



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](#)

2016년 2월
석사학위논문

펄스 레이저의 매질 흡수에 의해
발생하는 열 효과 시뮬레이션 및
해석에 관한 연구

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

장 경 민

펄스 레이저의 매질 흡수에 의해
발생하는 열 효과 시뮬레이션 및
해석에 관한 연구

Simulation and Analysis of Thermal Effects Induced by Pulsed
Laser Absorption in Optical Media

2015년 12 월 10 일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

장 경 민

펄스 레이저의 매질 흡수에 의해
발생하는 열 효과 시뮬레이션 및
해석에 관한 연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 12월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

장 경 민

장 경 민의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 인

위 원 조선대학교 교수 박 종 락 인

2015년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제2장 이론적 배경	3
제1절 펄스 레이저의 매질 내 흡수	3
제2절 열 확산 방정식	6
제3절 열 발생률 $q(r,z)$ 계산을 위한 Matlab 코드	8
제3장 시뮬레이션 결과 및 논의	10
제1절 레이저 펄스 폭 의존성	10
1. 시뮬레이션 조건	10
2. 시뮬레이션 결과	10
3. 논의	11
4. 식 (3.3) 계산에 사용된 Matlab 코드	12
제2절 레이저 빔 직경 의존성	23
1. 시뮬레이션 조건	23
2. 시뮬레이션 결과	23
3. 논의	24
4. 멱함수 곡선 맞춤을 위해 사용된 Matlab 코드	26
제3절 매질의 흡수 계수 의존성	39
1. 시뮬레이션 조건	39
2. 시뮬레이션 결과	39
3. 논의	40
제4장 결론	50

[참고문헌] 51

[감사의 글] 55

그림 목차

그림. 2.1 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $E = 2.5 \text{ mJ}$, $\tau = 5 \text{ ns}$, $\phi = 0.5 \text{ mm}$, $n_R = 1.4$, $\alpha = 3 \text{ mm}^{-1}$ 인 경우 계산한 열 발생률 $q(r, z)$	5
그림. 3.1 ANSYS Fluent의 시뮬레이션 레이아웃	19
그림. 3.2 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과	20
그림. 3.3 레이저 펄스 폭 변화에 따른 (a) 최대 온도 상승치 변화와 (b) 온도 민감도 상수 변화	21
그림. 3.4 식 (3.3)을 이용하여 계산한 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치 예측 결과	22
그림. 3.5 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과	32
그림. 3.6 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 민감도 상수의 빔 직경에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과	33
그림. 3.7 매질의 흡수 계수가 3 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과	34
그림. 3.8 매질의 흡수 계수가 3 mm^{-1} 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 민감도 상수의 빔 직경에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과	35
그림. 3.9 매질의 흡수 계수가 6 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과	36
그림. 3.10 매질의 흡수 계수가 6 mm^{-1} 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 민감도 상수의 빔 직경에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과	37
그림. 3.11 흡수 계수가 1 mm^{-1} , 3 mm^{-1} , 6 mm^{-1} 일 때 빔 직경 변화에 따른 온도	

시감쇠 상수의 변화	38
그림. 3.12 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과	45
그림. 3.13 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 흡수 계수에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과	46
그림. 3.14 레이저 빔 직경 3.0 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과	47
그림. 3.15 레이저 빔 직경 3.0 mm 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 흡수 계수에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과	48
그림. 3.16 빔 직경이 0.5 mm, 3.0 mm일 때 흡수 계수 변화에 따른 온도 시감쇠 상수의 변화	49

표 목차

표 3.1 본 논문에서 시뮬레이션을 위해 공통적으로 사용한 매질의 특성 상수와 레이저 파라미터	14
표 3.2 시뮬레이션에 사용한 표면대류 조건	15
표 3.3 열 효과의 레이저 펄스 폭 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건	16
표 3.4 레이저 펄스 폭 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과	17
표 3.5 레이저 펄스 폭 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수에 대해 식 (3.4)을 사용하여 계산한 결과(괄호 안의 숫자는 시뮬레이션 결과와의 오차를 의미함.)	18
표 3.6 열 효과의 레이저 빔 직경 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건	28
표 3.7 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과	29
표 3.8 매질의 흡수 계수가 3 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과	30
표 3.9 매질의 흡수 계수가 6 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과	31
표 3.10 열 효과의 흡수 계수 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건	42
표 3.11 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과	43
표 3.12 레이저 빔 직경이 3.0 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과	44

ABSTRACT

Simulation and Analysis of Thermal Effects Induced by Pulsed Laser Absorption in Optical Media

By Kyungmin Jang

Advisor : Prof. Jong-Rak Park, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

We investigated the thermal effects induced by pulsed laser absorption in an optical medium through simulations of the thermal diffusion equation. In particular, the dependences of maximum temperature increase and decay time constant on the laser pulse width, beam diameter, and absorption coefficient were examined.

As the laser pulse width increased, the maximum temperature increase decreased and the decay time constant increased. It was found that the temporal behaviors of the temperature increase could be predicted by the convolution of the response function of the system with a very short laser pulse and a square pulse function corresponding to the laser pulse width. As the laser beam diameter increased, the maximum temperature increase decreased and the decay time constant increased, too. The maximum temperature increase showed the inverse square dependence on the laser beam diameter, and the decay time constant was found to be almost independent of the laser beam diameter for relatively large absorption coefficients. As the absorption coefficient increased, the maximum temperature increase increased and the decay time constant decreased. The maximum temperature increase was directly

proportional to the absorption coefficient, and the decay time constant was found to be almost independent of the absorption coefficient for relatively small laser beam diameters.

It is expected that the results of this study will provide valuable information for the prediction and analysis of experiments on evoking tactile sensations by using a pulsed laser executing varying laser pulse width, laser beam diameter, and wavelength.

제1장 서론

레이저(LASER)는 전자기 방사의 유도 방출에 의한 빛의 증폭을 의미하는 영문 “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”의 머리글자로 만들어진 용어이다. 1960년 미국의 메이먼(T. H. Maiman)에 의해 최초의 레이저가 개발된 이후 물리학, 화학뿐만 아니라 재료과학, 생명과학, 의학 등 거의 모든 과학 및 공학 분야에 큰 파급효과를 주고 있으며, 현대 최첨단 기술개발을 위해 없어서는 안 될 필수적인 광원으로 활용되고 있다.^[1,2]

레이저와 매질과의 상호작용, 특히 생체 조직과의 상호작용에 대해서는 레이저 개발 직후부터 매우 광범위하고 활발한 연구가 진행되었으며, 상호작용의 주요 기작들이 매우 잘 밝혀져 있다. 레이저의 에너지 밀도가 $1 \text{ J/cm}^2 \sim 1000 \text{ J/cm}^2$ 정도일 때, 레이저 노출 시간에 따라 100 fs ~ 100 ns 영역에서 광 파괴(photodisruption), 100 fs ~ 500 ps 영역에서 플라즈마 유도 제거(plasma-induced ablation), 10 ns ~ 100 ns 영역에서 광 제거(photoablation), 1 $\mu\text{s} \sim 1 \text{ min}$ 영역에서 열적 상호작용(thermal interaction), 1 s ~ CW(continuous wave) 영역에서 광화학적 상호작용(photochemical interaction) 등이 발생할 수 있음이 알려져 있다.^[3]

광-기계적 효과라 할 수 있는 광 파괴, 플라즈마 유도 파괴, 광 제거는 모두 매질에 손상을 유발하는 상호작용이다. 최근, 매질에 손상을 발생시키지 않으면서 광-기계적 효과를 발생시킬 수 있는 기술이 제안되어 활발히 연구되고 있다.^[4,5] 레이저 유도 열탄성 효과(laser-induced thermoelastic effects)에 기반한 기술로 피부조직에 손상 없이 체성 감각을 일으킬 수 있음이 발견되었으며,^[6] 레이저 펄스 에너지가 증가함에 따라 체성 감각을 느낄 확률 또한 증가하고 있음이 보고되었다.^[7] 아크릴 테이프 등과 같은 매질을 사용한 체성 감각의 간접적 유도 방법 또한 연구되고 있다.^[8]

기존에 사용되었던 체성 감각 유도 기술은 주로 통증 및 가려움 유발을 위해 기계적,^[9] 열적,^[9,10] 전기적인 기술^[9,11]을 이용하여 피부에 직접적인 접촉을 해야 하며, 자극량, 자극 위치, 자극 형태 제어의 시간적·공간적 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 레이저 유도 열탄성 효과를 이용하여 직접적으로

접촉하지 않으면서 촉감을 구현하는 촉감 제시 기술에 대한 연구가 활발하다.^[6,7]

레이저 유도 열탄성 효과는 펄스 레이저가 피부나 아크릴 테이프 등과 같은 매질에 흡수될 때 펄스 레이저의 에너지가 순간적으로 열로 변환되어 국소적인 온도 상승이 발생하고 이에 수반하여 열 변형이 일어나는 현상을 의미한다.^[12-16] 따라서, 펄스 레이저가 매질에 흡수된 후 발생하는 열 효과에 대한 이해가 전체 레이저 유도 열탄성 효과를 이해하는데 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 레이저 유도 열탄성 효과에 대한 실험을 수행할 때, 변화시킬 수 있는 레이저 파라미터에는 펄스 에너지, 펄스 폭, 빔 직경, 파장 등이 있다. 촉감 조절을 위해 펄스 레이저 빔의 직경을 변화시키는 방법^[17]과 레이저 유도 열탄성 효과의 레이저 펄스 폭 의존성에 대한 연구^[18] 등이 활발히 보고되고 있다. 레이저의 파장이 변화될 경우 매질이 지닌 광학적 특성의 파장 의존성에 의해 레이저의 매질 내 전파 및 흡수 효과가 다르게 나타난다.

본 논문에서는 펄스 레이저의 매질 흡수에 의해 발생하는 열 효과에 대한 시뮬레이션과 해석에 관한 연구를 수행하였다. 레이저 펄스 폭, 빔 직경, 흡수 계수를 변화시키며 열 확산 방정식(thermal diffusion equation)을 사용하여 시간에 따른 매질의 온도변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 최대 온도 상승치, 온도 시감쇠 상수 등에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하고 이에 대해 분석하였다. 제2장에서는 이론적 배경에 대해 소개하였고, 제3장에서는 시뮬레이션 및 분석 결과에 대해 기술하였고, 마지막 제4장에서는 본 논문의 연구결과를 종합하여 요약 및 정리하였다.

제2장 이론적 배경

제1절 펄스 레이저의 매질 내 흡수

레이저의 공간 프로파일이 가우시안(Gaussian)인 경우 펄스 레이저의 매질 내 흡수에 의한 열 발생률(heat generation rate) $q(r, z)$ 는 원통 좌표계에서 레이저 펄스가 지속되는 동안 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.^[19]

$$q(r, z) = \alpha(1 - R) \frac{E}{\tau} \frac{2}{\pi \omega^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega^2}\right) \exp(-\alpha z) \quad (2.1)$$

위 식에서 α 는 흡수 계수를, R 은 공기와 매질 경계면에서의 반사율을, E 는 레이저의 펄스 에너지를, τ 는 레이저의 펄스 폭을, ω 는 레이저 빔의 반경($1/e^2$ 기준)을 각각 의미한다. 레이저 빔의 반경 ω 와 본 논문에서 사용한 레이저 빔의 직경 ϕ ($1/e$ 기준)는 다음과 같은 관계를 갖고 있다.

$$\phi = \sqrt{2} \omega \quad (2.2)$$

매질의 굴절률(실수부)이 n_R 이고 굴절률 허수부에 해당하는 소멸 계수(extinction coefficient)가 n_I 일 때, 공기와 매질 경계면의 반사율 R 은 다음과 같이 주어진다.^[20]

$$R = \left[\frac{(n_R + in_I) - 1}{(n_R + in_I) + 1} \right] \left[\frac{(n_R + in_I) - 1}{(n_R + in_I) + 1} \right]^* \quad (2.3)$$

한편, 흡수 계수 α 와 소멸 계수 n_I 는 레이저의 파장이 λ 일 때 다음과 같은 관계

식을 만족한다.^[20]

$$\alpha = \frac{4\pi n_I}{\lambda} \quad (2.4)$$

레이저 파장 λ , 펄스 에너지 E , 펄스 폭 τ , 빔 직경 ϕ , 굴절률 n_R , 흡수 계수 α 가 주어지면 식 (2.1)에서 식 (2.4)까지를 이용하여 펄스 레이저 흡수에 의해 매질 내부에 생성되는 열 발생률 $q(r, z)$ 를 구할 수 있다. 그림 2.1은 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $E = 2.5 \text{ mJ}$, $\tau = 5 \text{ ns}$, $\phi = 0.5 \text{ mm}$, $n_R = 1.4$, $\alpha = 3 \text{ mm}^{-1}$ 인 경우 계산한 열 발생률 $q(r, z)$ 를 보여주고 있다.

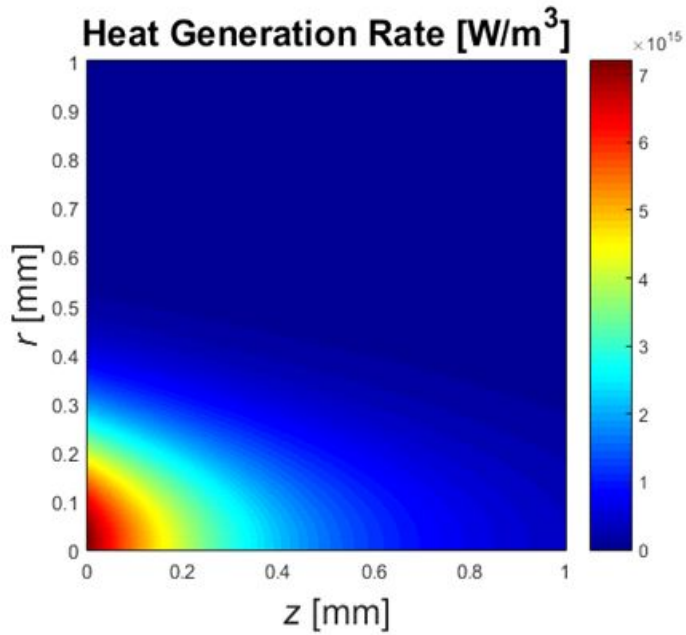


그림 2.1 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $E = 2.5 \text{ mJ}$, $\tau = 5 \text{ ns}$, $\phi = 0.5 \text{ mm}$, $n_R = 1.4$, $\alpha = 3 \text{ mm}^{-1}$ 인 경우 계산된 열 발생률 $q(r, z)$

제2절 열 확산 방정식

매질 내에서 일어나는 열 발생 및 확산에 의한 온도 T 의 변화는 다음과 같이 표현되는 열 확산 방정식을 이용하여 이론적인 연구를 수행할 수 있다.^[21,22]

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

위 식에서 k 는 열 전도도(thermal conductivity)를, D 는 열 확산도(thermal diffusivity)를 각각 의미한다. 열 확산도 D 는 열 전도도 k , 질량 밀도 ρ , 비열 c 를 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.^[21]

$$D = \frac{k}{\rho c} \quad (2.6)$$

제1절에서 구한 열 발생률 q 를 사용하고, 각 경계면에 적당한 경계 조건을 부과하여 식 (2.5)를 풀어 온도 T 의 시공간적 변화에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

경계 조건에는 지정된 표면온도(specified surface temperature), 지정된 열유속(specified heat flux), 단열표면(insulated surface), 표면대류(surface convection) 등이 있다.^[21] 매질의 내부의 경계면은 최대한 시뮬레이션 윈도우 크기를 크게 설정하고 지정된 표면온도 조건을 부과하고, 매질과 공기의 경계면에는 표면대류 조건이 부과하는 것이 적합하다. 표면대류 조건에서 가정하고 있는 매질과 공기 경계면에서의 온도 변화 관계식은 다음과 같다.^[23]

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_{air} - T) \quad (2.7)$$

위 식에서 h 는 열 전달 계수(heat transfer coefficient)를, T_{air} 는 공기의 온도를 나타낸다.

제3절 열 발생률 $q(r,z)$ 계산을 위한 Matlab 코드

다음은 열 발생률 $q(r,z)$ 를 계산하는 Matlab 코드이다.

```

%%%%%%%% Start of Heat_Generation_Rate.m %%%%%%%%%
%%% Input Parameter
n = 1.4; % refractive index
alpha = 3; % absorption coefficient [mm^-1]
E_pulse = 2.5; % laser pulse energy [mJ]
d = 0.5; % 1/e diameter [mm]
lambda = 532e-9*1e3; % wavelength [mm]
pulse_width = 5; % pulse width [ns]

window_s = 20; % surface [mm]
window_d = 10; % depth [mm]

cell_s = 0.02; % cell width, surface [mm]
cell_d = 0.02; % cell width, depth [mm]
cell_dummy = 0.02; % cell width, dummy direction [mm]

y = (-0.5*window_s+0.5*cell_s):cell_s:(0.5*window_s-0.5*cell_s); % surface [mm]
x = (0.5*cell_d):cell_d:(window_d-0.5*cell_d); % depth [mm]

%%% 1st-Step
% omega, I_0, k
omega = d/sqrt(2);
I_0 = 2*E_pulse/(pi*omega^2);
k = lambda*alpha/(4*pi);
    
```

```

cell_volume = cell_s*cell_d*cell_dummy; % mm^3

%%% 2nd-Step %%%%%%%%%
R = abs((1-(n-i*k))/(1+(n-i*k)))^2;

%%% Final Step %%%%%%%%%
[Y,X] = meshgrid(y,x);

I_abs = alpha.*I_0.*exp(-2*Y.^2/omega^2).*(1-R).*exp(-alpha.*X); % mJ/mm^3
E_abs = I_abs*cell_volume; % mJ

Heat_source = I_abs/pulse_width*1e15; % Heat Source [W/m^3]

figure
mesh(Y,X,Heat_source)
colorbar
%%%%%%%% End of Heat_Generation_Rate.m %%%%%%%%%
    
```

제3장 시뮬레이션 결과 및 논의

제1절 레이저 펄스 폭 의존성

1. 시뮬레이션 조건

본 논문에서 시뮬레이션을 위해 공통적으로 사용한 매질의 특성 상수와 레이저 파라미터는 표 3.1과 같다. 매질의 특성 상수는 참고문헌 [24]과 [25]에 보고된 인체 피부 조직에 대한 값을 차용하였다. 열 확산 방정식의 시뮬레이션을 위해 상용 열 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent(ANSYS Incorporated, USA)를 사용하였다. 그림 3.1은 ANSYS Fluent의 시뮬레이션 레이아웃을 보여주고 있다. 참고문헌 [23]에 보고된 열 전달 계수 h 와 공기의 온도 T_{air} 를 표 3.2는 표면대류 조건으로 사용하였다.(표 3.2 참조)

열 효과의 레이저 펄스 폭 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건은 표 3.3과 같다. 레이저 빔 직경과 흡수 계수를 각각 0.5 mm와 3 mm⁻¹로 고정하고 레이저 펄스 폭이 5 ns, 100 μs, 1 ms, 10 ms, 50 ms, 100 ms인 6가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 결과

그림 3.2는 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 레이저 펄스 폭이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 감쇠 시간이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 3.3은 레이저 펄스 폭 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화(그림 3.3(a))와 온도 시감쇠 상수 변화(그림 3.3(b))에 대해 정리한 결과이다. 수치 데이터는 표 3.4에 정리하였다. 레이저 펄스 폭이 5 ns에서 1 ms까지 증가하여도 최대 온도 상승치는 9.5 ~ 9.6 °C를 유지하였다. 레이저 펄스 폭이 10 ms 이상 증가하게 되면 최대 온도 상승치가 급격히 감소하기 시작하였으며, 레이저 펄스 폭이 100 ms 일 때 최대 온도 상승치

는 펄스 폭이 매우 작은 경우에 비해 약 36% 정도 감소하였다. 온도 시감쇠 상수 또한 레이저 펄스 폭이 1 ms까지 증가하여도 약 0.14 s를 유지하였다. 레이저 펄스 폭이 10 ms 이상 증가하게 되면 온도 시감쇠 상수 또한 급격히 증가하였으며, 레이저 펄스 폭이 100 ms 일 때 온도 시감쇠 상수는 펄스 폭이 매우 작은 경우에 비해 약 47% 정도 증가하였다.

3. 논의

열 확산 방정식은 선형 방정식이므로 열원에 의한 온도 생성과정에는 중첩의 원리가 성립한다. 따라서, 매우 짧은 레이저 펄스에 의한 온도 변화를 알고 있다면 이를 이용해 유한한 폭을 갖는 레이저 펄스가 입사할 경우 온도 변화를 합성곱(convolution)을 사용하여 예측할 수 있다.^[26] 만일 매우 짧은 레이저 펄스에 의한 온도 상승치가 지수 함수적으로 변화한다고 가정한다면 유한한 폭을 갖는 레이저 펄스가 입사할 경우 온도 상승치는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ \frac{1}{\tau} & \text{for } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{for } t > \tau \end{cases} \quad (3.1)$$

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ T_{\max} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{decay}}}\right) & \text{for } t \geq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
 T(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t')g(t-t')dt' \\
 &= \begin{cases} T_{\max} \frac{\tau_{\text{decay}}}{\tau} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{decay}}}\right) \right] & \text{for } 0 \leq t < \tau \\ T_{\max} \frac{\tau_{\text{decay}}}{\tau} \left[\exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_{\text{decay}}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{decay}}}\right) \right] & \text{for } t \geq \tau \end{cases} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

함수 $f(t)$ 는 펄스 폭 τ 를 갖고 있는 사각 펄스 함수(square pulse function)이고, 함수 $g(t)$ 는 최대 온도 상승치 T_{max} 와 온도 시감쇠 상수 τ_{decay} 를 갖고 있는 매질의 순간 응답 함수이다. 식 (3.3)은 함수 $f(t)$ 와 함수 $g(t)$ 의 합성곱(convolution)을 계산한 결과 식이다.

그림 3.4는 식 (3.3)을 사용하여 계산한 온도 상승치의 시간변화 예측 결과이다. ANSYS Fluent를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과인 그림 3.2와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 표 3.5는 레이저 펄스 폭 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수에 대해 식 (3.4)을 사용하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 괄호 안의 숫자는 시뮬레이션 결과와의 오차를 의미한다. 약 14% 오차 내에서 시뮬레이션 결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 계산 결과가 갖고 있는 오차는 온도 상승치가 지수 함수적으로 감소한다는 가정에 기인한다. 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수의 레이저 펄스 폭 의존성은 식 (3.3)으로 주어진 간단한 함수를 사용하여 비교적 신뢰성 있게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 식 (3.3) 계산에 사용된 Matlab 코드

다음은 식 (3.3) 계산에 사용된 Matlab 코드이다.

```

%%%%%%%% Start of Analysis_Pulse_Width_Dependence.m %%%%%%%%%
% Analysis_Pulse_Width_Dependence.m

%%%%%%%% Input Data
T_max = 9.618; % Max. Temperature Increase [^oC]
tau_decay = 0.140; % Decay Constant [s]

%%%%%%%% Temporal Profile of Temperature Increase
tau = [5e-9 100e-6 1e-3 10e-3 50e-3 100e-3]; % Laser Pulse Width [s]

t = 0:1e-5:1.0;
for s = 1:length(tau)

```



```

        for q = 1:length(t)
            T_Profile(s,q) = PW_Dependence(T_max,tau_decay,tau(s),t(q));
        end

    end

figure
plot(t,T_Profile(1,:),t,T_Profile(2,:),t,T_Profile(3,:),t,T_Profile(4,:),t,T_Profile(5,:),t,T_Profile(6,:));
%%%%%%%% End of Analysis_Pulse_Width_Dependence.m %%%%%%%%%

%%%%%%%% Start of Function, PW_Dependence.m %%%%%%%%%
function result = PW_Dependence(T_max,tau_decay,tau,t)
    if (t >= 0) && (t < tau)
        temp = 1.0 - exp(-t/tau_decay);
    else
        temp = exp(-(t-tau)/tau_decay) - exp(-t/tau_decay);
    end
    result = T_max*tau_decay/tau*temp;
end
%%%%%%%% Start of Function, PW_Dependence.m %%%%%%%%%
    
```

표 3.1 본 논문에서 시뮬레이션을 위해 공통적으로 사용한 매질의 특성 상수와 레이저 파라미터

	Property	Value	Ref.
Medium	Refractive Index n_R	1.4	[24]
	Mass Density ρ	1100 kg/m ³	[25]
	Specific Heat c	3400 J · kg ⁻¹ · K ⁻¹	[25]
	Thermal Conductivity k	0.4 W · m ⁻¹ · K ⁻¹	[25]
Laser	Wavelength λ	532 nm	-
	Pulse Energy E	2.5 mJ	-

표 3.2 시뮬레이션에 사용한 표면대류 조건

Property	Value	Ref.
Heat Transfer Coefficient h	$10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	[23]
Air Temperature T_{air}	298 K	[23]

표 3.3 열 효과의 레이저 펄스 폭 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한
시뮬레이션 파라미터 조건

Parameter	Value	Note
Laser Beam Diameter ϕ	0.5 mm	Fixed
Absorption Coefficient α	3 mm ⁻¹	Fixed
Laser Pulse Width τ	5 ns, 100 μ s, 1 ms, 10 ms, 50 ms, 100 ms	Varied

표 3.4 레이저 펄스 폭 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과

Laser Pulse Width [s]	Max. Temperature Increase [°C]	Decay Constant [s]
5 ns	9.62	0.14
100 μ s	9.61	0.14
1 ms	9.51	0.14
10 ms	8.83	0.15
50 ms	7.29	0.18
100 ms	6.14	0.21

표 3.5 레이저 펄스 폭 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수에 대해 식 (3.4)을 사용하여 계산한 결과 (괄호 안의 숫자는 시뮬레이션 결과와의 오차를 의미함.)

Laser Pulse Width [s]	Max. Temperature Increase [°C]	Decay Constant [s]
5 ns	9.62 (0.0%)	0.14 (0.0%)
100 μ s	9.61 (0.1%)	0.14 (0.0%)
1 ms	9.58 (0.8%)	0.14 (-0.7%)
10 ms	9.28 (4.8%)	0.15 (-2.0%)
50 ms	8.09 (9.8%)	0.19 (4.7%)
100 ms	6.87 (10.7%)	0.24 (14.2%)

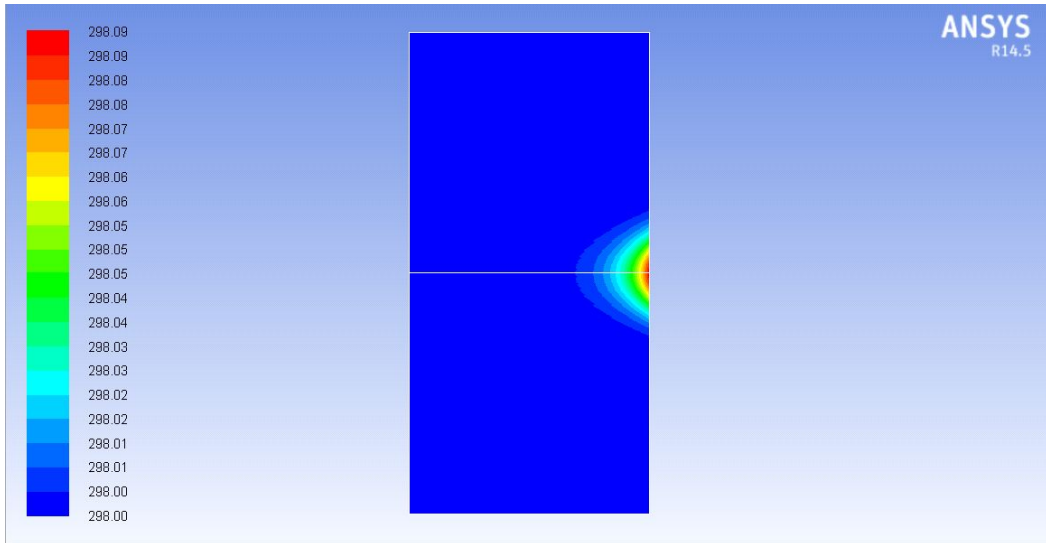


그림 3.1 ANSYS Fluent의 시뮬레이션 레이아웃

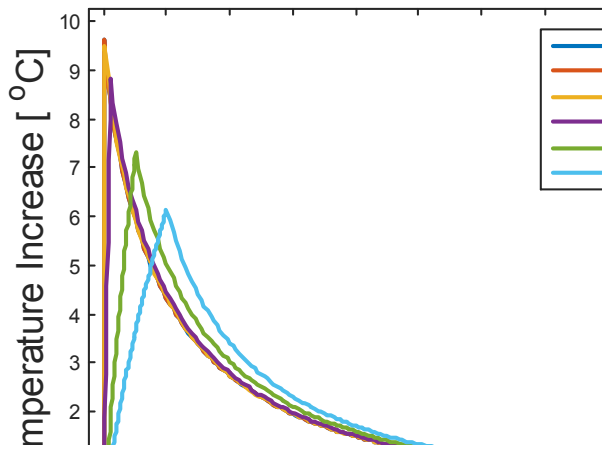
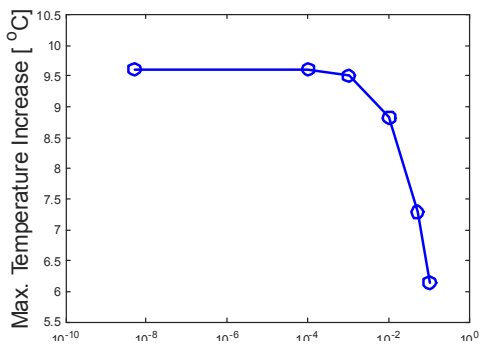
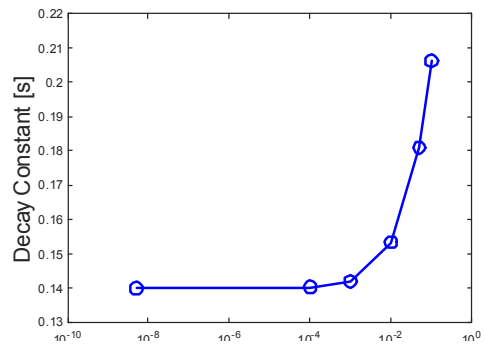


그림 3.2 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 3.3 레이저 펄스 폭 변화에 따른 (a) 최대 온도 상승치 변화와 (b) 온도 시감쇠 상수 변화

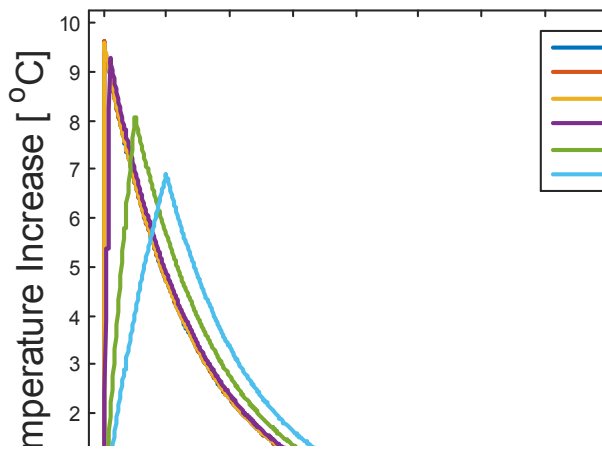


그림 3.4 식 (3.3)을 이용하여 계산한 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치
 예측 결과

제2절 레이저 빔 직경 의존성

1. 시뮬레이션 조건

열 효과의 레이저 빔 직경 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건은 표 3.6과 같다. 레이저 펄스 폭을 5 ns으로 고정하고 흡수 계수가 1 mm^{-1} , 3 mm^{-1} , 6 mm^{-1} 인 경우에 대해 레이저 빔 직경을 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 결과

그림 3.5는 흡수 계수가 1 mm^{-1} 인 경우 빔 직경의 변화에 따른 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림 3.6은 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화(그림 3.6(a))와 온도 시감쇠 상수 변화(그림 3.6(b))에 대해 정리한 결과이다. 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 시감쇠 상수는 증가하는 것을 알 수 있다. 수치 데이터는 표 3.7에 정리하였다. 빔 직경이 2.5 mm, 3.0 mm인 경우 온도 상승치가 매우 낮아 온도 시감쇠 상수를 시뮬레이션 결과로부터 구할 수 없었다. 온도 상승치와 온도 시감쇠 계수의 빔 직경 의존성을 정량적으로 분석하기 위해 멱함수(power function)를 이용한 곡선 맞춤(curve fitting)을 수행하였다. 그림 3.6은 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때 시뮬레이션 결과와 함께 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 최대 온도 상승치(그림 3.6(a) 참조)는 멱함수로 곡선 맞춤을 수행한 결과 빔 직경에 대해 -2승의 의존성을 갖고 있으며, 온도 시감쇠 상수(그림 3.6(b) 참조)는 약 1.7승의 의존성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

그림 3.7는 흡수 계수가 3 mm^{-1} 인 경우 빔 직경의 변화에 따른 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과와 함께 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 그림 3.8은 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화(그림 3.8(a))와 온도 시감쇠 상수 변화(그림 3.8(b))에 대해 정리한 결과이다. 이 경우에도 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 시

감쇠 상수는 증가하였다. 수치 데이터는 표 3.8에 정리하였다. 그림 3.8은 흡수 계수가 3 mm^{-1} 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과와 함께 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 이 경우에도 최대 온도 상승치(그림 3.8(a) 참조)는 빔 직경에 대해 -2승의 의존성을 갖고 있었으며, 온도 시감쇠 상수(그림 3.8(b) 참조)는 흡수 계수가 1 mm^{-1} 인 경우 보다 감소하여 약 1.0승의 의존성을 갖고 있었다.

그림 3.9 은 흡수 계수가 6 mm^{-1} 인 경우 빔 직경의 변화에 따른 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림 3.10는 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화(그림 3.10(a))와 온도 시감쇠 상수 변화(그림 3.10(b))를 보여준다. 이 경우에도 펄스 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 시감쇠 상수는 증가하였다. 수치 데이터는 표 3.9에 정리하였다. 그림 3.10은 흡수 계수가 6 mm^{-1} 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과와 함께 멱함수 곡선 맞춤 결과이다. 이 경우에도 앞의 두 경우와 마찬가지로 최대 온도 상승치(그림 3.10(a) 참조)는 빔 직경에 대해 -2승의 의존성을 갖고 있었으며, 온도 시감쇠 상수(그림 3.10(b) 참조)는 흡수 계수가 3 mm^{-1} 인 경우 보다 더 감소하여 약 0.7승의 의존성을 갖고 있었다.

3. 논의

최대 온도 상승치는 흡수 계수와 무관하게 항상 빔 직경에 대해 -2승의 멱함수 의존성을 보였다. 펄스 폭이 짧은 경우 온도 상승치는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.^[27]

$$T = \frac{W}{\rho c} \quad (3.4)$$

위 식에서 W 는 흡수 에너지 밀도(absorbed energy density)를 의미한다. 식 (2.1)로 표현된 열 발생률 q 는 흡수 파워 밀도(absorbed power density)에 해당하므로 W 는 다음과 같이 q 와 레이저 펄스 폭 τ 의 곱으로 계산된다.

$$W = q\tau \quad (3.5)$$

따라서, 최대 온도 상승치 T_{\max} 는 다음과 같은 표현식을 갖게 된다.

$$\begin{aligned}
 T_{\max} &= q(r=0, z=0)\tau \\
 &= \alpha(1-R)\frac{2E}{\pi\omega^2} \\
 &\propto \frac{1}{\phi^2} = \phi^{-2}
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

식 (3.6)은 최대 온도 상승치의 빔 직경 ϕ 에 대한 의존성을 직접적으로 보여주고 있는데, 시뮬레이션 결과가 보여준 -2승의 멱함수 의존성을 확인할 수 있다.

그림 3.11는 흡수 계수가 1 mm^{-1} , 3 mm^{-1} , 6 mm^{-1} 일 때 빔 직경 변화에 따른 온도 시감쇠 상수의 변화를 함께 보여주고 있다. 흡수 계수가 증가함에 따라 온도 시감쇠 상수의 빔 직경 의존성과 관련된 멱함수 승수가 약 1.7승, 약 1.0승, 약 0.7승으로 감소하고 있다. 승수의 절대값이 감소한다는 것은 온도 시감쇠 상수가 빔 직경 변화에 둔감하게 변화한다는 의미이다. 따라서, 흡수 계수가 매우 크게 증가하게 되면 온도 시감쇠 상수는 빔 직경 변화와 거의 무관하게 일정한 값을 갖게 될 것으로 예측된다. 열 확산 시상수(thermal diffusion time) τ_d 는 다음과 같이 주어진다.^[28]

$$\tau_d = \frac{d^2}{D} \quad (3.7)$$

위 식에서 d 는 온도가 상승된 영역의 특성 거리(characteristic length of heated region)를 의미한다. 흡수 계수가 상대적으로 큰 경우 특성 거리 d 는 흡수 계수의

역수인 침투 깊이(penetration depth)에 해당하게 될 것이다. 시뮬레이션에 사용된 특성 상수를 사용하여 열 확산도 D 를 계산해 보면, 약 1.07×10^{-7} m/s이다. 흡수 계수가 6 mm^{-1} 인 경우 침투 깊이는 약 0.17 mm이므로, 이 때 식 (3.7)을 사용하여 예측한 열 확산 시상수는 약 0.26 s이다. 그림 3.11에서 흡수 계수가 6 mm^{-1} 인 경우 온도 시감쇠 상수는 빔 직경에 상대적으로 둔감하며 대략 0.26 s 근방의 값을 갖고 있음을 확인할 수 있는데, 이를 통해 흡수 계수가 상대적으로 큰 경우 특성 거리 d 는 흡수 계수의 역수인 침투 깊이에 해당하게 될 것이라는 예측이 정당함을 확인할 수 있다. 또한 열 확산 시상수와 온도 시감쇠 상수는 거의 동일한 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

4. 멱함수 곡선 맞춤을 위해 사용된 Matlab 코드

다음은 멱함수 곡선 맞춤을 위해 사용된 Matlab 코드이다.

```

%%%%%% Start of Power_Function_Analysis.m %%%%%%
% Power_Function_Analysis.m

%%%% Input Data
MaxT= [9.62 2.41 1.07 0.602 0.385 0.268];
DecayConstant = [0.140 0.355 0.565 0.755 0.920 1.065];
X = [1:1:6]; % Beam Diameter

%%%% MaxT
ab = [1 1];

ab_fit = fminsearch(@power_fit, ab, [], X, MaxT)

Fit_X = 1.0:0.05:6.0;
Fit_MaxT = ab_fit(1)*Fit_X.^ab_fit(2);

figure
    
```

```

plot(X,MaxT,'bo',Fit_X,Fit_MaxT,'r-','MarkerSize',10,'Linewidth',2);
xlabel('Absorption Coefficient [mm^-1]','FontSize',18)
ylabel('Max. Temperature Increase [°C]','FontSize',18);
legend('Simulated','Fitted')
axis([0.4 6.6 0 0.6])

%%% DecayConstant
ab = [1 1];

ab_fit = fminsearch(@power_fit, ab, [], X, DecayConstant)
Fit_Decay = ab_fit(1)*Fit_X.^ab_fit(2);

figure
plot(X,DecayConstant,'bo',Fit_X,Fit_Decay,'r-','MarkerSize',10,'Linewidth',2)
xlabel('Absorption Coefficient [mm^-1]','FontSize',18)
ylabel('Decay Constant [s]','FontSize',18)
legend('Simulated','Fitted')
axis([0 6.5 0 1.2])
%%%%%%%% End of Power_Function_Analysis.m %%%%%%%%%

%%%%%%%% Start of Function, power_fit.m %%%%%%%%%
function z = power_fit(ab, x, y)

y_fit = ab(1)*x.^ab(2);

z = sum((y-y_fit).^2);
end
%%%%%%%% End of Function, power_fit.m %%%%%%%%%
    
```

표 3.6 열 효과의 레이저 빔 직경 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한
시뮬레이션 파라미터 조건

Parameter	Value	Note
Laser Beam Diameter ϕ	0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm	Varied
Absorption Coefficient α	1 mm^{-1} , 3 mm^{-1} , 6 mm^{-1}	Varied
Laser Pulse Width τ	5 ns	Fixed

표 3.7 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과

Beam Diameter [mm]	Max. Temperature Increase [$^{\circ}\text{C}$]	Decay Constant [s]
0.5	3.27	0.20
1.0	0.82	0.64
1.5	0.36	1.24
2.0	0.21	2.04
2.5	0.13	-
3.0	0.09	-

표 3.8 매질의 흡수 계수가 3 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과

Beam Diameter [mm]	Max. Temperature Increase [$^{\circ}\text{C}$]	Decay Constant [s]
0.5	9.62	0.14
1.0	2.41	0.36
1.5	1.07	0.57
2.0	0.60	0.76
2.5	0.39	0.92
3.0	0.27	1.07

표 3.9 매질의 흡수 계수가 6 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과

Beam Diameter [mm]	Max. Temperature Increase [$^{\circ}\text{C}$]	Decay Constant [s]
0.5	18.67	0.10
1.0	4.67	0.20
1.5	2.08	0.28
2.0	1.17	0.33
2.5	0.75	0.37
3.0	0.52	0.39

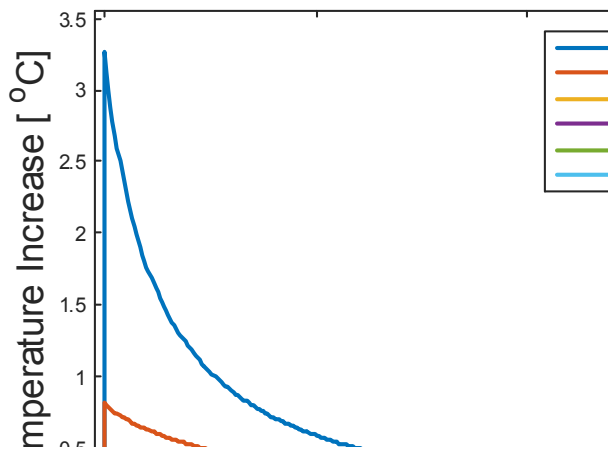
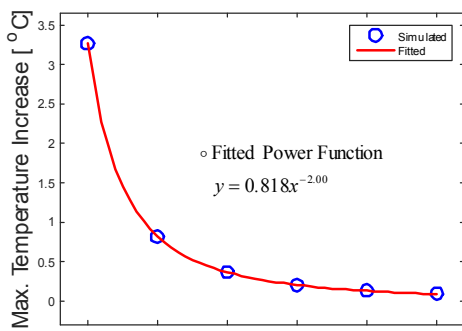
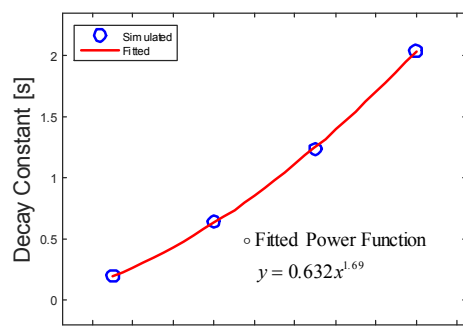


그림 3.5 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 3.6 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 빔 직경에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과

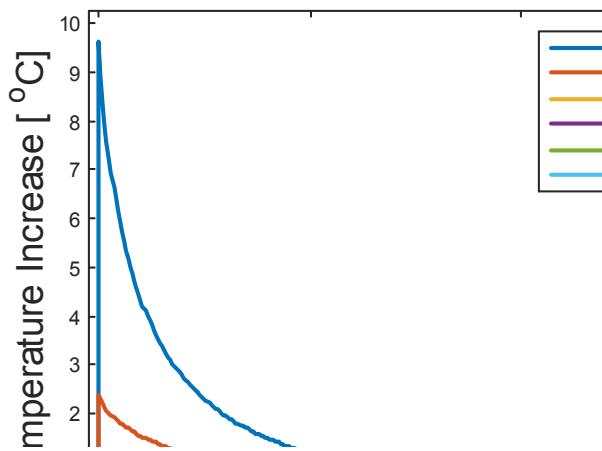
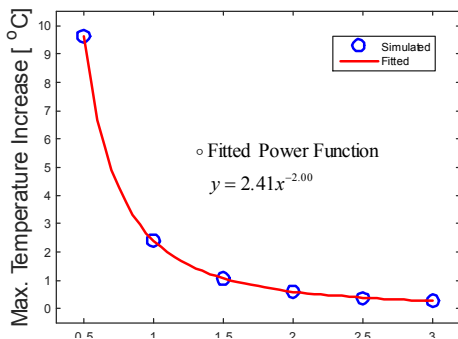
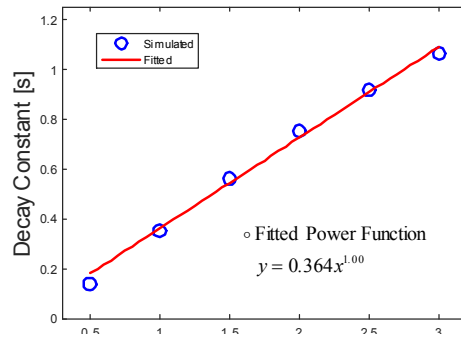


그림 3.7 매질의 흡수 계수가 3 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 3.8 매질의 흡수 계수가 3 mm^{-1} 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 빔 직경에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과

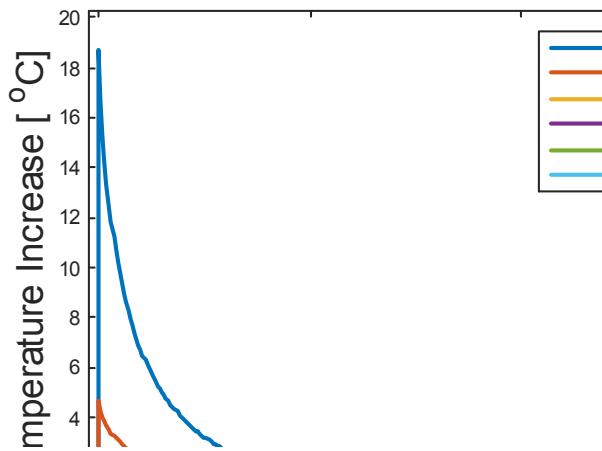
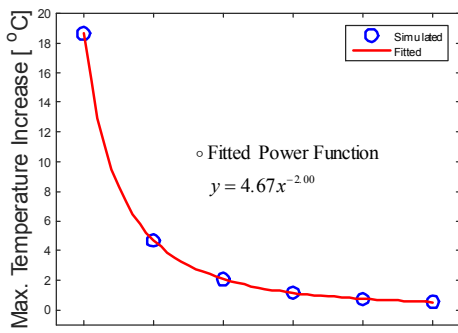
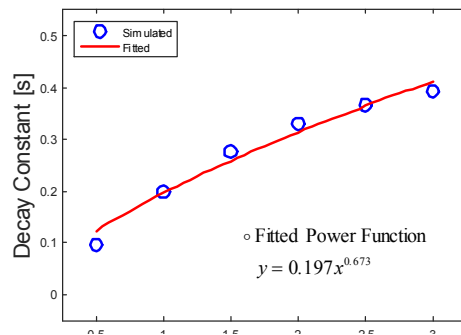


그림 3.9 매질의 흡수 계수가 6 mm^{-1} 일 때, 레이저 빔 직경 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 3.10 매질의 흡수 계수가 6 mm^{-1} 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 빔 직경에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과

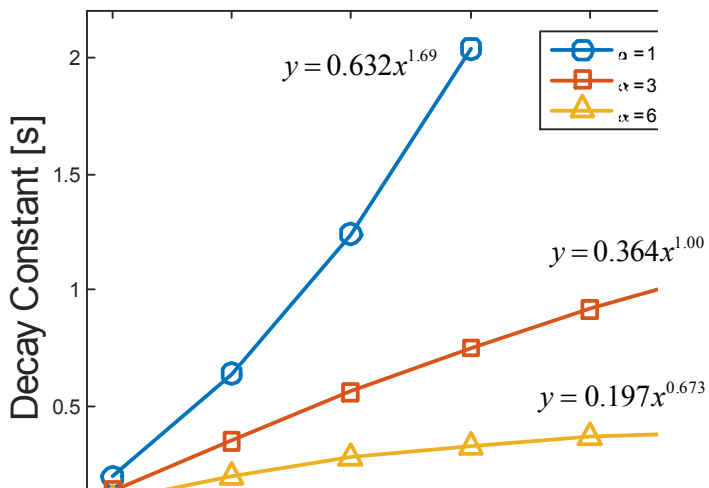


그림 3.11 흡수 계수가 1 mm^{-1} , 3 mm^{-1} , 6 mm^{-1} 일 때 빔 직경 변화에 따른 온도
시감쇠 상수의 변화

제3절 매질의 흡수 계수 의존성

1. 시뮬레이션 조건

열 효과의 흡수 계수 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건은 표 3.10과 같다. 레이저 펄스 폭을 5 ns으로 고정하고 레이저 빔 직경이 0.5 mm, 3.0 mm인 경우에 대해 매질의 흡수 계수를 1 mm^{-1} , 2 mm^{-1} , 3 mm^{-1} , 4 mm^{-1} , 5 mm^{-1} , 6 mm^{-1} 로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 결과

그림 3.12는 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 매질의 흡수 계수가 증가함에 따라 최대 온도 상승치는 증가하고 온도 시감쇠 상수는 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 3.13은 매질의 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화(그림 3.13(a))와 온도 시감쇠 상수 변화(그림 3.13(b))에 대해 정리한 결과이다. 수치 데이터는 표 3.11에 정리하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 에서 6 mm^{-1} 까지 증가할 때 최대 온도 상승치는 $\sim 3.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $\sim 18.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 변화하여 거의 선형적으로 증가하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 에서 6 mm^{-1} 까지 증가할 때, 온도 시감쇠 상수는 $\sim 0.2 \text{ s}$ 에서 $\sim 0.1 \text{ s}$ 로 약 50% 정도 감소하였다. 그림 3.13은 레이저 빔 직경이 0.5 mm일 때 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수의 시뮬레이션 결과와 함께 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 최대 온도 상승치(그림 3.13(a) 참조)는 흡수 계수 변화에 대해 거의 1승의 의존성을 갖고 있어 정비례함을 확인할 수 있었다. 온도 시감쇠 상수(그림 3.13(b) 참조)는 약 -0.4승의 의존성을 갖고 있었다.

그림 3.14은 레이저 빔 직경이 3.0 mm 일 때, 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이 경우에도 매질의 흡수 계수가 증가함에 따라 최대 온도 상승치는 증가하였으며, 온도 시감쇠 상수는 감소하였다. 그림 3.15는 매질의 흡수 계수 변화에

따른 최대 온도 상승치 변화(그림 3.15(a))와 온도 시감쇠 상수 변화(그림 3.15(b))에 대해 정리한 결과이다. 수치 데이터는 표 3.12에 정리하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 에서 6 mm^{-1} 까지 증가할 때 최대 온도 상승치는 $\sim 0.09 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $\sim 0.52 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 거의 선형적으로 증가하였다. 온도 시감쇠 상수는 매질의 흡수 계수가 2 mm^{-1} 에서 6 mm^{-1} 까지 증가할 때 $\sim 1.8 \text{ s}$ 에서 $\sim 0.4 \text{ s}$ 까지 약 78% 감소하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm^{-1} 일 때 온도 상승치가 매우 낮고 온도 변화가 너무 천천히 일어나 온도 시감쇠 상수를 시뮬레이션 결과로부터 구할 수 없었다. 그림 3.15은 레이저 빔 직경이 3.0 mm 일 때 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수의 시뮬레이션 결과와 함께 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 이 경우에도 최대 온도 상승치(그림 3.15(a) 참조)는 흡수 계수 변화에 대해 거의 1승의 의존성을 갖고 있어 정비례함을 확인할 수 있었다. 온도 시감쇠 상수(그림 3.15(b) 참조)는 약 -1.3승의 의존성을 갖고 있어 빔 직경이 커짐에 따라 흡수 계수 의존성이 증가하고 있음을 알 수 있다.

3. 논의

최대 온도 상승치는 빔 직경과 거의 무관하게 항상 흡수 계수에 대해 1승의 멱함수 의존성(정비례)을 보였다. 최대 온도 상승치에 대한 식 (3.6)을 흡수 계수 의존성 관점에서 다시 살펴보면 다음과 같이 항상 흡수 계수에 정비례함을 확인할 수 있다.

$$T_{\max} = \alpha(1-R)\frac{2E}{\pi\omega^2} \tag{3.8}$$

$\propto \alpha$

그림 3.16은 빔 직경이 0.5 mm , 3.0 mm 일 때 흡수 계수 변화에 따른 온도 시감쇠 상수의 변화를 함께 보여주고 있다. 빔 직경 3.0 mm 에서 0.5 mm 로 감소하였을 때, 온도 시감쇠 상수의 흡수 계수 의존성과 관련된 멱함수 승수가 -1.3승에서 -0.4승으로 절대값이 감소하였다. 승수의 절대값이 감소한다는 것은 온

도 시감쇠 상수가 흡수 계수 변화에 둔감하게 변화한다는 의미이다. 그림 3.16을 통해 빔 직경이 0.5 mm일 때, 온도 시감쇠 상수가 흡수 계수 변화에 거의 무관하게 일정한 값을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 열 확산 시상수는 특성 거리 d 와 열 확산도 D 에 의해 결정되며, 온도 시감쇠 상수와 거의 동일한 값을 갖고 있다. 빔 직경이 흡수 계수의 역수인 침투 깊이 보다 상대적으로 작아지게 되면 열 확산은 빔의 직경 방향으로 더욱 강하게 발생하게 되어 특성 거리는 빔 직경과 밀접한 관련을 갖게 된다. 따라서, 온도 시감쇠 상수는 흡수 계수와는 거의 무관하고 빔 직경에 의존하는 값을 갖게 될 것이다. 식 (3.7)은 1차원 문제에 대해 적용할 수 있는 식이어서 빔 직경(2차원 문제)을 특성 거리 d 에 대입하여 온도 시감쇠 상수를 계산할 수 없다. 이에 대한 보다 심도있는 연구가 후속적으로 수행되어야 할 것이다.

표 3.10 열 효과의 흡수 계수 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션
파라미터 조건

Parameter	Value	Note
Laser Beam Diameter ϕ	0.5 mm, 3.0 mm	Varied
Absorption Coefficient α	1 mm ⁻¹ , 2 mm ⁻¹ , 3 mm ⁻¹ , 4 mm ⁻¹ , 5 mm ⁻¹ , 6 mm ⁻¹	Varied
Laser Pulse Width τ	5 ns	Fixed

표 3.11 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과

Absorption Coefficient [mm^{-1}]	Max. Temperature Increase [$^{\circ}\text{C}$]	Decay Constant [s]
1	3.27	0.20
2	6.48	0.17
3	9.62	0.14
4	12.70	0.12
5	15.71	0.11
6	18.67	0.10

표 3.12 레이저 빔 직경이 3.0 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수 시뮬레이션 결과

Absorption Coefficient [mm^{-1}]	Max. Temperature Increase [$^{\circ}\text{C}$]	Decay Constant [s]
1	0.09	-
2	0.18	1.76
3	0.27	1.06
4	0.35	0.72
5	0.44	0.52
6	0.52	0.39

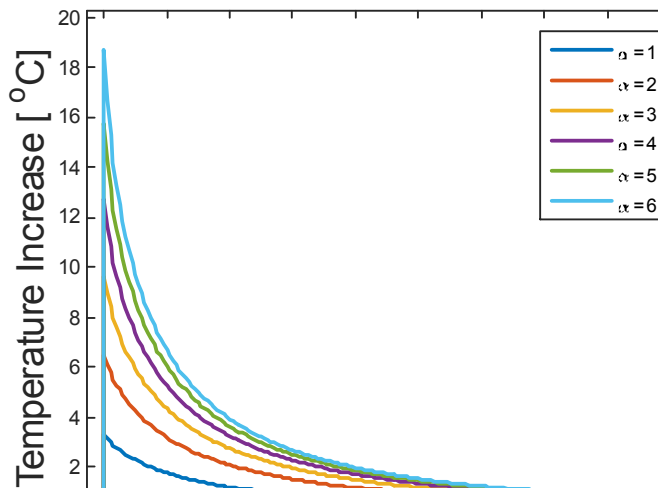
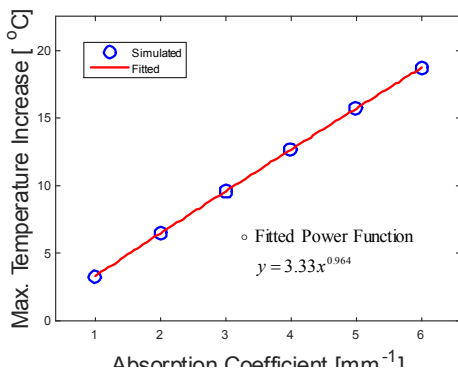
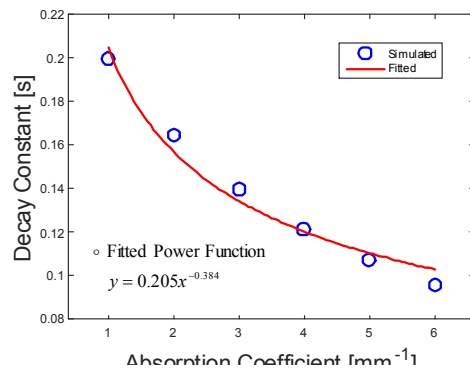


그림 3.12 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 3.13 레이저 빔 직경이 0.5 mm 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 흡수 계수에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과

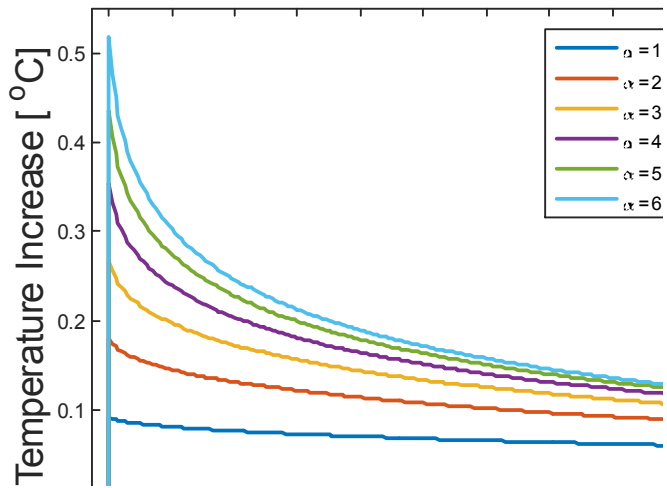
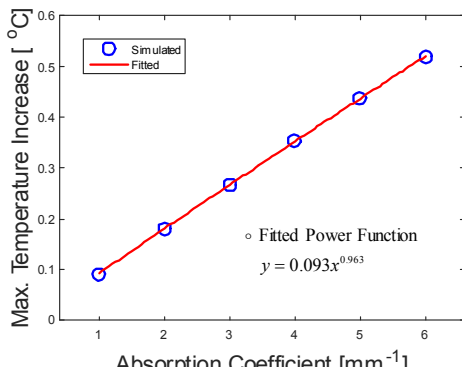
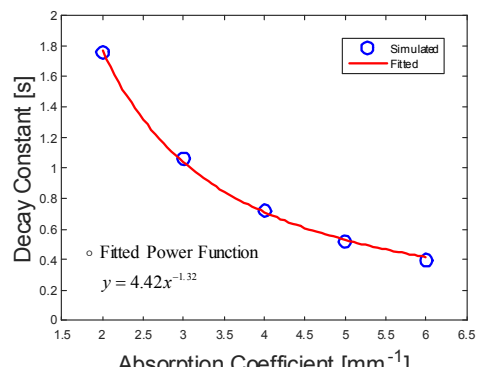


그림 3.14 레이저 빔 직경 3.0 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 3.15 레이저 빔 직경 3.0 mm 일 때, (a) 최대 온도 상승치와 (b) 온도 시감쇠 상수의 흡수 계수에 대한 시뮬레이션 결과 및 멱함수 곡선 맞춤 결과

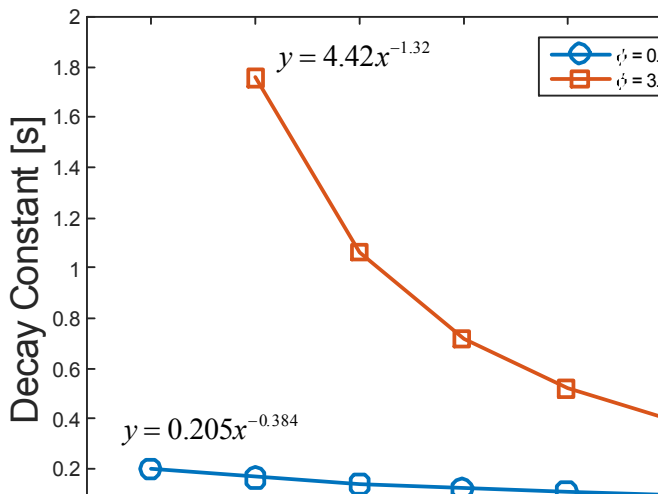


그림 3.16 빔 직경이 0.5 mm, 3.0 mm일 때 흡수 계수 변화에 따른 온도 시감쇠 상수의 변화

제4장 결론

본 논문에서 열 확산 방정식에 대한 시뮬레이션을 수행하여 펄스 레이저의 매질 흡수에 의해 발생하는 열 효과에 대한 연구를 수행하였다. 특별히, 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수의 레이저 펄스 폭, 빔 직경, 흡수 계수 의존성에 대해 조사하였다.

레이저 펄스 폭이 증가함에 따라 최대 온도 상승치는 감소하였으며, 온도 시감쇠 상수는 증가하였다. 매질의 매우 짧은 펄스 레이저에 대한 순간 응답 함수와 펄스 폭에 대응하는 사각 펄스 함수의 합성곱을 사용하여 펄스 폭 변화에 따른 온도 시변화를 예측할 수 있음을 보였다. 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치는 감소하였고, 온도 시감쇠 상수는 증가하였다. 최대 온도 상승치는 빔 직경 변화에 대해 -2승의 멱함수 의존성을 보였으며, 흡수 계수가 상대적으로 클 경우 온도 시감쇠 상수는 빔 직경에 거의 무관한 값을 보였다. 흡수 계수가 증가함에 따라 온도 상승치는 증가하였고, 온도 시감쇠 상수는 감소하였다. 최대 온도 상승치는 흡수 계수에 대해 1승의 멱함수 의존성(정비례)을 보였으며, 빔 직경이 상대적으로 작을 경우 온도 시감쇠 상수는 흡수 계수에 거의 무관한 값을 보였다.

본 논문의 연구결과는 레이저 펄스 폭, 빔 직경, 파장 등을 변화시키며 수행되고 있는 펄스 레이저를 이용한 촉각자극 유도 실험 결과의 예측과 분석에 유용히 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] W. Koechner and M. Bass, *Solid-State Lasers : A Graduate Text* (Springer-Verlag, New York, USA), pp. 1-11 (2003).
- [2] 김병태, 레이저 공학 (상학당, 서울특별시, 대한민국), pp. 35-87 (2009).
- [3] M. H. Niemz, *Laser-Tissue Interactions* (Springer-Verlag, New York, USA), pp. 45-149 (2007).
- [4] 정순철, 박종락, 최미현, 촉감 자극 시스템 및 그 방법, 대한민국 특허등록번호 10-1147850 (2012).
- [5] 정순철, 전재훈, 박종락, 김형식, 정구인, 민병찬, 광-기계적 효과를 일으키는 레이저 장치 및 이를 이용한 방법, 대한민국 특허등록번호 10-1340358 (2013).
- [6] J.-H. Jun, J.-R. Park, S.-P. Kim, Y. M. Bae, J.-Y. Park, H.-S. Kim, S. Choi, S. J. Jung, S. H. Park, D.-I. Yeom, G.-I. Jung, J.-S. Kim, and S.-C. Chung, “Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations,” *Sci. Rep.* 5, 11016 (2015).
- [7] H.-S. Kim, J.-S. Kim, G.-I. Jung, J.-H. Jun, J.-R. Park, S.-P. Kim, S. Choi, S.-J. Park, M.-H. Choi, and S.-C. Chung, “Evaluation of the possibility and response characteristics of laser-induced tactile sensation,” *Neurosci. Lett.* 602, pp. 68-72 (2015).
- [8] H. Lee, J.-S. Kim, S. Choi, J.-H. Jun, J.-R. Park, A.-H. Kim, H.-B. Oh, H.-S. Kim, and S.-C. Chung “Mid-air tactile stimulation using laser-induced thermoelastic effects: the first study for indirect radiation,” *Proc. of the IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 374-380 (2015).
- [9] T. J. Neddermeyer, K. Flühr, and J. Lötsch, “Principle components analysis of pain thresholds to thermal, electrical, and mechanical stimuli suggests a predominant common source of variance,” *Pain* 138, pp. 286-291 (2008).
- [10] F. Wong, C. J. Vierck, J. L. Riley III, C. King, and A. P. Mauderli, “A new

- thermal stimulation method for human psychophysical studies: Pain intensity clamping,” *Neurosci. Lett.* 188, pp. 83-88 (2010).
- [11] A. Ikoma, H. Handwerker, Y. Miyachi, and M. Schmelz, “Electrically evoked itch in humans,” *Pain* 113, pp. 148-154 (2005).
- [12] R. M. White, “Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or Electromagnetic Wave Absorption,” *J. Appl. Phys.* 34, pp. 2123-2124 (1963).
- [13] M. W. Sigrist, “Laser generation of acoustic waves in liquids and gases,” *J. Appl. Phys.* 60, pp. R83-R121 (1986).
- [14] I. Itzkan, D. Albagli, M. L. Dark, L. T. Perelman, C. von. Rosenberg, and M. S. Feld, “The thermoelastic basis of short pulsed laser ablation of biological tissue,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92, pp. 1960-1964 (1995).
- [15] X. Wang and X. Xu, “Thermoelastic wave induced by pulsed laser heating,” *Appl. Phys.* A73, pp. 107-114 (2001).
- [16] A. Vogel and V. Venugopalan, “Mechanisms of Pulsed Laser Ablation of Biological Tissues,” *Chem. Rev.* 103, pp. 577-644 (2003).
- [17] 정순철, 전재훈, 김성필, 최승문, 민병찬, 김형식, 정구인, 박종락, 배영민, 촉감 조절을 위해 펄스 레이저 빔의 직경을 변화시킬 수 있는 레이저 장치 및 이를 이용한 방법, 대한민국 특허등록번호 10-1340359 (2013).
- [18] S.-J. Yang, J.-H. Baek, J.-Y. Kim, K. Jang, and J.-R. Park, “Pulse-width Dependence of Axial Displacement Generated by Laser Absorption in Human Tissue,” *J. of Advanced Engineering and Technology* 8(3), pp. 205-209 (2015).
- [19] E. Marchandise, A. Mouraux, L. Plaghki, and F. Henrotte, “Finite element analysis of thermal laser skin stimulation for a finer characterization of the nociceptive system,” *Neurosci. Lett.* 223, pp. 1-10 (2014).
- [20] F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to optics* (Pearson, New York, USA), pp. 491-509 (2007).
- [21] F. Kreith and M. S. Bohn, *Principles of Heat Transfer* (Brooks/Cole, CA, USA), pp. 73-169 (2006).
- [22] B. A. Boley and J. H. Weiner, *Theory of Thermal Stress*. (Dover Publications,

- New York, USA), pp. 135-163 (1997).
- [23] T. Dai, B. M. Pikkula, L. V. Wang, and B. Anvari, "Comparison of Human Skin Opto-Thermal Response to Near-Infrared and Visible Laser Irradiations: A Theoretical Investigation," *Phy. Med. Biol.* 49, pp. 4861-4877 (2004).
- [24] E. Salomatina, B. Jiang, J. Novak, and A. N. Yaroslavsky, "Optical properties of normal and cancerous human skin in the visible and near-infrared spectral range," *J. Biomed. Opt.* 11, 064026 (2006).
- [25] M. Jean, K. Schulmeister, and B. E. Stuck, "Computer modeling of laser induced injury of the skin," *ILSC Conf. Proc.* 105 pp. 366-370 (2013).
- [26] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, (Roberts & Company Publishers, CO, USA), pp. 3-29, (2004).
- [27] A. J. Welch and M. J. C. van Gemert (Eds.), *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue* (Springer, Heidelberg, Germany), pp. 385-409 (1995).
- [28] D. Albagli, M. Dark, C. von Rosenberg, L. Perelma, I. Itzka, and M. S. Feld, "Laser-induced thermoelastic deformation: A three-dimensional solution and its application to the ablation of biological tissue," *Med. Phys.* 21, pp. 1323 - 1331 (1994).

[감사의 글]

석사학위 논문을 마치기까지 많은 도움주신 분들께 진심으로 감사의 말씀드립니다. 석사학위라는 결실을 맺을 수 있게 건강한 몸과 지혜를 주신 우리 주 하나님께서 함께 하심이 있었기에 이 모든 영광과 축복이 있으리라 생각합니다.

학부생 4학년부터 시작한 대학원 생활이 어느덧 끝맺음을 할 때가 다가왔습니다. 3년이라는 짧지 않는 시간동안 많은 생각이 오고 가지만 처음부터 끝까지 들었던 생각은 훌륭한 교수님 실험실에서 연구 활동 할 수 있었다는 환경에 기쁩니다. 대학원 석사 과정을 통틀어 말해줄 수 있는 논문을 마치는 과정을 무사히 마칠 수 있게 물신양면 도와주신 박종락 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 언제나 아버지와의 같은 마음으로 저희에게 훌륭한 가르침을 주시고 현명한 지도로 언제나 흐트러지지 않게 잡아주셔서 감사합니다. 많이 부족하고 마음에 들지 않는 행동들을 보여드렸던 점을 생각하면 죄송한 마음이 많이 듭니다. 더 잘할 수 있는데, 더 노력할 수 있는데 그러지 못한 대학원 생활이 많이 아쉽고 더 좋은 모습 보여드리고 싶었던 마음을 알아주셨으면 좋겠습니다. 대학원을 마치고 앞으로 사회에 나가 대학원에서 다 보여주지 못한 좋은 모습 보여드리고 싶습니다. 대학원에서 받은 가르침을 사회에서도 유용하게 쓸 수 있는 인재가 되고 교수님 실험실에서 활동했던 학생으로서 교수님의 이름에 금이 가지 않게 열심히 행동하겠습니다. 앞으로도 실험실의 주기적인 모임에 교수님 얼굴 자주 뵈면 좋겠고, 항상 건강한 모습 잃지 않는 교수님이 계획하시는 일과 계획들이 모두 만사형통하고 하시는 연구 잘 되길 기도하겠습니다. 그리고 언제나 학생들과 소통하시려는 김진태 교수님의 활동적인 모습이 앞으로 그리울 것입니다. 수업 시간에 학생들과 자주 이야기하시는 모습이 너무 보기 좋았고, 수업 때마다 고정관념을 갖지 않고 새로운 각도에서 보시려는 노력이 멋있었습니다. 언제나 마주칠 때마다 항상 웃어주시는 김현수 교수님, 모르는 것을 물어 볼 때마다 다정다감하게 답해주시고, 교육만이 아닌 인생에 있어서 가르침도 빠지지 않고 일깨워 주시는 말씀들은 정말 값진 말들 뿐이라 하나도 놓칠까 없었습니다. 안태정 교수님께서 대학원 면접 때 해주셨던 이야기 중에 어떤 일이든 왜 해야 하는지 알아야 한다는 말을 잘 새겨듣고 무슨 일을 시작할 때 그 말을 떠올리며 신중히 하도록 하겠습니다. 권민기 교수님의 반도체와 LED 수업을 통해 부족했던 반도체 소자에 대한 이해가 학부와 대학원 수업을 통해 많은 이해와 도움이 되었습니다. 주기남 교수님께서도 젊은 패기로 학생과 밀접하고 친구하게 수업하시는 방식이 너무 좋았습니다. 마주칠 때마다 항상 웃어주시며 인사하는 교수님이 활기차 보이고 좋았습니다.

석사과정의 마지막인 논문을 쓰면서 학부와 대학원생 기간 동안 들었던 수업들이

정말 많은 도움이 되었습니다. 마르지 않는 지식의 샘물처럼 항상 넘치는 교육열을 가지고 학생들에게 훌륭한 가르침을 주시는 김진태 교수님, 김현수 교수님, 안태정 교수님, 권민기 교수님, 주기남 교수님의 열정적인 모습을 본받고 교수님들이 주신 가르침에 대해 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

이렇게 좋은 환경에서 연구 활동을 할 수 있게 힘써주었던 실험실 선배 태원이형, 진우형, 기찬이형, 훈이형, 성선이현, 현철이형께 감사드리며, 힘든 상황에서도 언제나 하나의 등불같이 내 옆에서 같이 발맞춰 나아갈 수 있게 힘이 되어준 승연이형, 용병이형, 선율이형, 찬영이, 두형이, 병권이, 한범이, 희원, 영준, 문성, 동원, 민우, 유현, 영호, 효미, 현선에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

실험실에서 같이 연구 활동하면서 정말 많은 도움을 준 승진이와 준혁이에게 고맙고, 부족하지만 형으로써 존중해주고 동생으로써 잘 따라준 후배들이 졸업할 수 있게 많은 도움을 준 것 같습니다.

이제 곧 학교라는 울타리를 벗어나 사회로 나아가야하는 것만 남은 것 같습니다. 그 동안 받은 도움과 마음으로 사회에서도 잘 적응할 수 있도록 모든 일에 열심히 하고 처음과 같은 마음으로 살아간다면 기대하는 만큼 이룰 수 있을 것이라고 생각합니다.

끝으로 세상에서 가장 사랑하는 가족들로부터 받은 사랑으로 장식하고 싶습니다. 항상 웃는 모습으로 힘을 주시고 넘치는 사랑으로 밝은 모습으로 살아갈 수 있게 해주신 아버지, 어머니, 할머니, 형 그리고 가족들과 함께 기쁨을 나누고 싶습니다. 제 삶에 있어 의지가 되고 도움이 된 많은 지인 분들이 있지만 일일이 말하지 못한 점에 대해 죄송하고, 많은 도움이 되어준 모든 사람들에게 다시 한번 감사하나는 말을 드립니다.

2015 年 12 月

張 敬 珉

이 력 서

성 명 : 장 경 민 (張 敬 珉)

생 년 월 일 : 1988년 7월 18일(양력)

출 생 지 : 광주

주 소 : 광주광역시 서구 화정3동 e편한세상 104동 1402호

학 력

2004.3. - 2007.2. 전남고등학교

2007.3. - 2014.2. 조선대학교 광기술공학과 학사과정

2014.3. - 2016.2. 조선대학교 광기술공학과 석사과정

학위 논문

- [1] “펄스 레이저의 매질 흡수에 의해 발생하는 열 효과 시뮬레이션 및 해석에 관한 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2015).

학술지 게재 논문

- [1] J.-H. Baek, S.-J. Yang, J.-Y. Kim, K. Jang, J.-R. Park, D.-I. Yeom, J.-S. Kim, H.-S. Kim, J.-H. Jun, and S.-C. Chung, “Control of Laser-induced Mechanical Effects Using a Dual-wavelength Irradiation Method,” accepted for publication in J. Korean. Phys. Soc. (2015).
- [2] J.-S. Kim, H.-B. Oh, A.-H. Kim, J.-S. Kim, E.-S. Lee, B.-J. Goh, J.-Y. Kim, K. Jang, J.-R. Park, S.-C. Chung, and J.-H. Jun, “Responses of Human Sensory Characteristics to 532 nm Pulse Laser Stimuli,” accepted for publication in Technology and Health Care. (2015).
- [3] H.-C. Lim, H. Kim, K. Jang, J.-Y. Kim, J.-H. B, S.-J. Yang, S.-H. Jeong, and J.-R. Park, “Design and fabrication of light-guiding plate for a photobioreactor that utilizes sunlight,” Opt. Rev. 22, pp. 779-785 (2015).
- [4] 신성선, 김재영, 장경민, 백준혁, 양승진, 박종락, “레이저 최대 허용 노출에서의 피부 온도 상승에 관한 연구,” 공학기술논문지, 제8권, 제2호, pp. 99-103 (2015).
- [5] 양승진, 백준혁, 김재영, 장경민, 박종락, “레이저 피부 흡수에 의해 발생하는 축 방향 변위의 펄스 폭 의존성에 관한 연구,” 공학기술논문지, 제8권, 제3호, pp. 205~209 (2015).

학술 대회 발표

- [1] 장경민, 김재영, 박종락, “실리콘 웨이퍼 표면 텍스처를 사용한 휘도 향상 광학필름 모델링 및 시뮬레이션,” 한국광학회 2015년도 동계 학술발표회 논문집, pp. 134-135 (2015).
- [2] 김재영, 장경민, 박종락, “LightTools를 이용한 반사형 복합 필름 분석,” 한

국광학회 2015년도 동계 학술발표회 논문집, pp. 450-451 (2015).

- [3] 임현철, 장경민, 김재영, 백준혁, 양승진, 박종락, “광생물반응기용 LED와 태양광 하이브리드 광원 제어 시스템,” 한국광학회 2015년도 동계 학술 발표회 논문집, pp. 136-137 (2015).

프로젝트 수행

- [1] “레이저 촉감 제시 기술 개발,” 미래유망 융합기술 파이오니아사업, 미래 창조과학부 (2014.3 - 현재).