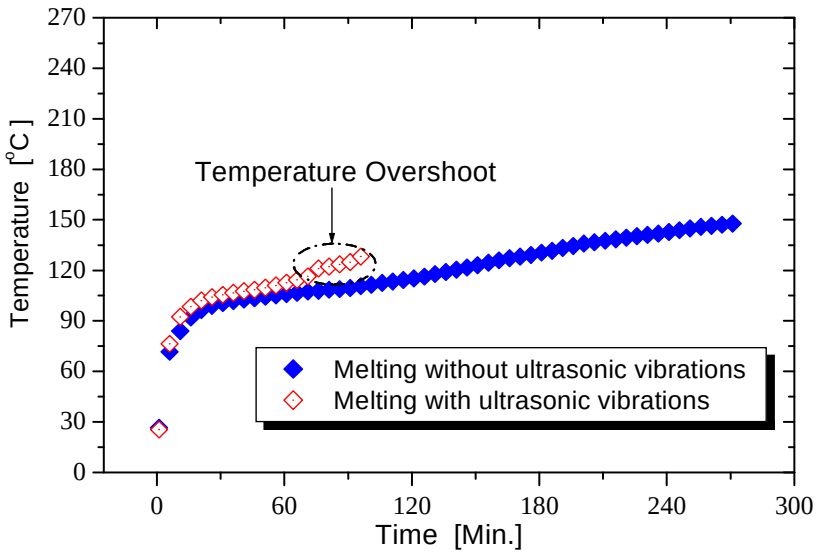
4.1.1 용융과정 동안의 온도분포 측정결과

Fig. 26은 상변화 물질의 용융과정에서 발생하는 열전달 현상을 규명하기 위해, 선정된 열유속 조건하에서 초음파 진동을 가진하지 않은 경우와 가진한 경우로 나누어 용융시간에 따른 히터표면의 평균 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 26에서 보는 바와 같이, 초음파 진동을 가진한 경우의 용융시간이 가진하지 않은 경우보다 약 2.5배 단축되는 것을 볼 수 있다. 또한, 히터표면의 온도는 가열이 시작되면서 급격하게 증가하다가 일정시간이 지난 후 점차 서서히 증가하는 것을 확인할 수 있고, 특히 초음파 진동이 가진되었을 경우에 있어서는 용융 중반 이후부터 히터표면에서 급격한 온도상승(temperature overshoot)이 발생하는 것을 볼 수 있다.

이는 파라핀의 용융 과정에서 용기 바닥면의 파라핀이 제거되면서부터 초음파 진동에 의해 공동현상의 활성화와 용기 바닥면에서 전이된 초음파 진동이 히터표면에 전달되어 히터표면에 형성된 공동(cavity)을 이탈시키고, 히터표면의 액막이 파괴됨으로 인하여 건조영역이 형성되어 가열되기 때문이다. 여기서, 공동현상이란, 빠른 속도로 액체가 운동할 때 액체의 압력이 증기압 이하로 낮아져서 액체 내에 기포가 발생하는 현상으로, 파라핀의 용융과정에서 발생한 이러한 현상은 Barbosa와 Hewitt[84]가 기포가 가열면 상에서 성장할 때 기포 아래의 얇은 액체막이 증발함에 따라 생성되는 마른 영역에서 온도가 상승되는 것을 밝힌 바 있다.



(a) q" = 11517.43 W/m^2

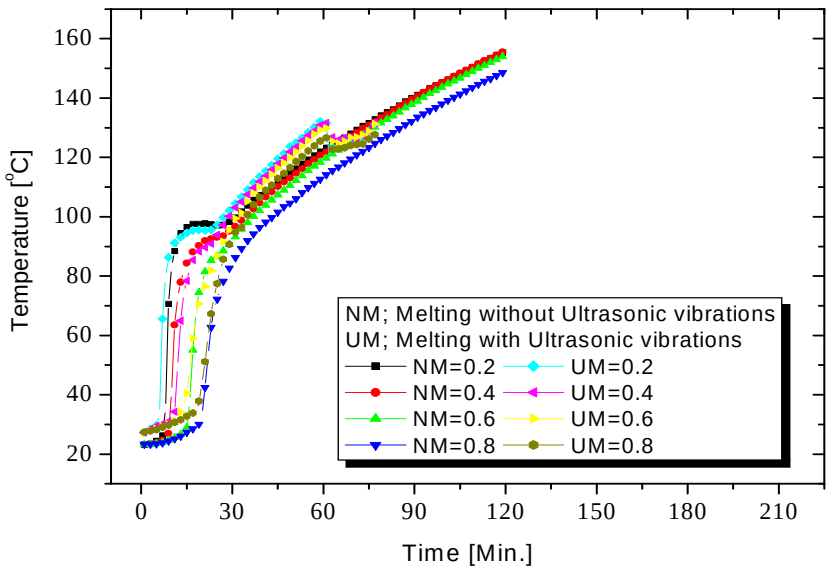


(b) q" = 6436.21 W/m^2

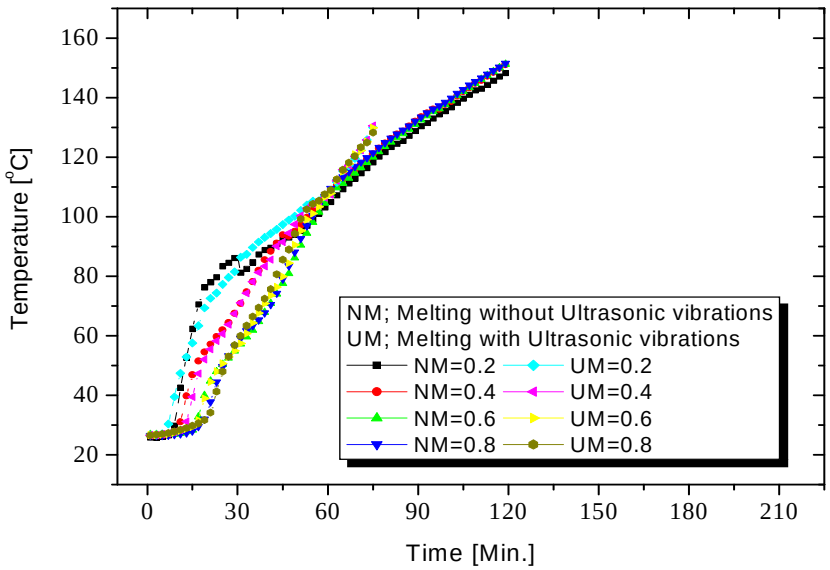
Fig. 26 Variations of heater surface temperature over time for each heat flux

Fig. 27과 28은 각각의 열유속 조건하에서 미리 선정된 지점(X=0.2, 0.4, 0.6, 0.8과 Z=0.5, Fig. 15(b) 참조)으로부터 상변화 물질의 용융과정에서 발생하는 온도분포를 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 상변화 물질의 온도분포를 살펴보면, 히터표면에 가까운 지점, 즉 X=0.2에서의 온도분포는 가열초기부터 용융이 시작될 때까지 급격하게 상승하다가 시간이 지남에 따라 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 히터표면의 온도분포와 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 용기의 하부영역에서 발생하는 온도분포는 용기 상부영역에서의 온도분포 결과와 비교해 보았을 때 용융이 매우 느리게 진행되다가 점차적으로 상부영역의 온도분포 결과와 비슷하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 용융초기에 용기의 하부영역과 상부영역에서 상변화 물질이 용융되는 시간이 다르고, 점차적으로 고상의 파라핀이 액상파라핀으로 되기 때문이다. 즉, 히터표면으로부터의 열전달은 용융 초기에 에너지가 전도에 의존하여 액상파라핀으로 전달되다가 그 이후부터는 자연대류에 의해 고상파라핀에 전달되며 전달에너지는 고상파라핀을 용융시키거나 액상파라핀의 온도를 높이게 되는 것이다. 이러한 상변화 물질의 용융과정에서 발생하는 온도분포 결과는 고-액 인터페이스의 위치를 결정할 수 있기 때문에 매우 중요한 자료이다. 또한, 상변화 물질의 온도변화는 용융용기의 하부에 가까울수록 안정적으로 이루어진다. 이는 고온의 액상파라핀이 히터표면을 따라 상부로 움직이고 이때 에너지를 전달받아 자유수면에 가까워져 최대온도에 도달하게 되며, 이후 액상파라핀은 고-액 경계면에 에너지를 다시 전달하며 순환하기 때문이다.

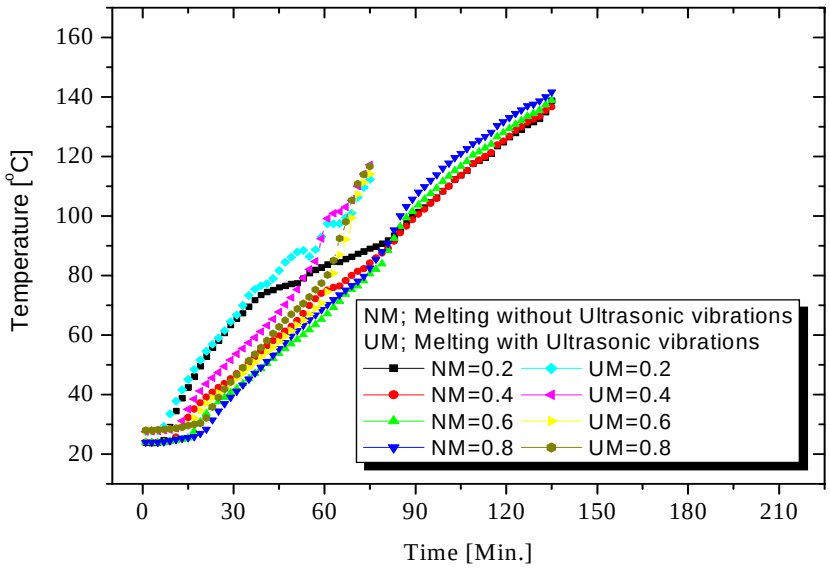
한편, Fig. 27과 28에서 보는 바와 같이, 미리 선정된 지점에서 파라핀의 용융과정 동안 초음파 진동을 가진한 경우가 가진하지 않은 경우보다 온도분포가 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Yoshihiro 등[85]이 물에 초음파 진동을 가진하였을 때 초음파 진동에 의해 발생하는 음압의 영향으로 자연대류 열전달 촉진에 영향을 미친다는 보고와 함께 초음파 진동자 부근에서 음압은 크게 형성되고 진동자에서 멀어질수록 음압은 감소된다고 하였다. 이러한 내용을 토대로, 앞에서 언급하였던 공동현상은 액상파라핀내에서 초음파 진동에 의해 형성되는 음압차에 의해 형성되는 것으로 판단되며, 상변화 물질의 열전달을 촉진한다고 예측할 수 있다.



(a) Temperature variation in PCM at dimensionless coordinate, X and Y = 0.75

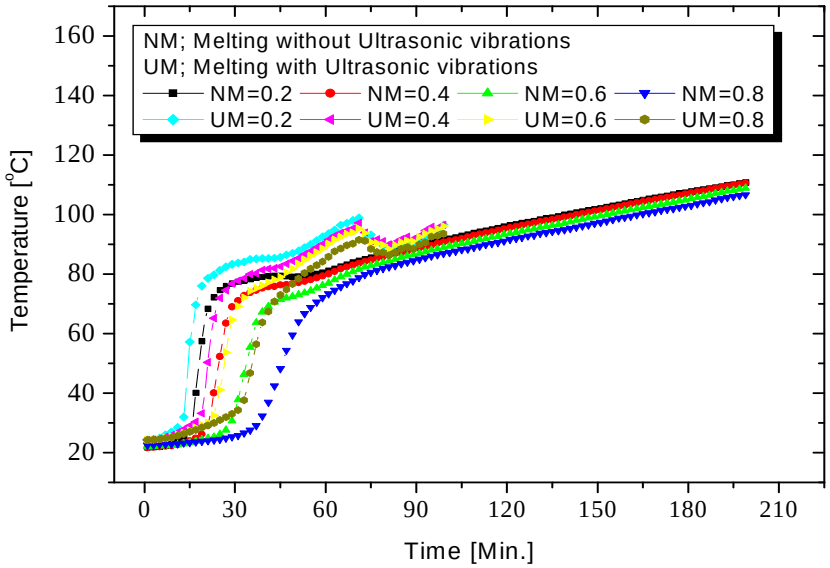


(b) Temperature variation in PCM at dimensionless coordinate, X and Y = 0.50

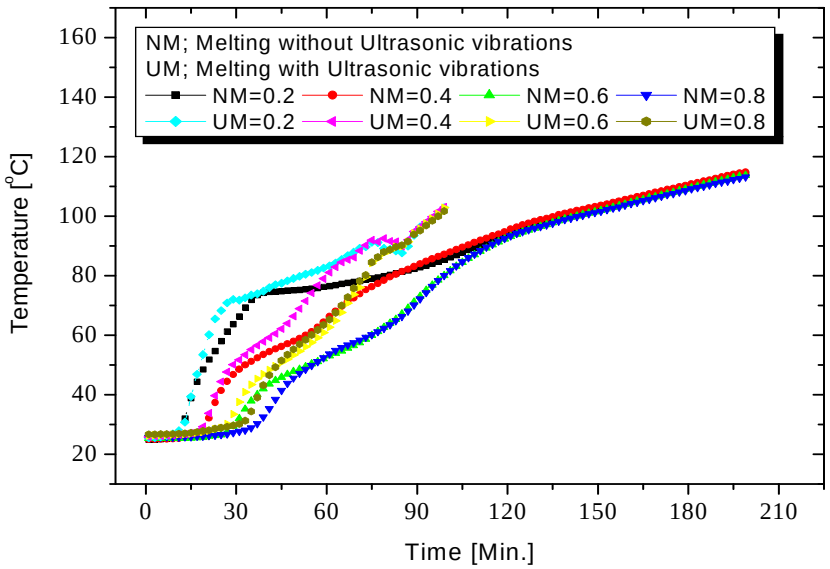


(c) Temperature variation in PCM at dimensionless coordinate, X and Y = 0.25

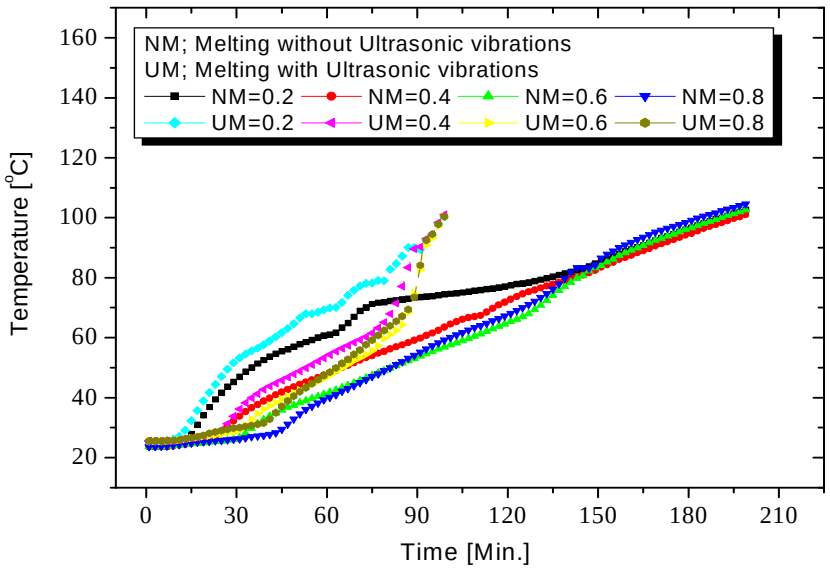
Fig. 27 Temperature variation in PCM in sequence of time for dimensionless coordinate, X and Y under the heat flux, q" = 11517.43 W/m^2



(a) Temperature variation in PCM at dimensionless coordinate, X and Y = 0.75



(b) Temperature variation in PCM at dimensionless coordinate, X and Y = 0.50



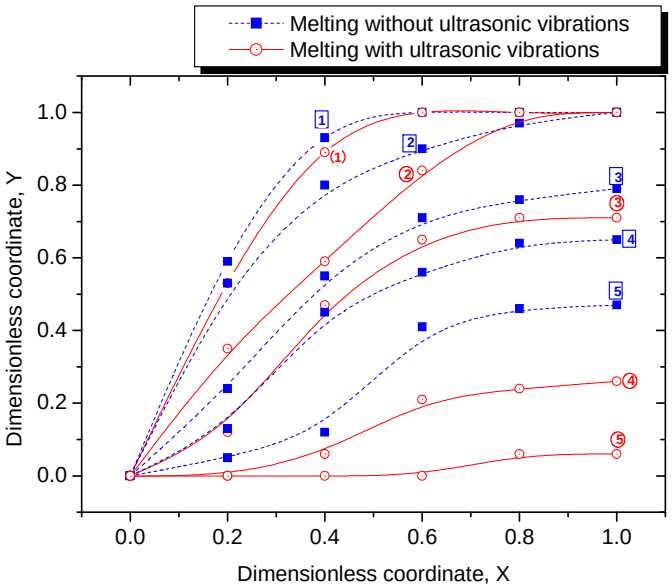
(c) Temperature variation in PCM at dimensionless coordinate, X and Y = 0.25

Fig. 28 Temperature variation in PCM in sequence of time for dimensionless coordinate, X and Y under the heat flux, q" = 6436.21 W/m^2

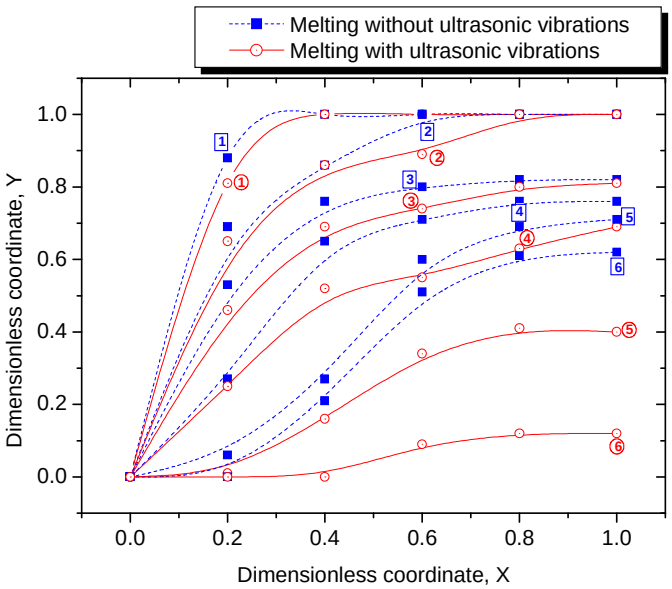
또한, 상변화 물질의 용융과정 동안 고-액상 경계면의 위치를 조사해보기 위해 본 연구에서는 Fourier수(F_o)와 변형 Stefan수(Ste*)를 곱하여 무차원 시간으로 표시하였다. 이런 방식으로 시간을 설정하면 특성높이(Fourier수)와 고-액상의 열전달 추진력(Stefan수)에 무관한 시간축이 설정된다[78]. 초음파 진동이 가진되지 않은 경우의 용융은 유한차분법이나 유한요소법 등을 이용하여 계산하고 고-액 인터페이스의 위치를 구할 수 있지만, 본 연구에서와 같이 초음파 진동이 가진된 경우에 고-액 인터페이스의 위치를 구하는 것은 수학적 모델링 구현에서 해석까지 어렵기 때문에 실험적으로 구하고자 하였다.

Fig. 29는 각각의 열유속이 주어졌을 때, 초음파 진동을 가진하지 않고 용융한 경우와 초음파 진동을 가진하면서 용융한 경우에 있어서 고-액상 경계면의 위치를 F_oSte^*에 대해 정리하여 나타낸 것이다. 주어진 열유속 조건하에서 용융과정 동안 모두 하부영역보다는 상부영역에서 용융이 잘 발달된 포물선 형태를 이루고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 히터표면을 따라 가열된 액상파라핀이 자유수면에 이르러 최고온도에 달하고 방향을 바꾸어 고상의 파라핀으로 에너지를 전달하는 일련의 과정이 발생하기 때문이고, 이러한 현상은 자연대류에 의한 흐름이 발생하는 것과 같다고 할 수 있다.

Fig. 29(a)에서 보는 바와 같이, 열유속 $q''=11517.43W/m^2$이 주어졌을 때, $F_oSte^*=0.9\times10^5$ 이전에는 초음파 진동이 가진되지 않은 경우나 가진된 경우 모두에서 용융비율의 차이가 크게 나지 않지만, $F_oSte^*=0.9\times10^5$ 이후에는 용융이 급속히 가속되면서 대부분의 경우에서 용융이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 29(b)에서 보는 바와 같이, 열유속 $q''=6436.21W/m^2$이 주어졌을 때도 마찬가지로 초음파 진동이 가해진 경우에서 가진되지 않은 자연용융의 경우보다 용융이 $F_oSte^*=1.2\times10^5$ 이후에서 급격하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 용융과정에서 초음파 진동에 의한 영향이 각각의 열유속 조건하에서 $F_oSte^*=0.9\times10^5$와 $F_oSte^*=1.2\times10^5$ 이후 두드러짐을 의미한다. 다만, 용융초기에는 용기 벽면을 타고 전달되는 초음파 진동의 영향으로 인하여 고-액상 경계면의 위치, 즉 용융비율에 다소 차이가 나게 된다.



(a) q" = 11517.43 W/m^2



(b) q" = 6436.21 W/m^2

Fig. 29 Melting shape history at F_oSte^* = ①$0.3\times10^5$, ②$0.6\times10^5$, ③$0.9\times10^5$, ④$1.2\times10^5$, ⑤$1.5\times10^5$, ⑥$1.8\times10^5$ under the heat flux conditions

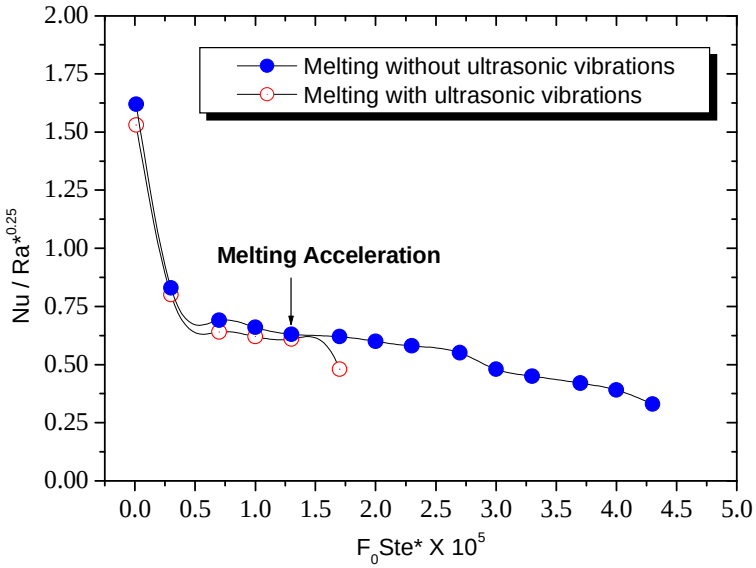
4.1.2 열전달계수 측정결과

본 연구에서는 상변화 물질의 용융과정에서 측정한 온도분포 결과를 토대로, 초음파 진동을 가진하지 않았을 경우보다 가진하였을 때 온도분포가 높게 형성되고 용융이 촉진되는 현상을 구체적으로 알아보기 위해, 무차원시간에 따른 열전달계수를 실험적으로 계산하여 그 결과를 확인해 보았다.

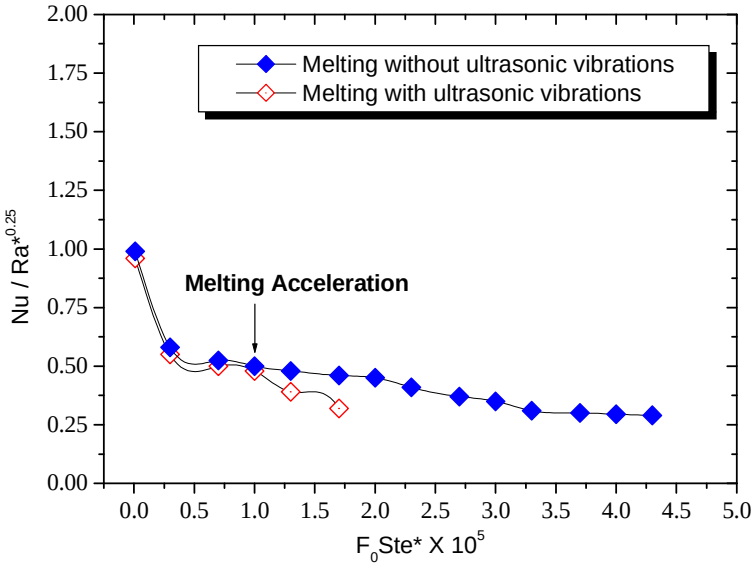
앞의 2.1.2에서 설명한 바와 같이, 실험을 통한 열전달계수의 측정 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 전류를 가하여 가열되는 히터의 뒷면을 단열시키고 표면의 온도 및 주류의 온도를 측정하여 열전달계수를 계산하는 방법을 이용하였다. 일반적인 경우에 있어, 자연대류가 지배적인 정상상태에서는 Nusselt수를 Rayleigh수의 함수로 표시하여 열전달계수를 표현한다. 그러나 본 연구에서와 같이 용융이 진행되는 비정상상태에서는 흔히 두가지 형태로 표현한다. 하나는 기하학적 길이에 대해 무차원화 한 시간, Fourier수와 최대 액상축열을 잠열로 무차원화 한 Stefan수를 곱한 F_oSte과 일정한 특성길이를 사용한 Rayleigh수로 Nusselt수와 관계를 맺는 방법이고, 다른 하나는 Stefan수와 시간에 따라서 변하는 특성길이를 사용한 Rayleigh수로 Nusselt수와 관계를 맺는 방법이 있다. 본 연구에서는 전자의 경우를 사용하여 열전달계수를 표현하였고, 고-액상 경계면의 온도가 상변화 물질인 파라핀의 용융온도와 같다고 가정하면 히터표면에서 고-액상 경계면으로의 열전달계수는 식 4.1.1을 이용하여 계산할 수 있다.

$$N = \frac{q'' \cdot H}{K(T_h - T_f)} \tag{4.1.1}$$

Fig. 30은 식 4.1.1을 이용하여 히터표면에서의 열전달계수를 실험적으로 구한 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 Nusselt Number($Nu/Ra^{*0.25}$)는 상변화 용융과정에서 자연대류가 발생하였을 경우 열전달계수의 계산에 적용되는 값이며, 가열조건으로 등열유속 조건을 적용하였기 때문에 가열면의 온도는 용융이 지속되는 동안 계속 상승하게 되고, Rayleigh수(Ra) 대신에 수정 Rayleigh수(Ra*)를 사용하였다.



(a) q" = 11517.43 W/m^2



(b) q" = 6436.21 W/m^2

Fig. 30 Nusselt number(Nu/Ra*$^{0.25}$) variations on the heater surface with F_oSte^*

Fig. 30에서 보는 바와 같이 용융초기의 열전달계수는 급격히 감소하다가 점차적으로 서서히 감소하게 된다. 이러한 현상은 상변화 물질의 용융초기에는 고상파라핀에서 전도의 영향이 지배적이기 때문에 고-액상 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하고 용융이 지속되면서 점차 액상영역이 확대되어 대류에 의한 열전달이 주를 이루게 되기 때문이다. 특히, $F_oSte^*=0.3\times10^5$ 이후에 열전달계수의 감소 추세가 점차 약화되는 점을 토대로 이 지점에서부터 대류가 활성화됨을 예상할 수 있다. 그러나, 각각의 열유속 조건에 있어서 초음파 진동이 가진된 경우의 히터표면에서 열전달계수는 예상과는 다르게 자연용융의 경우에 비해 작고 $F_oSte^*=0.9\times10^5$와 1.2×10^5 이후에는 더욱 감소되는 것을 볼 수 있다. 이것은 초음파 진동으로 인하여 액상파라핀 내에서 발생한 공동현상으로 인해 공동이 히터표면에서 이탈하면서 가열면에 마른 부분이 형성되며 열전달이 감소되는 것으로 보인다. 실제로 이러한 현상은 선행연구자[84]에 의해 기포가 가열면 상에서 성장할 때 기포 아래의 얇은 액막의 증발이나 파괴에 의해 생성된 마른 영역에서 열전달이 감소된다고 보고한 내용과 같다.

즉, 열전달의 감소로 가열면에서 마른 부분의 온도는 상승하게 되고 기포가 이탈하면서 마른 부분은 주위 액체에 의해 다시 젖어지는 일련의 과정이 반복을 거치게 되는 것이다. 이는 히터표면의 열전달계수가 히터표면에 형성되는 액막의 상태에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 초음파 진동과 같은 외적 요인이 열전달 프로세스에 가해질 경우, 히터표면의 열전달계수를 조사하는 것만으로는 열전달 향상을 설명하기 어렵다.

그러나 초음파 진동이 가진하였을 경우, 히터표면의 열전달계수가 급격히 감소하기 시작하는 $F_oSte^*=0.9\times10^5$와 $F_oSte^*=1.2\times10^5$인 지점은 앞 절의 고-액상 경계면의 위치에서 언급한 용융이 급속히 이루어지기 시작하는 지점과 비교해 보았을 때 일치한다. 다시 말해서, 이 지점에서부터 초음파 진동의 가진으로 인해 액상영역에 발생하는 물리적 요인이 열전달을 활성화시키고 있음을 알 수 있다.

또한, 초음파 진동이 가진되었을 때, $F_oSte^*=0.9\times10^5$와 $F_oSte^*=1.2\times10^5$ 이전까지는 용기의 벽면을 타고 전달된 초음파 진동의 영향을 받아 히터표면의 열전달계수는

약간 감소하고 용융비율에서도 다소 차이가 나지만, 이 지점 이후부터는 바닥면의 파라핀 층이 얇아지면서 초음파 진동의 영향이 바로 액상파라핀에 전달되고 히터 표면에 형성된 액막이 심하게 파손되면서 열전달계수가 급감하며 용융이 촉진되게 된다. Fig. 31은 용융초기에 히터표면의 열전달계수가 급격하게 감소하는 영역 즉, $0 \leq F_oSte^* < 0.3\times10^5$에서 초음파 진동을 가진하지 않았을 경우와 가진하였을 경우에 초음파 진동이 열전달 현상에 미치는 영향을 고찰해보기 위해 액상파라핀 영역에서 자연대류를 고려하기 위해서 나눈 값인 $Ra^{*0.25}$를 제거한 뒤, 순수 전도영역에서 Nusselt수 값을 무차원 시간에 대해서 정리하여 나타내었다.

Fig. 31에서 보는 바와 같이, 순수 전도영역에서 초음파 진동을 가진하지 않은 자연대류의 경우에서 관측된 열전달계수의 경우와는 달리 초음파가 가진된 경우에도 열전달계수의 감소는 관측되지 않았다. 이는 용융과정 시 순수 전도영역에서 초음파 진동을 가진하였을 때, 벽면을 타고 전달되는 초음파 진동은 순수 전도영역에 큰 영향을 미치지 못하고, 상변화 물질의 용융과정에서 전도영역에 초음파 진동을 가진하여 열전달을 촉진시키고자 하는 방법은 열전달 향상에 거의 영향을 미치지 못하며 비효율적이다.

또한, 본 연구에서는 열유속과 용융시간에 관계없이 열전달 특성을 표할할 수 있는 무차원 시간 파라미터를 정의하였다. 무차원 파라미터 τ는 용융비로 표현한 시간파라미터로써 용융양을 측정한 시점의 시간과 상변화가 완료된 시점, 즉 고상 파라핀이 완전히 용융되었을 때의 시간을 비로 나타낸 것이다. 흰색의 고상파라핀이 투명의 액상파라핀으로 변하는 시점을 상변화가 완료되는 시점으로 간주하고, 액상파라핀의 용융양은 진공흡입기를 이용하여 흡입한 후 파라핀의 용융점 이상으로 온도가 유지되는 온장고에서 전자저울을 이용하여 측정하였다. Fig. 32는 무차원 시간파라미터 τ에 대하여 히터표면과 고-액상 인터페이스 사이의 열전달계수를 나타낸 것으로, τ가 약 0.3 이후에 자연대류가 발달하여 열전달계수의 감소 추세가 점차 낮아진다. 또한 자연대류가 발달하기 시작한 이후부터 초음파 진동이 가진된 경우에서 열전달 계수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 초음파 진동의 가진은 자연대류영역에서 지배적임을 의미한다.

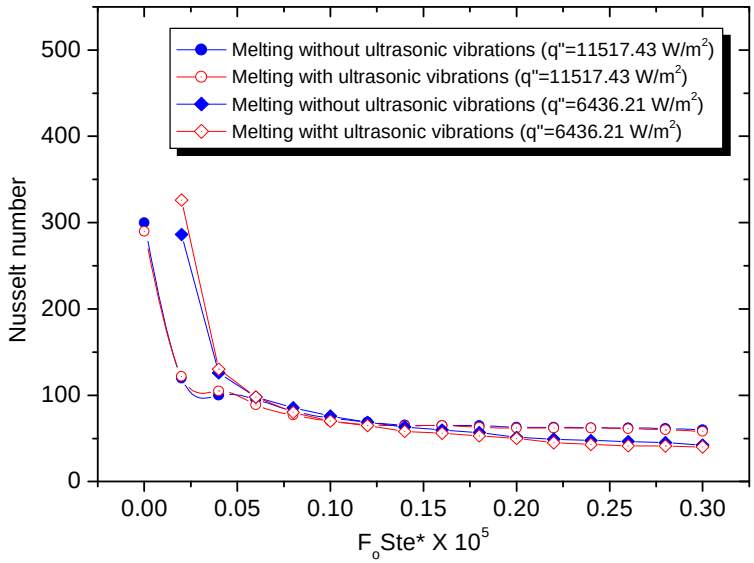


Fig. 31 Nusselt number variation on the heater surface with F_oSte^* during conduction region under the heat flux conditions

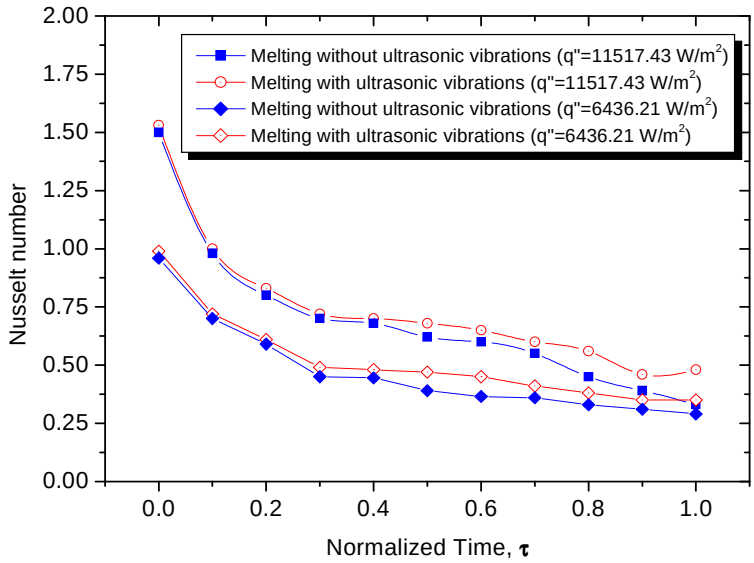


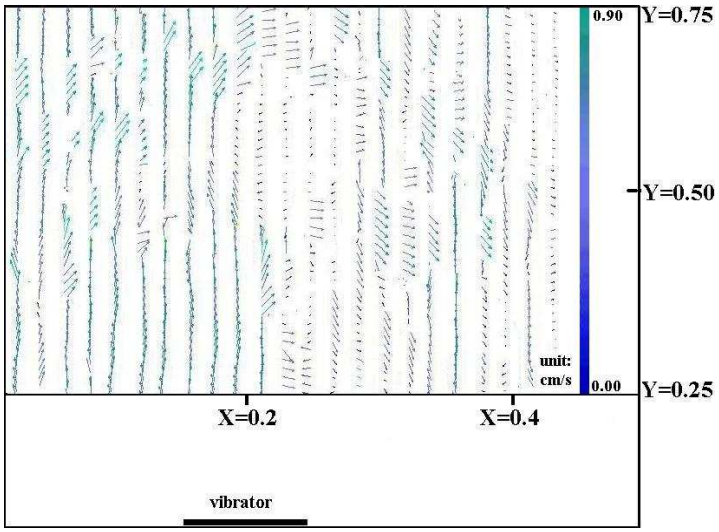
Fig. 32 Nusselt number variation against normalized time (τ) under the heat flux conditions

4.1.3 가시화 측정결과

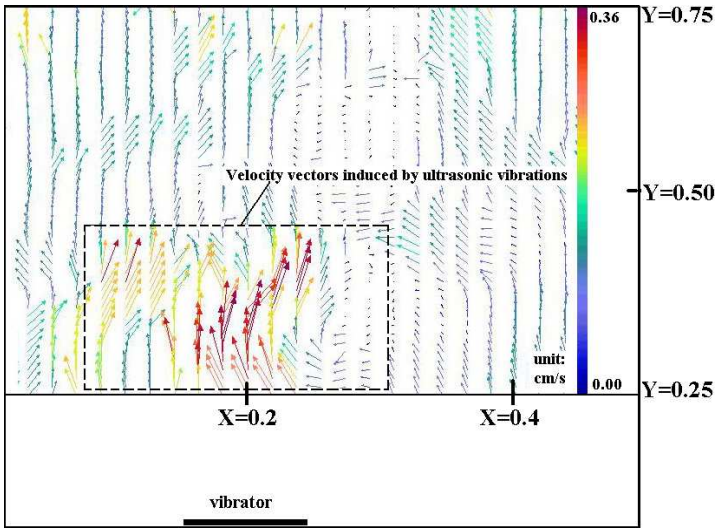
본 연구에서는 상변화 열전달 프로세스 중 초음파 진동을 가진하였을 때 용융이 가속화되는 원인을 규명해 보기 위해, 상변화 물질인 파라핀에 열유속 q"=6436.21 W/m^2을 가한 상태에서 용융이 충분히 이루어진 후 입자영상추적계와 적외선열화상 카메라를 이용하여 초음파 진동을 가진한 경우와 가진하지 않은 경우로 나누어 각각 가시화를 실시해 보았다.

Fig. 33은 입자영상추적계를 이용하여 가시화 한 결과를 보여주고 있는 것으로, Fig. 33(b)에서 보는 바와 같이 초음파 진동을 가진하였을 경우에 용기바닥면에서 액상영역의 자유수면으로 향하는 강한 유체의 흐름, 즉 음향흐름이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 33(a)에서 확인할 수 있듯이, 초음파 진동을 가진하지 않은 자연용융의 경우는 부력에 의해 자유수면으로 향하는 자연대류의 흐름만이 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 34는 초음파 진동을 발생시키는 초음파 발생장치에서 기준 출력강도를 175W로 놓고, 출력강도를 각각 300W와 50W로 변경시켜 입자영상추적계를 통해 가시화한 결과를 나타내어 보았다. Fig. 34에서 보는 바와 같이, 높은 출력이 주어질수록 상향의 강한 음향흐름이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고출력의 초음파 진동이 파동의 진폭에 영향을 끼쳐 초음파 강도를 강화시키는 것으로 판단된다.

Fig. 35는 초음파 진동의 가진으로 인해 발생된 음향흐름이 액상파라핀내 유동장에 어떠한 열유동 현상을 일으키는지 알아보기 위해 열화상카메라를 사용하여 가시화 한 결과을 보여주고 있다. Fig. 35(a)에서 볼 수 있듯이 초음파 진동이 가진되지 않은 경우에는 왼쪽 벽면에 설치된 히터에서 가열된 파라핀(붉은색, 약 100~110^{o}C)이 시계방향의 큰 타원을 형성하면서 비교적 온도가 낮은 파라핀(파란색, 약 80~85^{o}C)쪽으로 에너지를 공급하는 것을 볼 수 있다. 즉, 밀도차에 의해 발생하는 시계방향의 부양성 유도대류를 관찰할 수 있으며, 이는 Fig. 33의 입자영상추적의 결과와도 비교적 잘 일치한다. 또한, Fig. 35(b)에서 보는 바와 같이 초음파 진동을 가진한 경우 강한 음향흐름으로 인하여 액상파라핀 내에 열유동이 발달되었고, 이를 토대로 열전달이 촉진됨을 가시적으로 확인할 수 있다.

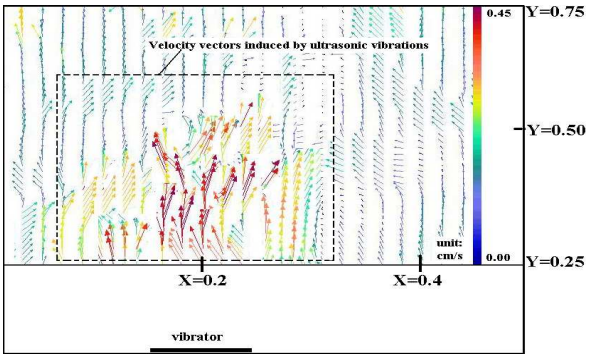


(a) Melting without ultrasonic vibrations

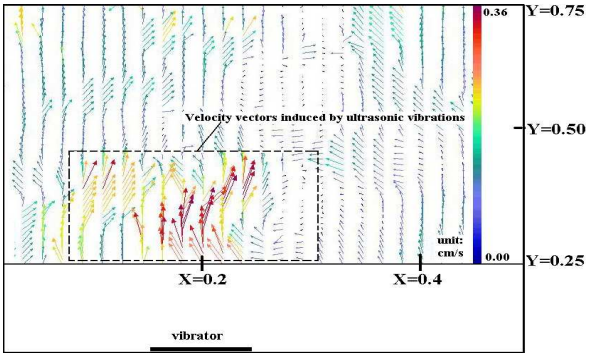


(b) Melting with ultrasonic vibrations

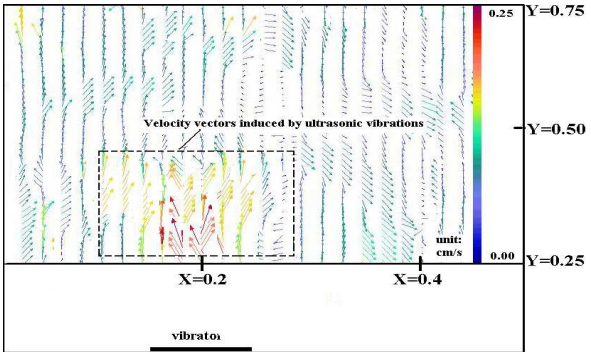
Fig. 33 Two dimensional velocity profiles measured using the PIV



(a) Output power level of 300 W

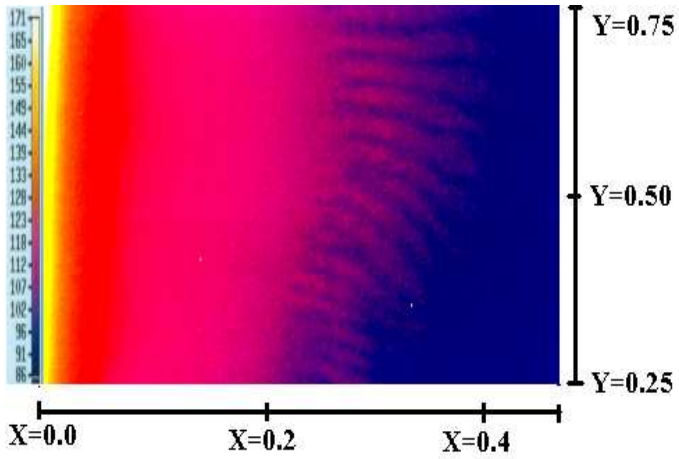


(b) Output power level of 175 W

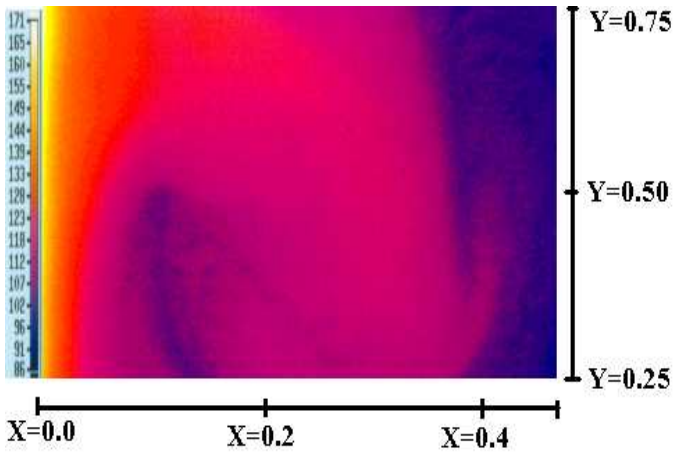


(c) Output power level of 50 W

Fig. 34 Two dimensional velocity profiles by changed output power level measured using the PIV



(a) Melting without ultrasonic vibrations



(b) Melting with ultrasonic vibrations

Fig. 35 Comparison of thermally-oscillating flow fields in the liquid paraffin by infrared thermal camera

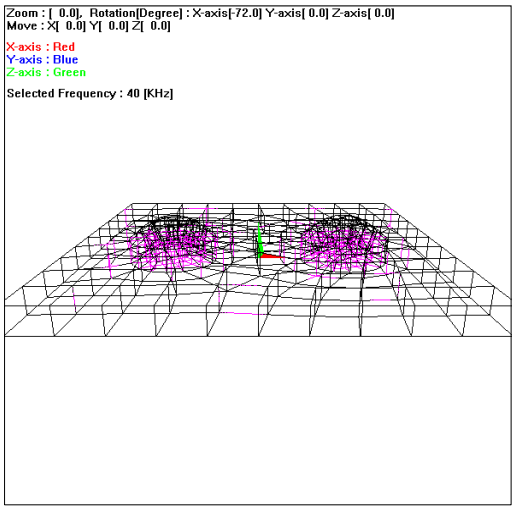
4.1.4 음압분포 계산 및 열전달 향상결과

가시화 실험을 통해 확인한 초음파 진동에 의해 형성된 음향흐름은 초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생되는 음압에 기인하는 것으로 알려져 있다[86]. 따라서 본 연구에서는 음압과 열전달 향상과의 관계를 고찰해 보고자 하였다. 일반적으로 액체에서의 음압은 하이드로폰을 이용하여 실험적으로 구할 수 있지만, 본 실험에서와 같이 액상파라핀의 온도가 130^{o}C 이상으로 가열되는 경우, 하이드로폰을 이용하여 측정한 음압분포를 신뢰하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 결합형 유한요소-경계요소법을 도입하여 초음파 진동에 의해 파생되는 각종 물리량을 유한요소법을 이용하여 계산한 후 매질에서의 음압 분포를 경계요소법을 도입하여 해석하였다.

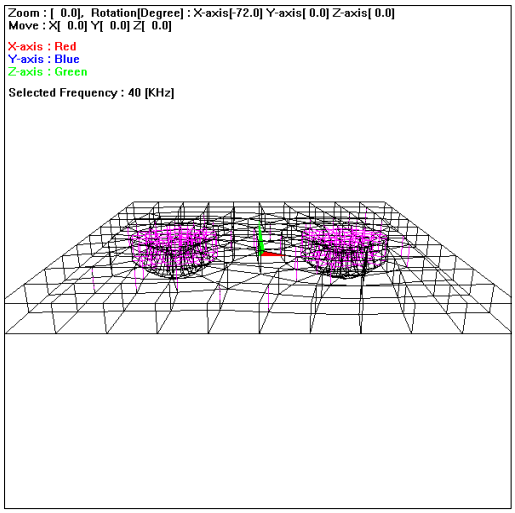
먼저, 유한요소법을 이용한 평판의 수치해석을 통해 진동판에 부착되어 있는 진동자의 횡진동에 의해 진동부에 발생하는 변위분포를 계산하고 Sine 함수를 이용하여 가시적으로 확인해 보았다.

Fig. 36은 진동부의 변위분포 계산결과를 토대로 가시적으로 표현한 그림으로, 진동자가 부착된 지점에서 상하진동에 의한 변위가 크게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 진동부의 변위 계산 결과를 토대로 진동부에서 형성되는 응력값을 계산해 보고, Sine 함수를 이용하여 가시적으로 나타내어 보았다. Fig. 37과 38은 구해진 진동부의 변위값을 이용하여 Von mises 응력값을 구하고 이를 가시적으로 나타낸 것으로, Von mises 응력값 또한 진동판에 부착된 진동자 부근에서 큰 변화를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 진동부의 유한요소 해석을 통해 인가된 40kHz의 주파수가 진동자에 공급되었을 때, 진동자가 부착된 진동판의 바닥면에는 심한 여기현상과 함께 유체의 열전달 현상에 영향을 미치게 된다. 이는 앞 4.1.3절의 가시화 실험 결과에서 확인한 음향흐름이 열전달 향상을 위한 주된 요인의 하나이고, 이러한 음향흐름은 초음파 진동에 의해 매질내에 형성되는 음압분포가 주된 발생원인임을 감안하여 음압분포와 열전달 향상과의 관계에 대한 고찰이 필요하다.

따라서, 용융된 액상파라핀내에 40kHz의 초음파 진동을 가진하였을 때 매질내에 발생하는 음압분포를 계산하기 위해 유한요소법을 이용한 수치해석 결과를 경계요소법에 도입, 적용하고 수치해석을 실시하여 그 결과를 확인해 보았다.

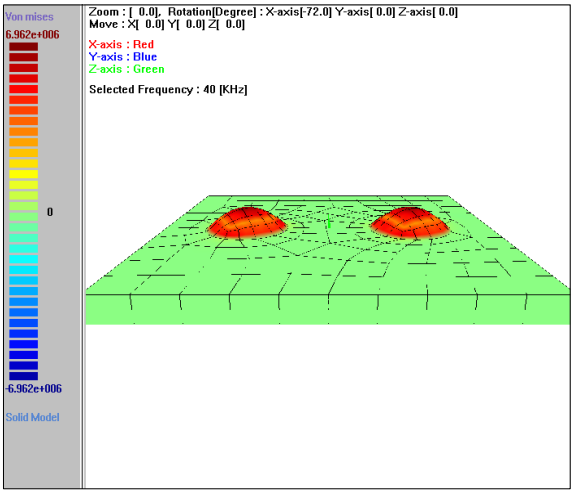


(a) The maximum displacement variations

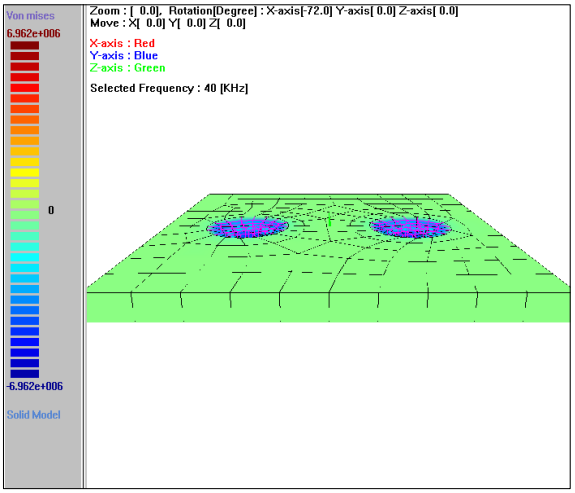


(b) The minimum displacement variations

Fig. 36 Visualization of displacement variations of a vibrating plate

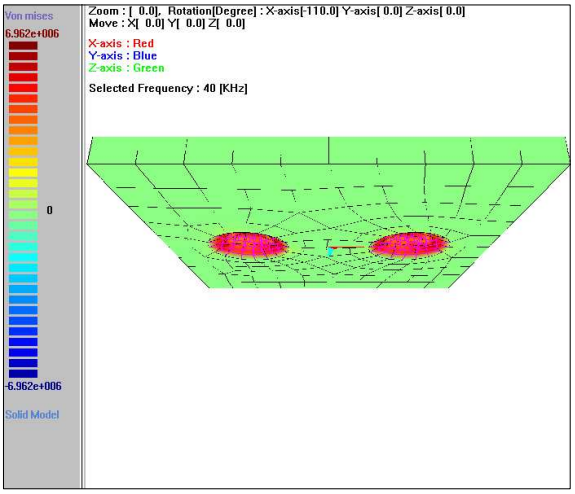


(a) The maximum value of sinusoidal von mises

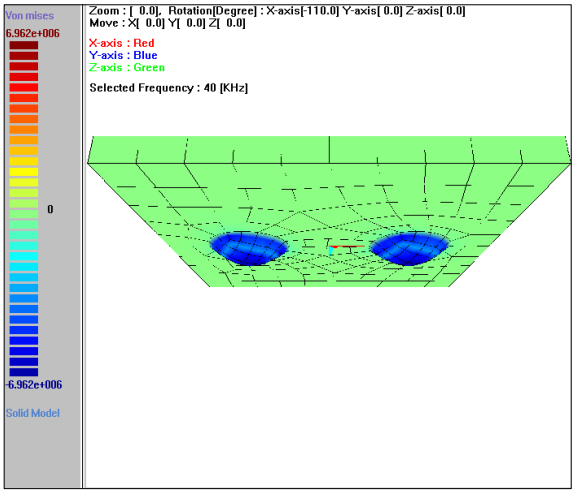


(b) The minimum value of sinusoidal von mises

Fig. 37 Visualization of stress distributions at the top view



(a) The maximum value of sinusoidal von mises



(b) The minimum value of sinusoidal von mises

Fig. 38 Visualization of stress distributions at the bottom view

Fig. 39는 액상파라핀 내에 40kHz의 초음파 진동을 가진시켰을 때 매질내에 발생하는 음압분포를 수치적으로 계산하고 이를 가시화 한 것이다. Fig. 39에서 보는 바와 같이, 초음파 진동자가 부착되어 있는 무차원 좌표가 X=0.2와 0.8인 지점에서 음압이 강하게 형성되는 것을 확인할 수 있고, 초음파 진동자와 가까운 지점일수록 발생되는 음압이 높게 나타나는 것을 가시적으로 확인할 수 있다.

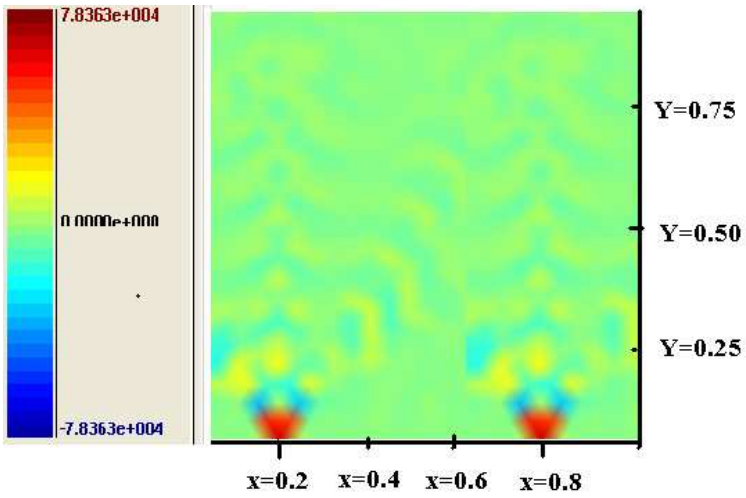


Fig. 39 Visualization of acoustic pressure distribution in the liquid paraffin induced by ultrasonic vibrations

한편, 일반적으로 외적 요인에 의해 가해진 매질내의 압력분포를 계산하기 위해 경계요소법을 적용할 경우에는 해당 매질의 밀도와 함께 매질을 통과하는 음파의 전파속도가 중요한 요소이며, 이러한 요소들은 모두 온도가 변화함에 따라 함께 변하기 때문에 반드시 온도의 영향을 고려해야 한다. 따라서, 본 연구에서와 같이 가열되는 파라핀과 같은 유체의 평균온도를 구하고자 할 때 일반적으로 사용[78]하는 다음의 식을 이용하여 평균온도 값을 획득하였고 국부 열전달계수를 구하는 데 사용하였다.

$$T_{avg} = \frac{1}{2}(T_h + T_\infty) \tag{4.1.2}$$

또한, 식 4.1.2를 이용하여 액상파라핀의 대략적인 평균온도를 구하고 식 4.1.3을 이용하여 액상파라핀의 밀도를 구하였다. 여기서, 액상파라핀의 밀도를 구하기 위해 사용된 밀도 변화식은 파라핀 제조회사에서 제시한 식을 인용하여 사용하였다.

$$\rho = 778.3\exp[-8.249\times10^{-4}(T_{avg} - 50)] \tag{4.1.3}$$

결국, 액상파라핀을 투과하는 음파의 속도는 액상파라핀의 밀도와 체적탄성계수 E 또는 압축계수 k_T의 관계로부터 구할 수 있고 식 4.1.4와 같이 정리할 수 있다.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{k_T\rho}} \tag{4.1.4}$$

여기서, 액상파라핀의 압축계수는 1기압과 1000기압하에서 온도변화에 따라 실험적으로 구하여 정리해 놓은 CRC Handbook of Chemistry and Physics[87]의 값을 준용하였으며 Table 4에 이를 정리하여 나타내었다.

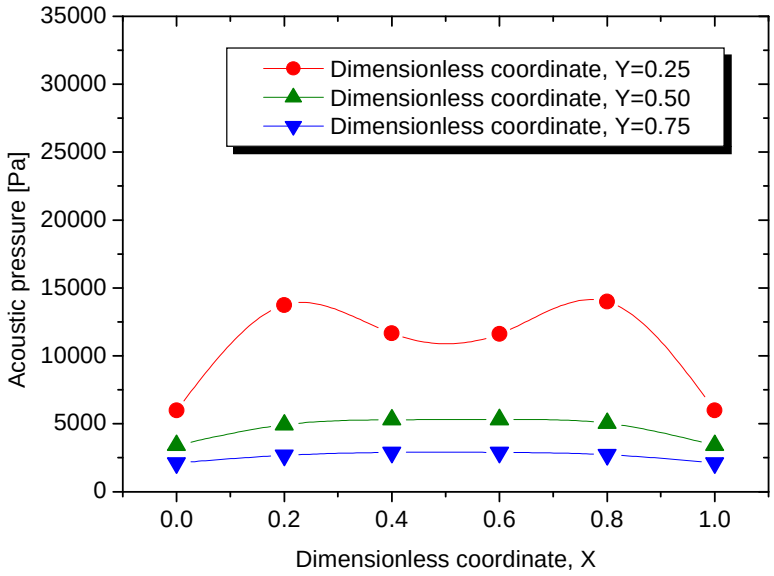
Table 4 Bulk modulus of elasticity of n-Octadecane

Temperature [°C]	Bulk modulus of elasticity (N/m^2)	
	1 atm	1000 atm
60.0	1.06×10^9	1.96×10^9
79.4	9.61×10^8	1.82×10^9
98.9	8.62×10^8	1.72×10^9
115.0	7.81×10^8	1.64×10^9
135.0	6.94×10^8	1.56×10^9

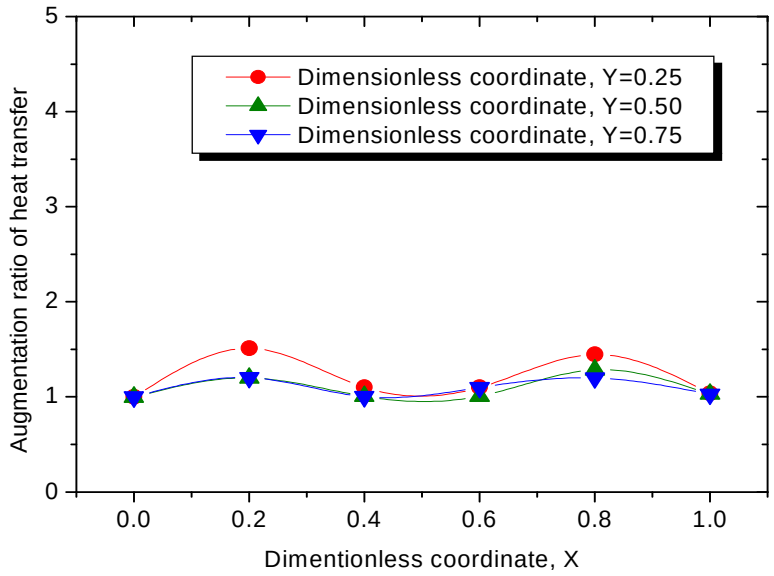
또한, 유체내에서 음파의 속도가 매질의 온도와 비례관계에 있음을 감안하여 식 4.1.3과 4.1.4를 이용하여 음파의 속도를 약 1,000m/sec로 결정하고 결합형 유한요소-경계요소법에 의해 음압분포를 계산하였다. 또한, 음압분포와 열전달 향상과의 관계를 알아보기 위해 실험에서 선정한 지점과 동일한 지점에서 식 2.1.21과 2.1.22를 이용하여 국부 열전달계수를 구하고, 식 4.1.5를 이용하여 초음파 진동이 가진된 경우와 가진되지 않은 경우의 비로서 열전달 향상율을 구하였다.

$$h_{aug} = \frac{h_{with\ ultrasonic\ vibrations}}{h_{without\ ultrasonic\ vibrations}} \tag{4.1.5}$$

Fig. 40은 선정한 지점에서 수치해석을 통해 계산된 음압분포 결과와 열전달 향상율 결과를 온도변화에 따른 음파의 속도를 고려하여 각각 정리하여 나타낸 것으로, 수치해석 및 열전달 향상율의 적용은 초음파 진동 가진시 초음파 발생장치에서 기준 초음파 출력강도로 설정한 175W에 40kHz의 주파수를 가진한 경우에서 그 결과를 확인하여 보았다.



(a) Acoustic pressure distributions



(b) Augmentation ratio of local heat transfer coefficient

Fig. 40 Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer augmentation in case of sound velocity, 1,000 m/sec

Fig. 40(a)의 결과에서 보는 바와 같이, 수치해석을 이용하여 계산된 음압분포는 초음파 진동자가 부착된 지점 즉, 무차원 좌표 X=0.2와 X=0.8에서 주위에서 보다 높게 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히, 자유수면으로부터 초음파 진동자와 가까운 지점인 무차원 좌표 Y=0.25인 지점에서 음압이 가장 높게 형성되는 것을 확인할 수 있고, 무차원 좌표 Y=0.5 이상부터는 형성되는 음압분포의 편차가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 초음파 진동에 의해 형성되는 음압이 액상파라핀 내에 전달되는 과정에서 중첩과 간섭현상으로 인해 압력평형이 이루어지기 때문으로 판단된다.

Fig. 40(b)는 실험을 통해 얻어진 국부열전달 계수를 토대로 식 4.1.2를 이용하여 열전달 향상율 결과를 계산하여 정리한 것이다. 열전달 향상율 또한 초음파 진동자 부근에서 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있고, 초음파 진동자가 부착된 지점에서 약 1.5배 정도의 열전달 향상이 이루어짐을 확인할 수 있다. 여기서, 음압분포 결과에서 나타난 측정 지점별 계산결과와 열전달 향상율 결과는 약간의 상이한 형상을 보이고 있지만 초음파 진동자 부근에서 높은 음압과 열전달이 향상되는 경향성은 유사하다고 할 수 있다.

이러한 결과는 매질 내에서 초음파 진동을 가진하였을 때 발생하는 음압분포는 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있음을 보여주고, 액상파라핀에서 발생하는 물리적 거동과 열전달 촉진원인은 매질내에서 심한 압력변동과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다.

4.2 열전냉각장치의 열전달 실험결과

4.2.1 냉각과정 동안의 온도분포 측정결과

본 연구에서는 열전소자와 방열판 그리고 냉각팬을 이용하여 열전냉각장치를 구성하였다. 열전냉각장치는 인가된 전압을 열전소자와 냉각팬에 공급하였을 때, 열전소자의 한쪽 면에서 급격하게 상승하는 고온의 발열면을 방열판에 접촉시키고 냉각팬에 의해 열원을 일정하게 유지시켜 줌으로써, 열전소자의 다른 한쪽 면에 냉각면이 형성됨과 동시에 일정한 냉각영역을 이루는 열전달 프로세스가 형성된다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 열전냉각장치를 구성하는 열전소자의 발열면에서 발생되는 고온의 열원이 일정온도로 유지되고, 냉각면에서 일정한 냉각영역이 형성되는지를 확인해 보고자 하였다. 이를 위해, 열전냉각장치의 열전소자 발열면과 냉각면에 열전대를 설치하고, 열전냉각장치를 작동시켰을 때 두 영역에서 발생하는 온도분포를 측정하여 그 결과를 확인해 보았다.

Fig. 41은 열전냉각장치를 구성하는 냉각팬과 열전소자에 인가된 전압을 공급하였을 때, 열전소자의 발열면과 냉각면에서 측정된 온도분포 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 41에서 보는 바와 같이, 열전소자의 발열면의 온도는 전압을 공급한 후, 약 5초 동안 급격하게 온도가 상승하다가 15초 이후부터는 약 33 ~ 34℃로 일정한 온도를 유지하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 열전소자의 냉각면에서 발생하는 온도분포 결과는 열전냉각장치를 작동시킨 후 약 5초 동안 발열면의 온도분포 결과와는 반대로 급격하게 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 15초 이후부터는 측정지점에 따라 다소 차이는 있지만 약 10℃ ~ 15℃까지 각 지점별로 일정한 냉온을 발생시키면서 냉각면이 유지되고 이로 인하여 냉각영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 무차원 좌표 X=0.5인 지점에서 다른 두 지점보다 온도가 다소 낮게 나타나는 이유는, 밀폐된 영역내에서 열전소자를 작동시켰을 때 냉각면의 전 영역에서 냉온이 고루 발생하게 되지만, 무차원 좌표 X=0.2와 0.8인 지점은 열전소자의 양쪽 가장자리에 위치하고 있고 공기와 접촉되는 부분이 점차 확대되면서 전도와 대류에 의한 열전달 현상이 발생하며,

열전소자의 중앙부인 무차원 좌표 X=0.5인 지점에서는 전도에 의한 열전현상이 지배적으로 나타나기 때문에 약간의 온도차가 발생하는 것으로 판단된다.

또한, 열전냉각장치를 작동시켰을 때 열전소자 발열면의 온도가 급격히 상승하다가 약간 감소하는 구간이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 열전소자의 냉각면에서 발생되는 무차원좌표 X=0.5인 지점의 온도분포 결과와 비교해 보았을 때, 열전소자의 발열부에서 온도가 급격히 상승함과 동시에 냉각면의 온도 또한 급격하게 감소하는 도중, 발열면에서 발생한 열원의 일부가 열전소자 내부를 구성하는 반도체(semi-conductor)와 열전소자의 표면재료인 세라믹을 통해 냉각면으로 전도되면서 발열면과 냉각면 사이의 열교환에 의한 열적평형 상태가 구성되고 이로 인하여 열전달 프로세스가 형성되는 것이다.

따라서, 본 연구에서는 열전소자에 인가된 5V의 전압을 공급하고 약 5초가 지났을 때, 열전소자 내부를 구성하는 p형과 n형 반도체가 부착되어 있는 세라믹소자의 냉각면 전 영역에서 형성되는 온도분포를 적외선열화상카메라를 이용하여 측정해 보고 측정결과 값을 정리하여 Fig. 42에 그래프로 나타내어 보았다.

Fig. 42에서 보는 바와 같이, 열전소자의 냉각면 전 영역에 대한 온도분포를 분석해 본 결과, 무차원 좌표 X=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 그리고 1.0인 지점에서 무차원 좌표 Z=0.2, 0.5 그리고 0.8인 지점별로 열전소자의 냉각면에서 각각의 온도분포는 무차원 좌표 X의 변화에 따라 일정한 간격을 두고 규칙적인 온도의 증감이 발생하면서 일정하게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는, 열전소자에 전압을 공급하였을 때 열전소자의 발열면은 온도가 상승하고 이에 반해 냉각면은 온도가 급격히 떨어지는데, 이 때 발생되는 냉온이 냉각면에 전도되는 과정에서 열전소자 내부의 p형과 n형 반도체가 세라믹 표면에 부착되어 있는 영역과 부착되지 않은 영역 사이에 온도차가 발생한다는 것을 의미한다. 또한, 무차원 좌표 X=0.2와 0.8인 지점과 0.5인 지점의 온도측정 결과를 보았을 때, 중앙부인 X=0.5인 지점의 온도가 양쪽 측면부보다 낮게 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 앞서 언급한 Fig. 41의 결과와도 일치하는 것을 알 수 있다.

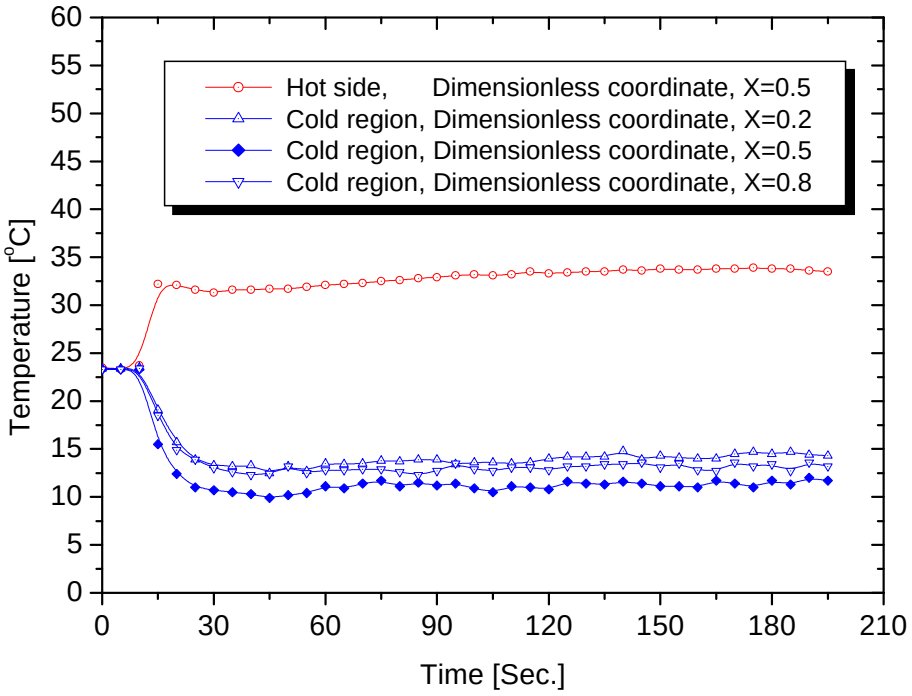


Fig. 41 Profiles of surface temperature on hot & cold side of thermoelectric module at dimensionless coordinate, Z = 0.5

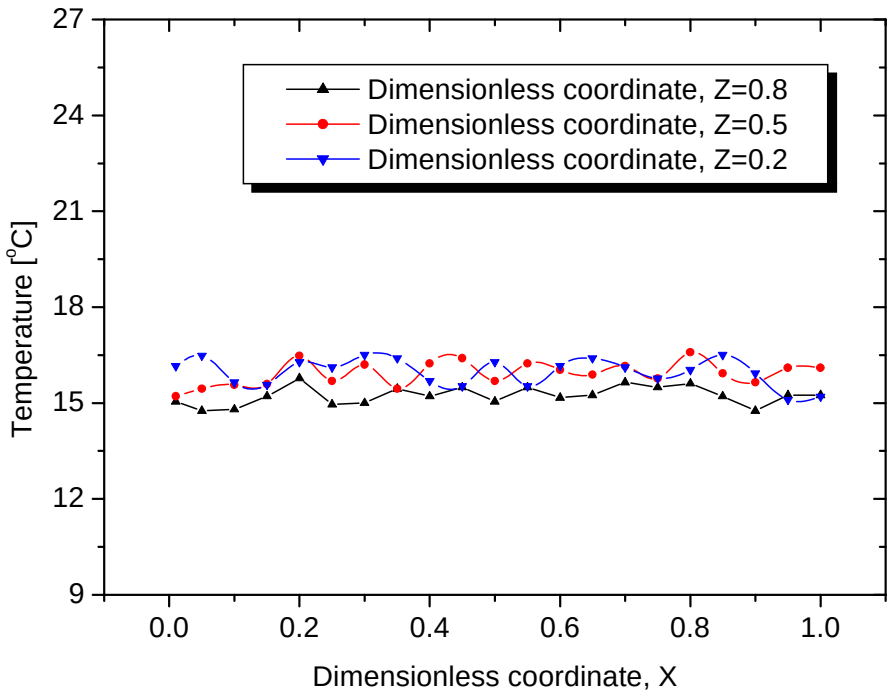


Fig. 42 Profiles of surface temperature on cold side of thermoelectric module at dimensionless coordinate, X

Fig. 43은 앞 3.2.4절에서 언급한 바와 같이, 열전냉각장치와 압전 액츄에이터 사이의 간격을 5mm로 설정해 놓고, T-type 열전대를 미리 선정한 지점 (X=0.2, 0.5, 0.8과 Y=0.5, Z=0.5, Fig. 25 참조)에 설치한 후, 열전냉각장치를 작동시켰을 때 열전소자의 냉각면과 압전 액츄에이터 사이에서 형성되는 냉각영역(시험부)에서 측정된 온도분포 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 43에서 보는 바와 같이, 앞서 언급한 냉각영역의 열전달 프로세스를 형성하기 위한 열전소자 발열면의 온도는 방열판과 냉각팬에 의해 열원이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 열전냉각장치의 열전소자와 압전 액츄에이터 사이에 설치한 열전대로부터 냉각영역에서 측정된 온도분포 결과는, 발열면의 온도가 일정하게 유지된 후 냉각영역의 온도분포가 측정지점별로 약 13 ~ 15℃ 사이에서 약간의 차이는 있지만 국부적으로 일정하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

측정지점별로 형성된 온도분포 결과를 고찰해 보면, 중앙부인 무차원 좌표 X=0.5인 지점의 온도분포가 양쪽 측면지점인 X=0.2와 0.8인 지점에 비해 상대적으로 낮게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 열전소자의 냉각면에서 표면온도 측정 결과와 유사한 경향을 나타나고 있지만, 본 실험에서 측정한 온도분포의 경우는 열전소자의 냉각면의 온도가 아닌 냉각면으로부터 공기중으로 흘러나오는 냉각영역의 온도를 측정한 결과이기 때문에 앞서 설명한 전도의 영향보다는 자연대류의 형성에 의한 영향이 더 크게 작용하는 것으로 보인다. 또한, 열전소자와 압전 액츄에이터 사이의 냉각영역에는 외기의 영향을 크게 받지 않도록 상부를 개방시킨 투명아크릴 용기가 Fig. 25에서 보는 바와 같이 각 구성장치 외부에 설치되어 있고, 용기 상부는 개방시켜 두었으며, 냉각팬의 작동으로 인해 방열판에서 방출되는 더운 공기는 냉각영역에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 방열판과 냉각팬의 윗부분에 덕트를 제작, 설치하여 외부로 방출시키도록 되어 있어, 냉각면의 중앙부에서 발생되는 냉온은 양쪽 측면의 냉온보다 더 낮은 온도를 형성하고 있고 양쪽 측면에서의 외기의 출입 및 외기와의 온도차로 인하여 냉각영역 내부에서 자연대류에 의한 흐름이 형성되게 된다. 따라서, 냉각영역에서 측정된 온도분포는 중앙부의 온도가 양쪽 측면보다 약 1.5 ± 0.5℃ 정도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

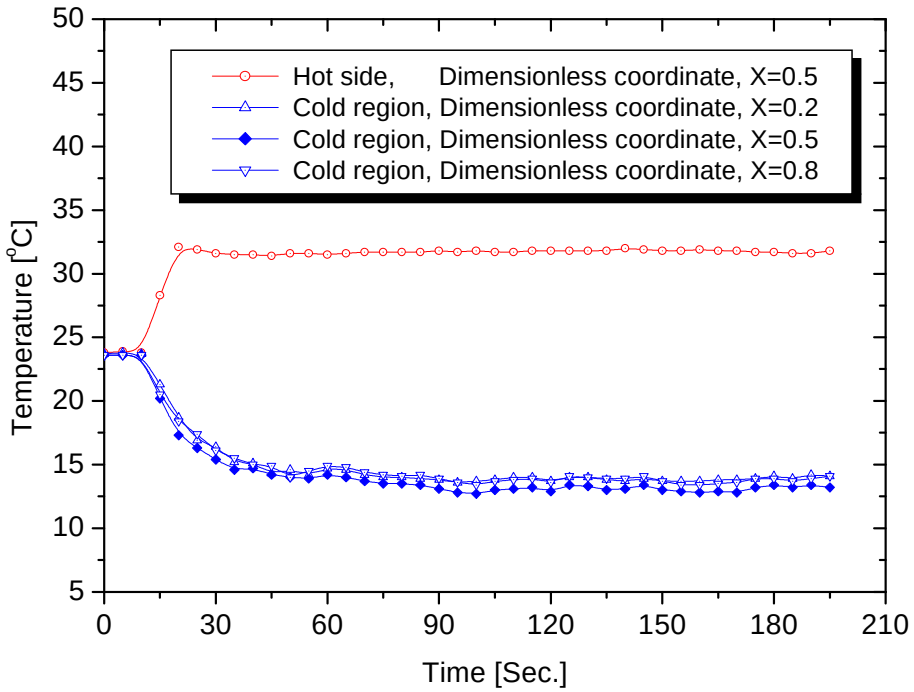


Fig. 43 Profiles of temperature variation on hot side & cold region without piezoelectric actuator

Fig. 44는 열전냉각장치와 압전 액츄에이터 사이의 냉각영역 온도측정 실험과 동일한 조건하에서 압전 액츄에이터를 가진하였을 때 냉각영역에 형성되는 온도분포 측정 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

Fig. 44에서 보는 바와 같이, 냉각영역에 압전 액츄에이터를 가진하였을 때 온도분포 측정 결과는 열전소자에 의해 형성된 냉각영역에서 측정지점인 X=0.2, 0.5 그리고 0.8에서 온도분포가 모두 고르게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 압전 액츄에이터는 앞의 상변화 열전달 실험에서 적용하여 사용한 초음파 진동자와 동일한 메커니즘을 갖는 압전소자를 사용한 장치로서, 일반적으로 액상으로 존재하는 매질내에 음장을 형성하기 위해 초음파 진동자을 사용하지만, 본 연구에서는 매질이 액상영역이 아닌 공기중에 음장을 형성해야 하기 때문에 초음파 진동자 대신에 압전 액츄에이터를 사용한 것이다.

압전 액츄에이터 또한 공기중에서 가진시켰을 경우, 일정한 영역내에 음장이 형성되고 유동장내에 음향흐름이 발생하게 된다. 이러한 음향흐름의 발생은 음압에 기인하는 것으로 앞의 고-액 상변화 열전달 실험을 통해 음압이 열전달을 향상시키는 것을 확인하였다.

Fig. 43과 44에서 확인할 수 있는 것처럼, 열전냉각장치와 압전 액츄에이터 사이의 시험부에 압전 액츄에이터를 가진하였을 경우가 가진하지 않았을 경우보다 측정지점인 무차원 좌표 X=0.2, 0.5 그리고 0.8 전 영역에서 약 15℃ ± 0.5℃ 정도의 고른 온도분포를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 압전 액츄에이터를 가진하지 않은 경우의 온도분포 결과보다 가진하였을 경우의 온도분포 결과가 상대적으로 다소 높게 나타나고 있다.

이는 압전 액츄에이터에 공급된 전기적 에너지가 액츄에이터에서 50Hz의 일정한 주파수를 갖고 상하로 진동하면서 운동에너지로 변환되며 이 때 발생되는 열에너지 및 진동파에 의한 영향으로 냉각영역의 온도분포에 다소 영향을 미친다고 사료된다.

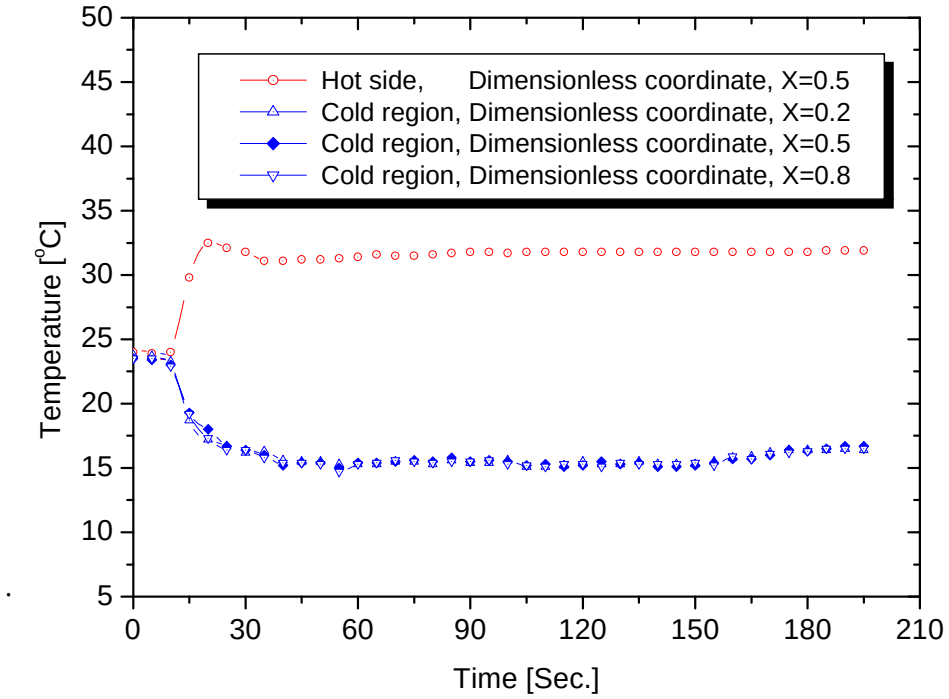


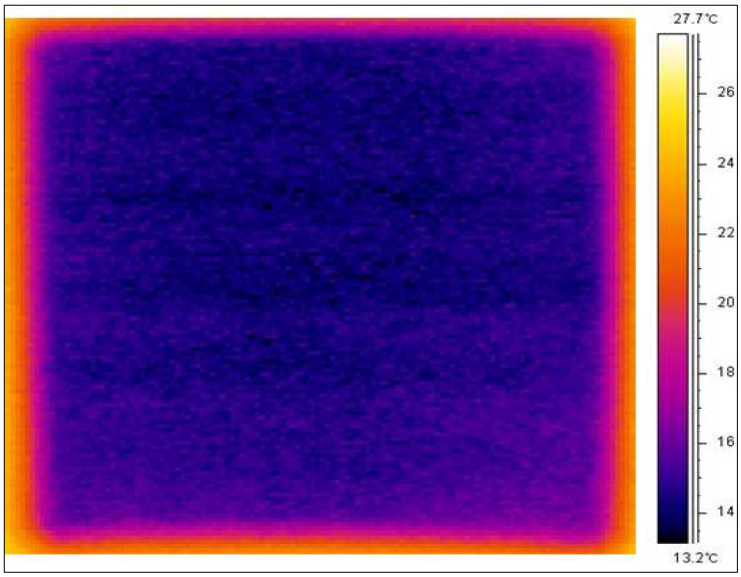
Fig. 44 Profiles of temperature variation on hot side & cold region with piezoelectric actuator

4.2.2 가시화 측정결과

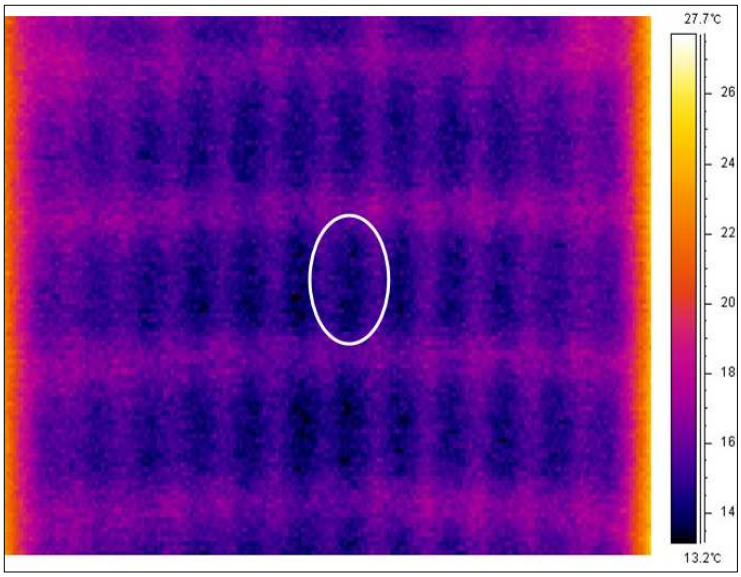
본 연구에서는 열전냉각장치를 구성하여 열전달 프로세스를 형성하고, 열전소자에 인가된 전압이 공급되었을 때 냉각면에 형성되는 온도분포를 적외선열화상카메라를 사용하여 가시화 해 보았다. 또한, 열전소자와 압전 액츄에이터 사이의 시험부에 형성되는 물리적 거동은 열전소자에 인가된 전압을 공급하였을 때, 냉각면에서 시험부로 방출되는 냉온의 유동현상과 압전 액츄에이터만을 가진하였을 때 시험부에 형성되는 유동현상 그리고 열전소자를 작동시키고 동시에 압전 액츄에이터를 가진시켰을 때 시험부에 형성되는 유동현상을 CCD카메라를 이용하여 각각 가시화 해 보았다. 유동현상의 가시화 측정은 He-Ne Laser와 Optic Lens를 이용하여 시험부에 조사단면을 형성시키고 CCD카메라를 이용하여 촬영한 후 Image Grabber를 통해 이미지를 획득하였다.

Fig. 45는 열전냉각장치를 작동시킨 후 약 5초가 지났을 때와 60초가 지났을 때 열전소자 냉각면의 표면온도를 적외선열화상카메라를 이용하여 가시화 한 것이다. Fig. 45(a)는 열전냉각장치를 작동시키고 약 60초가 지났을 때 가시화 한 결과를 보여주고 있는 것으로, 열전소자의 중심부와 양쪽 가장자리(측면부) 사이에는 가시적으로도 확인할 수 있듯이 중심부의 파란색 영역이 측면부 보다는 짙게 형성되고 측면부에서는 다소 연하게 나타나고 있으며, 냉각면의 전 영역에서 약간의 차이는 있지만 냉온(파란색, 약 14 ~ 16℃)이 분포되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 열전소자의 발열면과 냉각면에서 측정한 표면의 온도분포 결과와 유사한 결과를 나타내고 있다. 또한, 열전소자의 가장자리 부분에 형성된 붉은색 영역은 열전소자의 발열면과 방열판이 부착되어 있는 부분으로 발열면에서 발생된 열원이 방열판으로 전도되고 있는 것 또한 확인할 수 있다.

Fig. 45(b)는 열전냉각장치를 작동시킨 후 약 5초 후에 가시화 한 결과를 보여주는 것으로, Fig. 42의 온도분포 결과에서 언급한 바와 같이 p형과 n형 반도체가 세라믹소자에 접촉되어 있는 부분(파란색, 흰색타원으로 표시된 부분)과 접촉되어 있지 않는 부분을 가시적으로 확인할 수 있다.



(a) after 60 seconds



(b) after 5 seconds

Fig. 45 Visualization of temperature distributions on cold side by infrared thermal camera

여기서, 열전냉각장치를 작동시켰을 때 냉각면에서 냉각이 급격히 진행되는 것은 열전현상에 의해 p-n형 반도체 부분에서 발생된 냉온이 세라믹소자에 전도되면서 전 영역으로 냉각이 이루어지게 되며, 특히 냉각면의 중심부에서 집중적으로 냉온이 발생되기 시작하여 측면부로 냉온이 전도되면서 전 영역에 고르게 분포되는 것으로 판단된다.

Figs. 46 ~ 49는 투명아크릴 용기내에 열전냉각장치와 압전 액츄에이터를 설치하여 시험부를 형성하고 유동가시화를 위해 스모그 및 입자를 시험부에 투입한 후 CCD카메라를 이용하여 시험부에 발생되는 물리적 거동을 각각의 경우로 나누어 촬영한 이미지를 보여주고 있다.

Fig. 46은 열전냉각장치를 작동시켰을 때 열전소자의 냉각면에서 시험부로 방출되는 냉온의 유동현상을 보여주고 있다. 열전소자의 냉각면에서 방출되는 냉온은 처음에 냉각면의 중앙부를 중심으로 양쪽 측면으로 퍼져나가면서 시험부에 유동현상을 일으키고 점차 시간이 지나면서 열전소자의 양쪽 측면 가장자리에서 자연대류에 의한 순환(circulation)현상이 일어나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 온도분포 측정결과에서 냉각영역의 중앙부분이 측면부분보다 상대적으로 낮은 온도분포를 형성하고 있음을 뒷받침 해 주고 있다.

Fig. 47은 시험부에 압전 액츄에이터만을 가진하였을 때 형성되는 유동현상을 보여주고 있다. 압전 액츄에이터는 압전소자로 구성되어 인가된 주파수를 공급해 주었을 때 진동을 일으키며 음장을 형성하는 장치로, 초음파 진동을 가진하였을 때와 마찬가지로 압전 액츄에이터를 가진하였을 때 매질 내에는 음향흐름이 형성된다. 이는 Fig. 47에서도 고찰할 수 있는 것처럼, 압전 액츄에이터에 약 50Hz의 인가된 주파수를 공급하였을 때 액츄에이터가 장착된 바닥면에서 시험부 내 상부, 즉 열전소자의 냉각면 쪽으로 상승하는 유동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 시간이 지나면서 점차 강한 상향의 흐름, 즉 음향흐름을 발생시키게 되는데 이를 확인해 보기 위해서 시험부 내에 스모그 대신 나일론입자를 주입시키고 동일한 방법으로 가시화 해 보았다. Fig. 48은 시험부에 나일론입자를 주입하고 압전 액츄에이터만을 가진시켰을 때 시험부 내에 형성되는 유동현상을 관측한 결과이다.

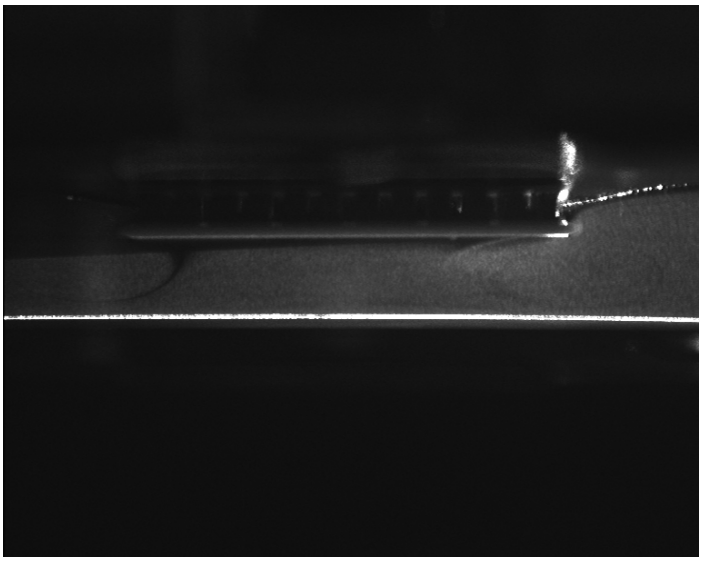


Fig. 46 Visualization of flow phenomena in the test section only operating thermoelectric cooling device

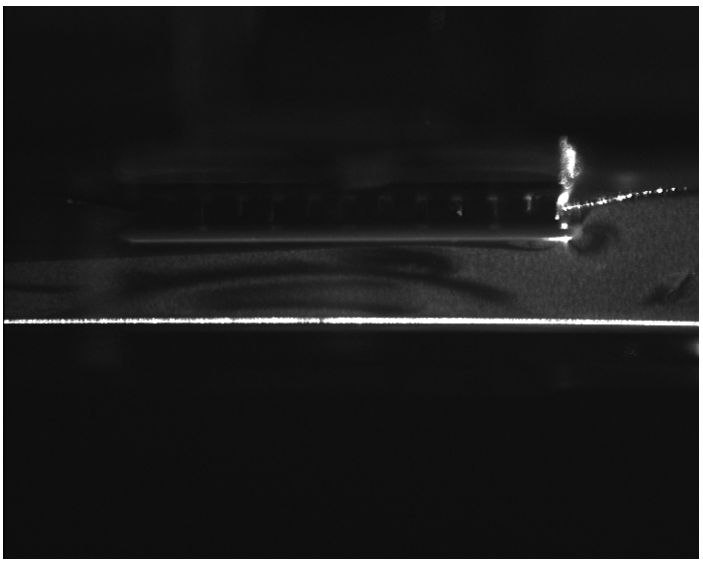


Fig. 47 Visualization of flow phenomena in the test section only operating piezoelectric actuator

Fig. 48에서 보는 바와 같이, 압전 액츄에이터의 중앙부분에서 시험부 내로 강한 상향의 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있고, 이 흐름은 전 영역으로 점차 확대되어 가는 것을 확인할 수 있다. 특히, 액츄에이터 바닥면에서 작은 포물선 형태를 이루며 유동현상이 발달하기 시작하여 시간이 지날수록 포물선의 형태가 점차 확대되고 전체 영역에 걸쳐 나일론 입자의 움직임이 활발하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 흐름은 앞서 언급하였던 음향흐름의 한 형태로 선행 연구에 의해 보고된 내용과도 잘 일치한다.

Fig. 49는 열전냉각장치와 압전 액츄에이터를 동시에 작동시키고 시험부에서 형성되는 유동현상을 가시화하여 나타낸 것이다. Fig. 49에서 보는 바와 같이, 열전소자의 냉각면에서 시험부로 방출되는 냉온은 압전 액츄에이터의 가진으로 인해 발생된 강한 상향의 흐름, 즉 음향흐름으로 인하여 시험부에 국부적으로 일정한 패턴을 갖는 강제대류 유동을 일으키게 된다.

특히, 열전냉각장치만을 작동시켰을 때 열전소자의 냉각면으로부터 방사되던 냉온은 양쪽 측면부에서 자연대류에 의한 순환현상이 발생되고 중앙부에는 특별한 유동현상이 관측되지 않았다. 그러나 열전냉각장치를 작동시키고 압전 액츄에이터를 함께 가진하였을 때 시험부의 유동현상을 살펴보면, 시험부의 양쪽 측면에서 대류에 의한 순환현상과 함께 시험부의 중앙부에도 일정한 형태를 갖으며 국부적으로 순환현상이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

이는 압전 액츄에이터의 가진으로 인해 형성되는 음향흐름이 냉각면에서 시험부 내로 방출하는 냉온을 국부적으로 고르게 순환시켜 냉각영역 전체에 강제적으로 대류현상을 일으키면서 균일한 영역을 형성시켜 주는 것이며, 이러한 가시화 결과는 Fig. 44의 온도분포 측정 결과에서 나타난 바와 같이 시험부의 중앙부와 측면부의 온도가 거의 일정하게 형성되는 것을 뒷받침 해 주는 결과이다.

Fig. 48 Visualization of flow phenomena in the test section added particle only operating piezoelectric actuator

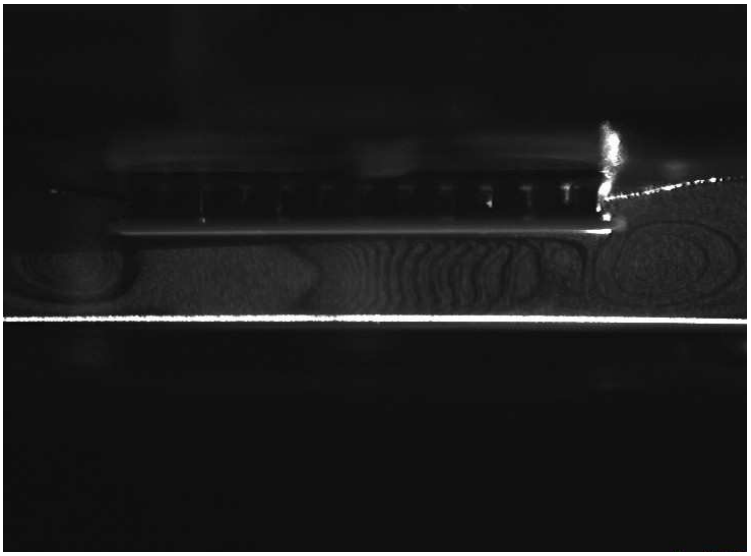


Fig. 49 Visualization of flow phenomena in the test section operating thermoelectric cooling device and piezoelectric actuator

제 5 장 결 론

본 연구에서는 압전소자로 구성된 초음파 진동자와 압전 액츄에이터를 각각 사용하여 상변화 물질의 용융과정에서 발생하는 열전달 현상과 열전냉각장치의 냉각영역에서의 열전달 현상에 대해 고찰해 보았다. 또한, 압전소자를 가진하였을 때 발생되는 음향흐름과 음압 그리고 열전달 향상과의 관계를 규명해 보았으며, 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 상변화 물질의 용융과정에서 초음파 진동을 가진하였을 경우, $q''=11517.43W/m^2$와 $q''=6436.21W/m^2$의 열유속이 각각 주어졌을 때 무차원 시간 $F_oSte^*=0.9\times10^5$와 $F_oSte^*=1.2\times10^5$ 이후에서 대류영역이 활성화되며 용융이 촉진되지만, 전도영역에 초음파 진동을 가진하여 열전달을 촉진시키고자 하는 방법은 열전달 향상에 거의 영향을 미치지 못하고 비효율적이다.

2. 상변화 열전달 프로세스에 초음파 진동을 가진하면, 강한 상향의 흐름인 음향흐름이 발생하여 자연대류로 형성된 안정된 열경계층을 파괴하는 열유동을 발달시켜 열전달이 촉진되고 상변화 물질의 용융도 최고 약 2.5배 촉진시킬 수 있으며, 초음파 진동의 가진으로 인해 액상영역에서 발생하는 음압분포는 음향흐름을 야기시켜 약 1.5배 정도의 열전달 향상을 가져왔다.

3. 열전냉각장치의 열전달 프로세스에 압전 액츄에이터를 가진시키면 냉각영역에 음향흐름이 형성되는 것을 확인하였고, 음향흐름은 냉각면에서 시험부 내로 방출하는 냉온을 일정한 패턴을 갖고 국부적으로 고르게 순환시키는 강제대류 유동을 일으켜 냉각영역 전체에 약 15℃ ± 0.5℃의 균일한 온도분포를 형성시키며 열전달 향상에 기여한다.

참 고 문 헌

1. I.K. Chung, J.S. Kim and D.J. Song, "Natural Convective Flow and Heat Transfer in a Square Enclosure with a Horizontal Partition", J. of KSME, Vol. 17, No. 9, pp. 2304-2314, 1993.

2. 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", Trans. of the KSME, pp. 1049-1053, 2007.

3. S.Y. Yoo, C.P. Hong and W.S. Shim, "A Study on the Performance of Thermo -electric Module and Thermoelectric Cooling System", J. of Refrigeration and Air Conditioning Eng., Vol. 16, No. 1, pp. 62-69, 2004.

4. A.E. Bergles, "Some Perspective on Enhanced Heat Transfer-Second Generation Heat Transfer Technology", Trans. of the ASME, Vol. 110, pp. 1082-1096, 1988.

5. H. Senftleben, "Die einwirkung elektrischer und magnetischer felder auf des warmeleitvermogen von gasen", Physik Z. 32, pp. 550, 1931.

6. P.G. Kroeger, "The Solution of a Two-Dimensional Freezing Problem including Convection Effects in the Liquid Region", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.17, pp. 1191-1207, 1974.

7. N.W. Wilson and J.J. Lee, "Melting of a Vertical Ice Wall by Free Convection into Fresh Water", J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 13-17, 1981.

8. C. Benard, D. Gobin and A. Zanoli, "Moving Boundary Problem: Heat Conduction in the Solid Phase of a Phase-Change Material during Melting driven by Natural Convection in the Liquid", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, pp. 1669-1681, 1986.

9. F. Wolff and R. Viskanta, "Solidification of a Pure Metal at a Vertical Wall in the Presence of Liquid Superheat", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 1735-1744, 1988.

10. E.M. Sparrow, L. Lee and N. Shamsundar, "Convective Instability in a Melt Layer Heated from Below", J. of Heat Transfer, Vol. 98, pp. 88-94, 1976.

11. N.W. Hale and R. Viskanta, "Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer and Interface Motion in Material Cooled or Heated from Above or Below", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 283-292, 1980.

12. S.H. Davis, U. Muller and C. Dietshe, "Pattern Selection in Single-Component Systems Benard Convection and Solidification", J. Fluid Mechanics, Vol. 144, pp. 133-151, 1984.

13. R.A. Brewster and B. Gebhart, "An Experimental Study of Natural Convection Effects on Downward Freezing of Pure Water", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 331-348, 1988.

14. P. Jany and A. Bejan, "Scaling Theory of Melting with Natural Convection in an Enclosure", J. of Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 1221-1235, 1988.

15. E.M. Sparrow, S.V. Patankar and S. Ramadhydai, "Analysis of Melting in the Presence of Natural Convection in the Melt Region", J. of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 520-526, 1977.

16. A.G. Bathelt and R. Viskanta, "Heat Transfer at the Solid-Liquid Interface during Melting from a Horizontal Cylinder", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1493-1503, 1980.

17. H. Rieger, U. Projahnm and H. Beer, "Analysis of the Heat Transport Mechanisms during Melting around a Horizontal Circular Cylinder", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 137-147, 1982.

18. C.J. Ho and S. Chen, "Numerical Simulation of Melting of Ice around a Horizontal Cylinder", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, pp. 976-978, 1986.

19. E.M. Sparrow, J.W. Ramsey and R.G. Kemink, "Freezing Controlled by Natural Convection", J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 578-584, 1979.

20. M.H. Chun, H.O. Choi and H.G. Jun, "Phase-Change Front Prediction by Measuring the Wall Temperature on Which Solidification Occurs", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 2641-2650, 1987.

21. E.M. Sparrow and J.A. Broadbent, "Inward Melting in a Vertical Tube Which Allows Free Expansion of the Phase-Change Medium", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 309-315, 1982.

22. E.M. Sparrow and J.A. Broadbent, "Freezing in a Vertical Tube", J. of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 217-225, 1983.

23. T. Saitoh and K. Hirose, "High Rayleigh Number Solutions to Problems of Latent Heat Thermal Energy Storage in a Horizontal Cylinder Capsule", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 534-553, 1982.

24. H. Reiger, U. Projahn, M. Bareiss and H. Beer, "Heat Transfer during Melting inside a Horizontal Tube", J. of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 226-234, 1983.

25. C.J. Ho and R. Viskanta, "Heat Transfer during Inward Melting in a Horizontal Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, pp. 705-716, 1984.

26. H. Rieger and H. Beer, "The Melting Process of Ice inside a Horizontal Cylinder", J. of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 166-173, 1986.

27. L.C. Tao, "Generalized Numerical Solutions of Freezing a Saturated Liquid in Cylinders and Spheres", AIChE J., Vol. 13, pp. 165-169, 1967.

28. D.S. Riley, F.T. Smith and G. Poots, "The Inward Solidification of Spheres and Cylinders", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp. 1507-1516, 1974.

29. S.C. Gupta, "Analytical and Numerical Solutions of Radically Symmetric Inward Solidification Problems in Spherical Geometry", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 2611-2616, 1987.

30. F.E. Moore and Y. Bayzitoglu, "Melting with in a Spherical Enclosure", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 19-23, 1982.

31. S.H. Eerman and D.L. Turcotte, "Stokes' Problem with Melting", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, pp. 1625-1630, 1983.

32. C. Gau and R. Viskanta, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall, J. of Heat Transfer 108 pp. 204-209, 1986.

33. Y.G. Oh, S.H. Park and K.O. Cha; "An Experimental Study of Accelerating Phase Change Heat Transfer", KSME Int. J., Vol. 15, pp. 1882-1891, 2001.

34. J.S. Se and S.T. Ro, "Close-Contact Melting of Ice in a Horizontal Cylinder", KSME Vol. 19, No. 10, pp. 2595-2606, 1995.

35. D. Nicholas and Y. Bayazitoglu, "Heat Transfer and Melting Front within a Horizontal Cylinder", J. of Solar Energy Engineering, Vol. 102, pp. 229-232, 1980.

36. J.K. Ives and B.J. Goodman, "High Temperature Molten Salt Storage Concept", Proc. 21st IECEC, Vol. 2, pp. 862-866, 1986.

37. M. Bareiss and H. Beer, "Analytical Solution of the Heat Transfer Process during Melting of an Unfixed Solid Phase Change Material inside a Horizontal Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, pp. 739-746, 1984.

38. A.B. Crowley, "Numerical Solution of Stefan Problems", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 215-219, 1978.

39. S.B. Yum and C.S. Hong, "Heat transfer characteristics for Inward Melting in a Paraffin-Filled vertical cylinder", J. of Solar Energy, Vol. 12, No. 3, pp. 60-69, 1992.

40. C. Parkash and V. Voller, "The Numerical Solution of Continuum Mixture Model Equations Describing Binary Solid-Liquid Phase Change", Numerical Heat Transfer, Vol. 15, pp. 171-189, 1989.

41. J.H. Wang and D.H. Kim, "Numerical Analysis of Melt/Solid Interface Shape in Zone Melting Re-crystallization Process", J. of Crystal Growth, Vol. 173, pp. 201-209, 1997.

42. C.J. Kim and M. Kaviany, "A Numerical Method for Phase Change Problems with Convection and Diffusion", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 457-467, 1992.

43. S.Y. Ahamed, "Axial Distribution of Bulk Temperature and Void Fraction in a Heated Channel with Inlet Subcooling, Trans. of the ASME, Vol. 92, No. 4, pp. 595-609, 1970.

44. J.H. Kim and C.H. Kim, "A Study on the Subcooled Boiling Heat Transfer in a Horizontal Tube", J. of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 18, No. 3, pp. 276-283, 1994.

45. M.W. Wambsganss, D.M. France, J.A. Jendrzejczyk and T.N. Tran, "Boiling Heat Transfer in a Horizontal Small-Diameter Tube", J. of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 963-972, 1993.

46. J.S. Kim, "Development of Small-Diameter-Tube Heat Exchangers", Proc. of Heat Exchanger Workshop, pp. 1-10, 1998.

47. Y.W. Hwang, S.H. Yoon and M.S. Kim, "A Study of the Characteristics of Evaporative Heat Transfer for R-143a in a Small Diameter Tube", Proc. of the KSME, Spring, pp. 572-575, 1999.

48. C. Huh and M.H. Kim, "An Experimental Investigation of Flow Boiling in a Microchannel", Proc. of the KSME, Spring Annual Meeting, pp. 2039-2044, 2005.

49. X.F. Peng and B.X. Wang, "Forced Convection and Boiling Characteristics in microchannels", Proc. 11th Int. Heat Transfer, pp. 371-390, 1998.

50. T.N. Tran, M.W. Wambsganss and D.M. France, "Small Circular - and Rectangular - Channel Boiling with Two refrigerants", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, pp. 485-498, 1996.

51. H.J. Lee and S.Y. Lee, "Heat Transfer Correlation for Boiling Flows in Small Horizontal Channels with Low Aspect Ratios", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 27, pp. 2043-2062, 2001.

52. A.M. Jacobi and J.R. Thome, "Heat Transfer Model for Evaporation of Elongated bubbles Flows in Microchannels", J. Heat Transfer, Vol. 124, pp. 1131-1136, 2002.

53. M.H. Lee, D.K. Kim, S.K. Lee and D.R. Rim, "Coolant Flow and Conjugate Heat Transfer Analysis of Internal Combustion Engines under Subcooled Nucleate Boiling Conditions", KSAE Spring Conference, pp. 305-310, 2005.

54. S.Y. Yoo, B.S. Joo, J.H. Kam, S.Y. Lee and K.Y. Kim, "A Study on the Cooling Performance of Thermoelectric Module", Trans. of the KSME, pp. 670-675, 1995.

55. H.J. Lee, H.S. Park and C.J. Kim, "Numerical Analysis on the Cooling of Laser Diode Package with Thermoelectric Cooler", Trans. of the KSME, B, pp. 309-315, 1999.

56. J.Y. Kim and M.D. Oh, "Experiment on the PDP Cooling Characteristics by Thermoelectric Module and Conduction Block", Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., pp. 158-163, 2000.
57. M. Solomon, "Determination of TE Module Parameters", 18th Int. Conf. on Thermoelectrics, pp. 519-524, 1998.

58. A. Miner and A. Majumdar, "Thermo-Electro Mechanical Refrigeration Based on Transient Thermoelectric Effects", Proc. of the 18th Int. Conf. on Thermo-Electrics, pp. 27-30, 1999.

59. B.J. Huang, C.L Duang and C.J. Chin, "A Design method of Thermoelectric Cooler", Int. J. Refrigeration, Vol. 23, pp. 208-218, 2000.

60. G.S. Attey, "Enhanced Thermoelectric Refrigeration System COP Through Low Thermal Impedance Liquid Heat Transfer System", Proc. of the 17th Int. Conf. on Thermoelectrics, pp. 519-524, 1998.

61. M. Yamanashi, "A New Approach to Optimum Design in Thermoelectric Cooling Systems", J. Appl. Phys., Vol. 80, No. 9, pp. 5494-5512.

62. B.H. Kang, H.J. Chang, S.Y. Kim and S. Kim, "Cooling Characteristics at Hot Side of the Thermoelectric Module for an Air Conditioner", Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 14, No. 3, pp. 482-488, 2002.

63. 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.

64. 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.

65. K.H. Lee and O.J. Kim, "Effect of the Thermoelectric Element Thickness on the Thermal Performance of the Thermoelectric Micro-Cooler", Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 18, No. 3, pp. 211-217, 2006.

66. 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.

67. J.H. Jin, J.R. Cho and M.G. Kim, "Study on the performance of showcase refrigerating chamber using thermoelectric module", Proceedings of the SAREK 2002 Winter Annual Conference, pp. 35-40, 2002.

68. 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 Pulasting Heat Pipe", Transaction of the KSME, pp. 140-145, 2006.

69. J.M. Kim, M.G. Kim and H.S. Chung, "Analysis of the thermal performance of cosmetics cooler by thermoelectric cooling", Trans. of the KSME, pp. 146-151, 2006.

70. H. Schliting, "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, New York, 1968.

71. R.M. Fand, J. Roods, P. Cheng and J. Kaye, "The Local Heat Transfer Coefficient Around a Heated Horizontal Cylinder in an Intense Sound Field", Trans. ASME, pp. 245-256, 1962.

72. Y. Iida, K. Tsutsui, R. Ishii and Y. Yamada, "Natural Convection Heat Transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure", J. of Chemical Engineering of Japan, Vol 24, pp. 794-796, 1991.

73. Nomura, "Heat transfer enhancement by ultrasonic vibration", ASME / JSME Thermal Eng. Joint Conference-Proceedings New York, NY, ASME, Vol. 4, pp. 275-282, 1995.

74. S.H. Lee, S. Heo, C.W. Kim and K.J. Yoon, "Analysis of Piezoelectric Actuator for Valveless Micropumps", Trans. of the KSME, pp. 1581-1586, 2005.

75. J. Jeong, D.H. Kim and C.N. Kim, "A Numerical Study on the Flow Characteristics for a Micropump using Piezoelectric Material", Proc. of the SAREK 2004 Winter Annual Conference, pp. 69, 2004.

76. J. Choi, W.P. Jeon and H.C. Choi, "Control of Flow around and Airfoil Using Piezo-ceramic Actuators", Proc. of the KSME 2000 Spring Annual Meeting, pp. 491-496, 2000.

77. J.I. Park, H.C. Choi and W.P. Jeon, "Active Control of Flow over a Sphere Using Electro-Magnetic Actuators", Proc. of the KSME 2000 Spring Annual Meeting, pp. 497-501, 2000.

78. C.S. Hong, "Studies on Heat Storing and Retrieving Characteristics in a Paraffin -Filled Horizontal Circular Tube", Ph.D. Thesis, Seoul National University, 1990.

79. S. Masahiro, "Heat Transfer", Korean edition, Sigma press, Seoul, Korea, 1995.

80. D.G. Lee, "A Study on the Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV and CFD", M.S. Thesis, Chosun University, 2001.

81. 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.

82. G.M. Gladwell and G. Zimmermann, "On Energy and Complementary Energy Formulation of Acoustic and Structural Vibration Problems". J. Sound. and Vib., Vol. 3, pp. 233-241, 1966.

83. P.L. Arlett and O.C. Zienkiewicz, "Application of Finite Element to the Solution of Helmholtz's Equation", Proc. IEE., Vol. 115, 1968.

84. J.R. Barbosa and G.F. Hewitt, "Forced convective boiling of binary mixture in annular flow", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 44, pp. 1475-1484, 2001

85. I. Yoshihiro, T. Kentarou and I. Reiko, "Natural-Convection Heat Transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure", J. of Chemical Engineering of Japan, Vol. 4, No. 6, pp. 794-796, 1991.

86. V. Frenkel, R. Gurka, A. Liberzon and U. Shavit, "Preliminary Investigations of Ultrasonic induced Acoustic Streaming using Particle Image Velocimetry", Ultrasoincs, Vol. 39, pp. 153-156, 2001.

87. W.G. Cutler, R.H. McMickle, W. Webb and R.W. Schiessler, J. Chem. Phys., Vol. 29, pp. 727, 1958.

감사의 글

학위과정동안 제 자신에게 주문했던 것 중의 하나가 “항상 긴장하면서 매사에 최선을 다하자!” 이었습니다. 하루하루가 긴장의 연속이었고 해이해 진 정신을 바로잡아 준 것 또한 바로 긴장하는 것이었으며 후회하지 않을 만큼 최선을 다하고자 하였습니다. 그러나 학위논문을 마무리하는 지금에 와서 돌이켜 생각해 보니, 그 동안 저를 위해 애써주시고 격려와 조언을 아끼지 않으신 모든 분들에게 소홀했던 건 아닌지 하는 죄송한 마음이 앞서며 이 글을 대신해 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 두 아들의 건강을 항상 걱정하며 모든 하는 일에 믿음과 용기를 주시고 지켜봐 주신 사랑하는 부모님께 머리 숙여 진심으로 감사의 인사를 올립니다.

“우물 안 개구리”가 되지 말고, 큰 그림을 그려 도전해 보라고 하시며 학문적 대안과 격려를 아끼지 않으시고 항상 의미 깊은 말씀과 사람으로서 지켜야 할 도리를 깨우칠 수 있게 지도해 주시며 보살펴 주신 오율권 교수님께 마음속 깊이 감사의 말씀을 드립니다.

또한, 부족함과 오류가 많았던 제자의 학위논문에 대해 날카로운 지적과 조언으로 보다 더 충실한 논문이 될 수 있도록 심사과정에서 지도편달을 아끼지 않으신 기계공학과 김진홍 교수님, 김병철 교수님, 홍명석 교수님 그리고 기계설계공학과 정낙규 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고, 학부과정부터 지금에 이르기까지 학문적 기초를 마련해 주시고 따뜻한 격려의 말씀으로 이끌어주신 김영석 교수님, 심재기 교수님, 이동기 교수님, 김재열 교수님, 유영태 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러, 학위과정동안 BK21-첨단소재부품 금형기술 인력양성 사업단의 해외단기연수 프로그램 지원 및 NURI-첨단부품소재 전문인력양성 사업단의 기자재 구축 사업을 통해 본 학위논문이 완성될 수 있도록 연구수행에 도움을 주신 기계설계공학과 양인영 교수님과 기계공학과 차용훈 교수님께 감사의 인사를 드리며, 연구과제에 연구보조원으로 참여시켜 연구수행을 위한 격려와 지원은 물론 연구실적 축적에도 도움을 주셨던 기계설계공학과 나기대 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다.

또한, 학위과정동안 강의경험을 쌓을 수 있도록 자리를 마련해 주시고 따뜻한 격려와 진로에 대해 각별한 관심과 조언을 아끼지 않으신 전남도립 남도대학 김종명 교수님과 최용호 교수님께 감사드리며, 지역혁신인력양성사업 수행에 있어서 누구보다도 따뜻하게 맞이하여 주시고 연구수행에 물심양면으로 도와주신 (주)세화기계 최영안 부사장님께도 머리 숙여 감사의 인사를 올립니다.

무엇보다도 오랜 기간 동안 실험실에서 그리고 졸업 후에도 항상 관심과 격려를 아끼지 않으셨던 한영대학 박근욱 교수님, 광주인력개발원 서동표 교수님과 강원종 선배님, 윤정환 선배님, 임태훈 선배님 그리고 제게 더 큰 꿈과 도전의 기회를 마련해 주고 이끌어 주고자 물심양면으로 도와주신 미국 NIST의 박설현 박사님과 형수님께 깊은 감사의 인사를 드립니다. 또한, 힘들고 어려울 때에도 부족한 저를 믿고 함께 하면서 최선을 다해준 고맙고 사랑스런 김용범, 김영선, 윤희성, 최제세 후배님께도 이 글을 빌어 다시 한 번 감사드립니다. 특히, 학부과정부터 지금까지 믿고 의지할 수 있어 너무나도 고맙고 학문적으로도 많은 도움을 준 나의 벗, 신호준 박사에게도 감사의 말을 전합니다.

아울러, 정밀기계공학과 강태식 선배님과 송경석 박사님, 김진우 박사님을 비롯한 대학원생 여러분들께도 감사의 뜻을 전하며, 박사학위 과정동안 학문적 교류와 함께 많은 도움을 주신 기계설계공학과 이길성 박사님, 김창오 박사님, 기계공학과 최병희 박사님, 김광호 박사, 이승철 박사, 전기공학과 고필주 박사에게도 감사를 드립니다.

그리고, 올해 결혼을 한 승민이와 연화 그리고 신규와 현정씨에게도 이 글을 빌어 다시 한 번 결혼 축하와 감사의 말을 전하고, 객지에서 고생하고 있는 성수에게도 미안함과 고마움을 표하며, 정밀기계공학과 96학번 동기들과 후배님들을 비롯하여 일일이 명명할 수는 없지만 저를 지켜봐 주시고 격려해 주신 모든 분들에게 감사의 글을 올립니다.

마지막으로, 먼 이국땅에서 스스로의 힘으로 열심히 생활하며 더 나은 삶을 위해 미래를 개척하고 있을 내 동생 호현이에게 잘 챙겨주지 못한 미안함과 함께 오히려 형을 걱정해 주는 마음에 다시 한 번 고맙다는 말을 전합니다.

2008년 7월

양호동 올림

저작물 이용 허락서

학 과	정밀기계공학과	학 번	20057425	과 정	박사
성 명	(한글) 양 호 동 (한문) 梁 澔 東 (영문) Yang, Ho-Dong				
주 소	광주광역시 남구 백운동 598-21번지				
연락처	E-mail : hodongy@yahoo.co.kr				
논문제목	(한글) 압전소자의 진동을 받는 유체의 열전달 특성에 관한 연구				
	(영문) A Study on Characteristics of Heat Transfer in a Fluid by Piezoelectric Vibration				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2008년 8월 25일

저작자: 양 호 동 (인)

조선대학교 총장 귀하