



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](#)

2017년 2월  
석사학위논문

레이저의 탄성 매질 흡수에 의해  
발생하는 열 및 기계적 효과에 관한  
연구

조선대학교 대학원

광기술평학과

양승진

레이저의 탄성 매질 흡수에 의해  
발생하는 열 및 기계적 효과에 관한  
연구

**Study of Thermal and Mechanical Effects Induced by Laser  
Absorption in an Elastic Medium**

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

광기술험공학과

양승진

레이저의 탄성 매질 흡수에 의해  
발생하는 열 및 기계적 효과에 관한  
연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

양 승 진

## 양 승 진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 권 민 기 인

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 인

위 원 조선대학교 교수 박 종 락 인

2016년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

<b>제1장 서론</b> .....	1
제1절 연구 배경 .....	1
제2절 논문 구성 .....	4
<b>제2장 탄성 매질에서의 레이저 흡수에 의한 열 및 기계적 효과</b> .....	5
제1절 탄성 매질 내의 레이저 흡수 .....	5
제2절 열 전달 방정식 및 열탄성 파동 방정식 .....	7
1. 열 전달 방정식 .....	7
2. 열탄성 파동 방정식 .....	7
제3절 시뮬레이션 결과 .....	9
1. 온도 변화 시뮬레이션 .....	9
2. 변위 및 가속도 시뮬레이션 .....	18
<b>제3장 탄성 매질의 열 및 광학 상수 결정</b> .....	26
제1절 실험 및 시뮬레이션 조건 .....	26
제2절 열 및 광학 상수 결정 시뮬레이션 .....	27
1. 측정 및 시뮬레이션 결과 .....	27
2. 논의 .....	29
<b>제4장 결론</b> .....	37

[참고문헌] ..... 39

[감사의 글] ..... 42

## 그림 목차

그림 2.1 ANSYS Fluent 시뮬레이션 레이아웃 .....	14
그림 2.2 레이저 펄스 에너지가 $E_p = 25.80$ mJ일 때, 탄성 매질의 표면 중심부의 온도 상승치 변화에 대한 (a) 측정 및 (b) 시뮬레이션 결과 .....	15
그림 2.3 온도 상승치가 최대일 때(레이저 펄스 에너지 $E_p = 25.80$ mJ), 탄성 매질의 표면의 온도 상승치 분포에 대한 (a) 측정 및 (b) 시뮬레이션 결과 .....	16
그림 2.4 매질의 표면 중심부의 온도 변화에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$ mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ) .....	17
그림 2.5 ANSYS Mechanical의 시뮬레이션 레이아웃 .....	22
그림 2.6 매질 후면 중심점에서의 변위(displacement)에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$ mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ) .....	23
그림 2.7 매질 후면 중심점에서의 가속도(acceleration)에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$ mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ) .....	24
그림 2.8 매질 후면 중심점에서의 가속도(acceleration)에 대한 측정 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$ mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$ mJ) .....	25
그림 3.1 레이저 빔 직경이 $\phi = 3.1$ mm일 때의 적외선 카메라 측정 결과. (a) 매질의 표면 중심부의 온도 상승치의 시변화, (b) 온도 상승치가 최대일	



때의 온도 상승치 공간 분포 ..... 33  
 그림 3.2 레이저 빔 직경이  $\phi = 3.1$  mm일 때, (a) 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화 시뮬레이션 결과, (b) 흡수 계수와 열 전도도 변화에 따른 온도 감쇠 시상수 값 변화 시뮬레이션 결과 ..... 34  
 그림 3.3 레이저 빔 직경이  $\phi = 3.1$  mm일 때, 흡수 계수 및 열 전도도 추출 결과( $\mu_a = 3.55$  mm<sup>-1</sup>,  $k = 0.229$  W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과. (a) 매질의 표면 중심부의 온도 상승치의 시변화, (b) 온도 상승치가 최대일 때의 온도 상승치 공간 분포 ..... 35  
 그림 3.4 레이저 빔 직경 변화에 따른 (a) 최대 온도 상승치 변화 시뮬레이션 결과, (b) 온도 감쇠 시상수 값 변화 시뮬레이션 결과 ..... 36

## 표 목차

표 2.1 시뮬레이션에 사용된 레이저 파라미터 .....	12
표 2.2 시뮬레이션에 사용된 매질 특성 상수 .....	13
표 2.3 변위 및 가속도 시뮬레이션에 추가적으로 사용된 매질의 특성 상수 .....	21
표 3.1 흡수 계수 값 추출 결과 (단위: $\text{mm}^{-1}$ ) .....	31
표 3.2 열 전도도 값 추출 결과 (단위: $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) .....	32

## **ABSTRACT**

### **Study of Thermal and Mechanical Effects Induced by Laser Absorption in an Elastic Medium**

**By Seung-Jin Yang**

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

**Department of Photonic Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

In this study, simulations of the thermal and mechanical effects induced by pulsed-laser absorption in an elastic medium were performed and a method for determining the optical and thermal properties of an absorbing medium was demonstrated.

For the simulations of the thermal effects, ANSYS Fluent (ANSYS Incorporated, USA), computational fluid dynamics (CFD) software, was utilized. The elastic medium, assumed to be in the form of a circular plate, used for the simulations has a thickness of 2.2 mm and a radius of 15 mm. Axisymmetric analysis is applied for the simulations for considering the geometrical symmetry of the medium. For the simulations of the mechanical effects, ANSYS Mechanical (ANSYS Incorporated, USA), a structural analysis tool, was utilized. Spatio-temporal distributions of the temperature increase obtained from the simulations of the thermal effects were used as the input data for the structural simulations, and the results of the displacement and acceleration of the central point on the rear surface of the elastic medium were obtained.

When a single pulse (pulse width: 8 ns) was incident on the medium, the central point on the front surface attained the maximum temperature increase immediately after the incidence of the laser pulse, and then the temperature gradually decreased due to thermal diffusion. The magnitudes of the displacement and acceleration linearly increased with increasing laser-pulse energy. When repetitive pulses were incident on the medium, an abrupt temperature increase occurred immediately after the incidence of each laser pulse and the temperature gradually decreased during the period between adjacent pulses. While the magnitude of the displacement increased cumulatively after the incidence of each laser pulse, the same waveform of the acceleration appeared periodically whenever each laser pulse was incident on the medium. The simulated results were in fairly good qualitative agreement with the experimental results measured using an acceleration sensor.

While simulating the thermal effects, we found that the maximum temperature increase of the medium depends on the absorption coefficient and the decay time constant of the temperature depends on both the absorption coefficient and the thermal conductivity. The absorption coefficient and thermal conductivity of the medium were determined by fitting the simulated results with measured ones for the temperature change data obtained using an infrared camera.

We believe that the results presented in this thesis can provide useful information for research on evoking tactile sensations by using a pulsed laser and an absorbing elastic medium. A study in which effective parameters for the laser and medium are determined through simulations is in progress.

# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경

1960년 T. H. Maiman에 의해 루비 레이저가 최초로 개발된 이후, 레이저 기술은 현대 사회의 급속한 과학, 기술의 발전과 함께 빠르게 성장하고 있으며, 매우 광범위한 영역으로 응용 범위를 확대하고 있다.<sup>[1]</sup> 현재 레이저는 광통신 분야를 비롯하여 계측, 정보처리, 화학 응용, 핵융합, 가공 및 의용 등의 영역에 폭넓게 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 레이저 빔은 일반 광원과 달리 지향성(directionality)이 뛰어나고 매우 좁은 파장 밴드 폭(wavelength band width)을 갖고 있으며, 높은 수준의 에너지를 원하는 거리까지 정밀하게 전송할 수 있다.<sup>[2, 3]</sup>

레이저와 물질의 상호작용(laser-matter interactions)은 발생 기전에 따라 광화학적(photochemical), 광열적(photothermal), 광기계적(photomechanical) 상호작용으로 분류할 수 있다.<sup>[4]</sup> 발생 기전에 상관 없이 상호작용하는 매질의 의한 레이저 빔의 흡수 과정이 매우 중요하다. 이는 광의 흡수가 레이저와 물질 상호작용이 시작되는 기본 단계이며, 광 흡수된 이후 화학적, 열적, 기계적 반응이 후속적으로 발생하기 때문이다.

최근 펄스 레이저를 피부 조직에 직접 조사하여 광기계적 상호작용을 통해 촉각 자극을 유도하고자 하는 연구가 활발히 수행되고 있다.<sup>[2, 5-7]</sup> 참고문헌 [5]에서는 레이저를 사용한 비접촉식 촉각 자극 기술을 처음으로 제안하였고, 물리적(physical) 연구, 인지적(perceptual) 연구 및 시뮬레이션(simulation) 연구를 통해 레이저 유도 열탄성 효과(laser-induced thermoelastic effects)를 기반으로 펄스 레이저를 이용한 촉각 자극 생성이 가능함을 보였다.<sup>[5]</sup> 이 경우 과도 열탄성 파동(transient thermoelastic wave)에 의해 발생한 급작스런 기계적 움직임(sudden mechanical blast)이 피부표면 아래에 위치한 감각 수용기(sensory receptor)들을 동시에 활성화시켜 촉각 자극이 유도된 것으로 추측되었다. 그러나 참고문헌 [5]에 보고된 직접 레이저 자극(direct laser stimulation)의 피험자 응답을 분석해 보면 매우 다양한 자극이 유도되고 있음을 확인할 수 있다. 통증이 동반되지 않는 촉

각 자극, 통증을 동반한 촉각 자극, 무감각에 대한 응답률이 각각 56.3%, 12.3%, 31.4%이었다. 무감각 응답을 제외한 나머지 촉각 자극 응답의 자극 종류를 기계적, 전기적, 열적 자극으로 분류하면 각각 75.0%, 21.4%, 3.6%의 응답률을 보였다. 이 중 가장 높은 비중을 보이는 기계적 자극은 가볍게 건드는 느낌, 누르는 느낌, 통증을 동반하지 않는 찌르는 느낌, 통증을 동반한 찌르는 느낌, 퍼지는 느낌으로 분류되었으며, 각각의 응답률은 14.3%, 6.3%, 36.5%, 28.6%, 14.3%로 나타났다.<sup>[5]</sup> 참고문헌 [5]의 연구 결과는 동일한 실험 조건에서 과반수 이상의 피험자로부터 통증을 동반하지 않는 촉각 자극을 느꼈다는 응답 결과를 얻었다는 점에서 큰 의미를 갖고 있지만, 피험자 인지 응답 분석 결과에서 볼 수 있듯이 인지된 촉각 자극의 성질과 정도의 피험자 간 개인차가 존재한다.

참고문헌 [3]에서는 레이저 유도 촉각 자극 실험의 피험자 응답특성을 분석하여 단위 면적당 레이저 펄스 에너지인 레이저 에너지 밀도(laser energy density)가 증가할수록 피험자의 촉각 자극 인지 확률도 증가함을 발견하였다.<sup>[3]</sup> 레이저 펄스 에너지를 단순히 증가시킬 경우, 피부 조직의 온도 상승치 또한 함께 증가하여 열 효과(thermal effects)에 의해 촉각 자극 이외의 다양한 자극이 동반되어 나타난다. 참고문헌 [6]에서는 피부 조직의 온도 상승치를 일정하게 유지하면서도 레이저 유도 열탄성 효과를 연속적으로 제어할 수 있는 2 파장 조사법(dual-wavelength irradiation method)을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해 2 파장 조사법의 적용 가능성을 입증 하였다.<sup>[6]</sup> 참고문헌 [7]에서는 열 전달 방정식(heat transfer equation)과 열탄성 파동 방정식(thermoelastic wave equation)에 대한 시뮬레이션을 수행하여 펄스 레이저가 인체 피부 조직에 흡수될 경우 발생하는 열 및 열탄성 효과에 대해 조사하였고, 특히 피부 조직 내에서의 변위(displacement)와 스트레스(stress)의 동역학적 거동 양상(dynamic behavior)을 상세히 분석하였다.<sup>[7]</sup>

레이저를 피부 조직에 직접 조사하는 대신 피부 조직에 부착된 탄성 매질에 펄스 레이저를 조사하여 촉각 자극을 유도하고자 하는 연구 또한 수행되고 있다.<sup>[8, 9]</sup> 참고문헌 [8]에서는 인지 실험을 통해 간접 레이저 자극(indirect laser stimulation)을 통한 공중 촉각 렌더링(mid-air tactile rendering)의 실현 가능성을 입증하였고, 간접 레이저 자극을 통해 피험자의 개인차가 거의 없이 짧은 기계적 두드림(short mechanical tap)과 유사한 느낌을 유도할 수 있음을 발견하였다.<sup>[8]</sup> 또한 시뮬레이션을 통해 레이저 펄스의 순간적이고 국소적인 흡수에 기인한 과도 스트레스 파동과 굽힘 응력(bending stress)의 발생이 중요한 역할을 하며, 굽힘

응력에 기인한 탄성 매질의 변형(deformation)과 떨림(vibration) 현상이 촉각 자극 유도의 가장 중요한 기전으로 추측되었다.<sup>[9]</sup>

본 논문에서는 탄성 매질을 사용한 간접 레이저 자극에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 탄성 매질에 펄스 레이저가 입사되어 흡수된 이후 발생하는 열 효과 및 열탄성 효과에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 레이저 빔의 매질 흡수에 대한 해석적 표현식을 사용하여 매질 내부에 발생하는 열 발생률(heat generation rate)에 대한 결과를 구하였으며, 열 전달 방정식과 열탄성 파동 방정식에 대한 해를 통해 펄스 레이저 흡수 후 발생하는 매질 내부에서의 시공간적 온도 변화와 매질 후면의 변위 및 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 구하였다. 적외선 카메라와 가속도 센서를 사용하여 펄스 레이저 입사 후 발생하는 매질의 온도 변화 및 매질 후면의 가속도 변화를 측정하였으며, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 열 전달 방정식을 이용한 열 및 온도 해석 시뮬레이션을 통해 매질의 광학적 특성 상수인 흡수 계수와 열적 특성 상수인 열 전도도를 결정하였다. 매질 표면의 온도 변화 측정 결과와 열 전달 방정식 시뮬레이션 결과를 비교, 분석하여 흡수 계수 및 열 전도도를 신뢰성 있게 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

## 제2절 논문 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 탄성 매질에서의 레이저 흡수에 의한 열 및 기계적 효과에 기술하였다. 2장 1절에서는 탄성 매질 내의 레이저 흡수에 대해 설명하였고, 가우시안 공간 프로파일을 갖고 있는 레이저의 흡수에 의해 매질 내에 발생하는 열 발생률에 대한 해석적 표현식을 소개하였다. 2장 2절에서는 펄스 레이저 흡수 후 발생하는 온도 분포 변화를 기술하는 열 전달 방정식과 온도 분포 변화에 의해 발생하는 매질의 변형을 기술하는 열탄성 파동 방정식을 정리하였고, 2장 3절에서는 각 방정식을 사용한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 단일 펄스와 20 Hz, 50 Hz의 반복률을 갖고 있는 반복 펄스가 입사될 때 발생하는 온도 변화와 매질 후면의 변위 및 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 서술하였다.

제3장에서는 적외선 온도 측정법(infrared thermometry)을 이용한 탄성 매질의 열 및 광학 상수 결정법에 대해 소개하였다. 3장 1절에서는 적외선 카메라를 이용한 온도 측정 실험 및 열 전달 방정식을 사용한 시뮬레이션 조건에 대해 기술하였다. 3장 2절에서는 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 비교를 통한 열 및 광학 상수 결정법에 대해 기술하였는데, 아크릴 계열 테이프 매질의 광학 특성 상수인 흡수 계수 값과 열 특성 상수인 열 전도도 값 추출 과정 및 결과에 대해 상세히 설명하였다. 이와 함께 최대 온도 상승치의 흡수 계수 의존성과 온도 감쇠 시상수의 흡수 계수 및 열 전도도 의존성에 대해 자세히 논의하였다.

마지막 제4장에서는 본 논문의 연구 결과를 종합 정리하였고, 본 논문의 연구 결과를 기반으로 현재 진행 중인 후속 연구에 대해 언급하였다.



## 제2장 탄성 매질에서의 레이저 흡수에 의한 열 및 기계적 효과

### 제1절 탄성 매질 내의 레이저 흡수

일반적으로 탄성 매질이란 외부의 힘이 매질에 가해질 때 변형이 발생하고 외부의 힘이 사라지면 점차적으로 초기 형태로 복원되는 매질을 의미한다.<sup>[10]</sup> 본 논문의 시뮬레이션에 사용한 탄성 매질은 광 흡수가 일어나는 성질을 갖고 있는 것으로 가정하였다. 레이저가 매질에 입사 할 때 가장 먼저 매질의 표면에서 반사가 발생한다. 이는 공기와 매질의 굴절률 차이에 의한 것이다. 그 후 매질 내부로 투과된 광은 흡수 과정을 거치게 되는데, 이는 흡수 계수에 의해 결정된다. 흡수 계수가 큰 경우 광은 짧은 거리를 거쳐 전파된 후 급속히 사라지게 되고, 흡수 계수가 작은 경우 광은 긴 거리를 거쳐 전파된 후 사라지게 된다.<sup>[11]</sup> 흡수된 레이저의 에너지는 열 에너지로 전환되어 매질의 온도 상승에 기여하게 된다.

가우시안 빔 프로파일(gaussian beam profile)을 갖는 레이저의 흡수에 의해 매질 내부에 발생하는 체적 열 발생률(volumetric heat generation rate)  $Q_v$ 는 다음 식과 같이 주어진다.<sup>[12]</sup>

$$Q_v(r, z, t) = (1 - R) \frac{E_p}{\tau_p} \frac{2\mu_a}{\pi\omega^2} \exp(-\mu_a z) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad \forall t \leq \tau_p \quad (2.1)$$

여기서,  $R$ 은 레이저 빔의 표면 반사율을,  $E_p$ 는 레이저 펄스 에너지를,  $\tau_p$ 는 레이저 펄스 폭을,  $\mu_a$ 는 매질의 흡수 계수를,  $\omega$ 는 레이저 빔의 반경( $1/e^2$  기준)을 나타낸다. 식 (2.1)은 원통형 좌표계(cylindrical coordinates)를 사용하여 표현한 것으로  $z$ 와  $r$ 은 각각 매질 내부로의 방향과 매질 표면에 나란한 반경 방향을 의미한다. 공기와 매질의 경계면에서의 표면 반사율  $R$ 은 다음 식과 표현된다.<sup>[2]</sup>

$$R = \left| \frac{1 - (n_r - in_i)}{1 + (n_r - in_i)} \right|^2 \quad (2.2)$$

여기서,  $n_r$ 과  $n_i$ 은 각각 매질 굴절률의 실수부와 허수부를 의미한다. 굴절률 허수  $n_i$ 는 매질의 소멸 계수(extinction coefficient)라고도 불리으며, 흡수 계수  $\mu_a$ 와 레이저 파장  $\lambda$ 와 다음의 관계식을 만족한다.<sup>[2]</sup>

$$n_i = \frac{\mu_a \lambda}{4\pi} \quad (2.3)$$

## 제2절 열 전달 방정식 및 열탄성 파동 방정식

### 1. 열 전달 방정식

레이저 빔이 매질에 조사 되면 레이저 에너지의 일부가 흡수되고 흡수된 에너지가 열원(thermal source)으로 작용한다. 레이저 에너지 흡수에 의해 생성된 열원 위치에서 매질의 온도는 국소적으로 상승하게 되며 열 확산(thermal diffusion) 효과에 의해 주변 온도의 변화에 영향을 주게 된다. 매질 내에서의 온도 분포는 다음 식과 같이 표현되는 열 전달 방정식(heat transfer equation)에 의해 결정된다.<sup>[12]</sup>

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_v \quad (2.4)$$

여기서,  $T$  는 온도 상승의 시공간적 분포(spatio-temporal distribution of temperature increase)를,  $\rho$ 는 질량 밀도(mass density)를,  $c$ 는 비열(specific heat)을,  $k$ 는 열 전도도(thermal conductivity)를 의미한다.

### 2. 열탄성 파동 방정식

펄스 레이저의 순간적이고 국소적인 흡수에 의해 발생한 비균일적인 온도 분포에 의해 내부 힘이 생성되고 그 결과로 매질의 변형이 발생하게 된다. 비균일한 온도 분포에 의한 탄성 매질의 변형은 다음과 같은 열탄성 파동 방정식(thermoelastic wave equation)에 의해 결정된다.<sup>[13, 14]</sup>

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \frac{E}{2(1+\nu)} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) = - \frac{E\beta}{3(1-2\nu)} \nabla T \quad (2.5)$$

여기서,  $\mathbf{u}$  는 변위 벡터(displacement vector)를,  $E$ 는 영률(Young's modulus)을,  $\nu$ 는

포아송비(Poisson's ratio)를,  $\beta$ 는 체적 열팽창 계수(volumetric thermal expansion coefficient)를 나타낸다. 식 (2.5)의 우변은 변위 발생의 구동 항(driving term)을 나타내고 있는데, 비균일한 온도 분포가 탄성 매질의 열탄성 변형에 필수적임을 분명하게 보여주고 있다.

## 제3절 시뮬레이션 결과

### 1. 온도 변화 시뮬레이션

본 논문에서는 탄성 매질에서의 펄스 레이저 흡수로 인한 열 효과 시뮬레이션을 수행하기 위해 열 및 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent(ANSYS Incorporated, USA)를 사용하였다. 레이저의 단일 펄스와 반복 펄스에 의한 온도 변화 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2.1은 ANSYS Fluent를 사용한 열 해석 시뮬레이션 레이아웃을 보여주고 있다. 모델링한 탄성 매질은 두께 2.2 mm, 반경 15 mm를 갖고 있는 원형 판 형태이다. 효율적인 시뮬레이션을 위해 매질의 기하학적인 대칭성을 고려하여 축 대칭 해석(axisymmetric analysis)을 시뮬레이션 모델에 적용하였다. 열 효과 시뮬레이션에 사용된 Mesh의 Cell 크기는  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$  이었고, Mesh Cell 개수는 축 방향(두께 방향) 110개, 반경 방향 750개이었다. 대칭 축(symmetric axis)을 제외한 나머지 면은 실제 실험 환경과 동일하게 설정하기 위해, 대류 경계 조건(convection boundary condition)을 적용하였다.

열 전달 방정식 시뮬레이션에 사용된 레이저 파라미터와 매질 특성 상수는 다음과 같다. 레이저 파장, 빔 반경, 펄스 폭은 각각  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $\omega = 3.95 \text{ mm}$ ,  $\tau_p = 8 \text{ ns}$ 이었으며, 단일 펄스와 20 Hz, 50 Hz의 반복 펄스에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 매질의 질량 밀도, 비열, 열 전도도, 굴절률, 흡수 계수는 각각  $\rho = 1010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c = 2270 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $k = 0.307 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $n_r = 1.52$ ,  $\mu_a = 3.44 \text{ mm}^{-1}$  이었다. 표 2.1과 표 2.2에 시뮬레이션에 사용된 레이저 파라미터와 매질의 특성 상수를 각각 정리하였다. 열 전도도와 흡수 계수를 제외한 다른 특성 상수 값들은 실험에 사용된 탄성 매질에 대해 직접적으로 측정하여 얻은 값들이다. 열 전도도와 흡수 계수 값은 매질의 온도 변화 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교, 분석하여 추출해낸 값들이다.

그림 2.2(a)는 레이저 펄스 에너지가  $E_p = 25.80 \text{ mJ}$ 일 때 탄성 매질의 표면 중심부의 온도 변화에 대한 측정 결과이다. 실험을 위해 주파수 배가된 큐-스위치 Nd:YAG 레이저(Centurion+. Quantel)가 사용되었으며, 온도 측정을 위해 적외

선 카메라(T420, FLIR)를 사용하였다. 최대 온도 상승치는 1.51 °C이었으며, 온도가 최대 온도 상승치의  $1/e$  수준으로 감소하는데 걸리는 시간으로 정의된 온도 감쇠 시상수(decay time constant)는 0.895 s이었다. 시뮬레이션을 통해 최대 온도 상승치는 흡수 계수에 비례하고 열 전도도와는 무관하며, 온도 감쇠 시상수는 흡수 계수와 열 전도도에 모두 의존함을 발견하였다.<sup>[9]</sup> 시뮬레이션을 통해 흡수 계수  $\mu_a = 3.44 \text{ mm}^{-1}$ 일 때, 실험에 사용된 레이저 펄스 에너지 값( $E_p = 25.80 \text{ mJ}$ )에서 최대 온도 상승치 1.51 °C를 얻을 수 있었다. 흡수 계수를  $\mu_a = 3.44 \text{ mm}^{-1}$ 로 고정하고 열 전도도 값을 변화시키며 시뮬레이션을 수행하여 온도 감쇠 시상수 값이 0.895 s가 되는 조건을 구하였는데, 이 때 열 전도도 값은  $k = 0.307 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 이었다. 그림 2.2(b)는 이러한 방법으로 결정된 흡수 계수와 열 전도도를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 실험결과와 매우 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 빔 직경과 레이저 펄스 에너지를 변경하여 시뮬레이션을 수행하였을 경우에도 실험결과와 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 흡수 계수와 열 전도도 결정법에 대해서는 제3장에서 다시 한 번 자세히 소개하도록 하겠다. 그림 2.3(a)와 (b)는 각각 온도 상승치가 최대일 때의 온도 상승치 공간 분포에 대한 측정 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 공간 분포 또한 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 2.4(a)는 다섯 가지 서로 다른 레이저 펄스 에너지를 갖는 단일 펄스(single shot)가 매질에 조사되었을 경우 매질의 표면 중심부의 온도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 함께 보여주고 있다. 레이저 펄스 에너지가 증가함에 따라 최대 온도 상승치 또한 비례하여 증가하였다. 레이저 펄스 에너지가 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80 mJ일 때, 최대 온도 상승치는 각각 0.34, 0.48, 0.85, 1.20, 1.51 °C이었다. 레이저 펄스가 조사된 직후 급격히 온도가 상승한 후 열 확산 및 표면 대류에 의해 서서히 감소하는 경향을 보였다. 그림 2.4(b)와 (c)는 각각 펄스 반복률(repetition rate)이 20, 50 Hz일 때, 매질의 표면 중심부의 온도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 레이저 펄스 에너지는  $E_p = 20.49 \text{ mJ}$ 이었다. 펄스가 반복적으로 입사될 경우, 펄스 입사 직후 급격한 온도 상승이 발생하고 다음 펄스가 입사하기 전까지 온도가 서서히 감소하다가 다음 펄스 입사 직후 급격한 온도 상승이 발생하는 경향을 반복적으로 보였다. 펄스 간 온도 감소는 그

리 크지 않았는데, 펄스 간 시간 간격(20 Hz의 경우 50 ms, 50 Hz의 경우 20 ms)이 온도 감쇠 시상수 값(~900 ms) 보다 매우 작기 때문인 것으로 이해할 수 있다.

표 2.1 시뮬레이션에 사용된 레이저 파라미터

Parameter	Value	Note
Laser Beam Radius $\omega$	3.95 mm	Fixed
Laser Pulse Width $\tau_p$	8.0 ns	Fixed
Laser Pulse Energy $E_p$	5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80 mJ	Varied
Wavelength $\lambda$	532 nm	Fixed
Repetition Rate	Single, 20 Hz, 50 Hz	Varied



표 2.2 시뮬레이션에 사용된 매질 특성 상수

Parameter	Value	Note
Mass Density $\rho$	1010 kg·m <sup>-3</sup>	Measured
Specific Heat $c$	2270 J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Measured
Thermal Conductivity $k$	0.307 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Fitted
Refractive Index $n_r$	1.52	Measured
Absorption Coefficient $\mu_a$	3.44 mm <sup>-1</sup>	Fitted

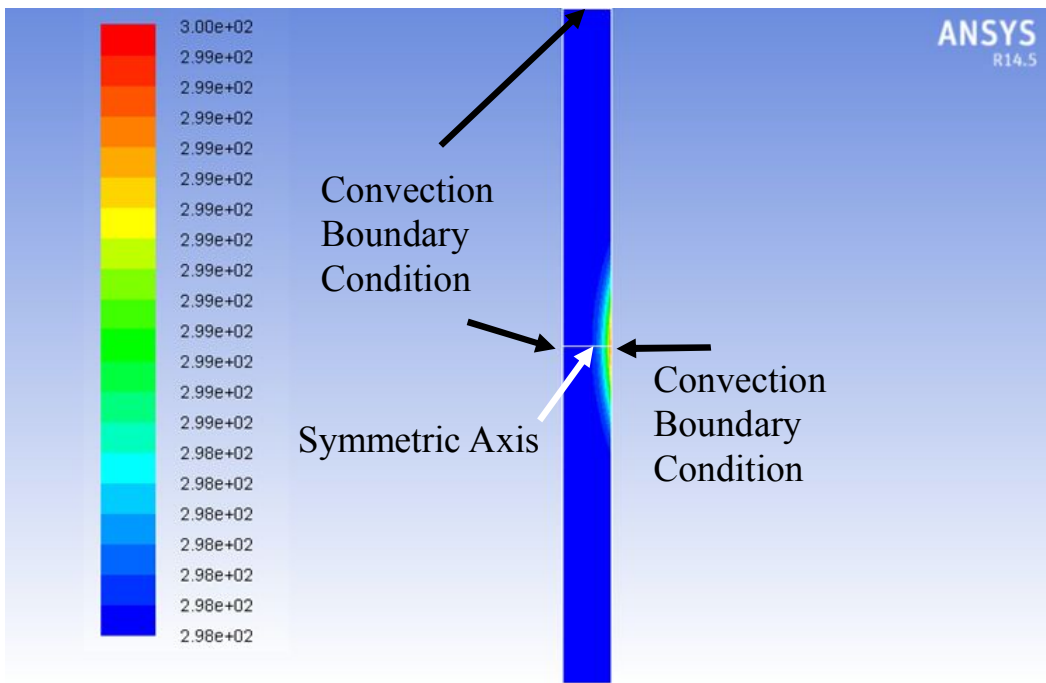


그림 2.1 ANSYS Fluent 시뮬레이션 레이아웃

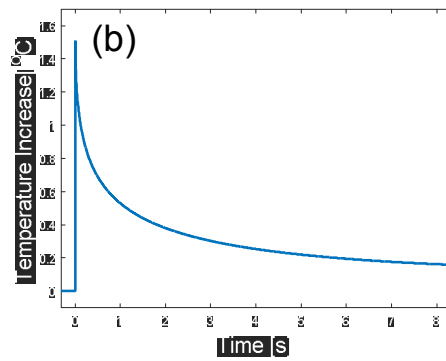
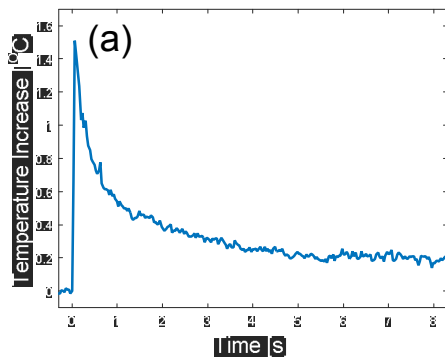


그림 2.2 레이저 펄스 에너지가  $E_p = 25.80$  mJ일 때, 탄성 매질의 표면 중심부의 온도 상승치 변화에 대한 (a) 측정 및 (b) 시뮬레이션 결과

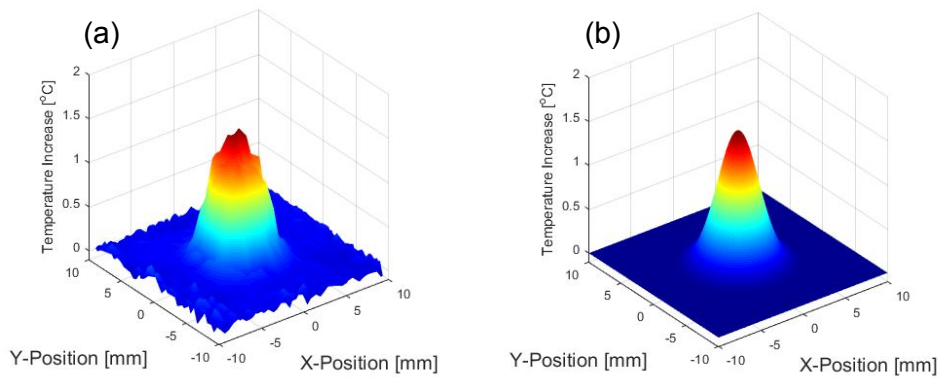


그림 2.3 온도 상승치가 최대일 때(레이저 펄스 에너지  $E_p = 25.80$  mJ), 탄성 매질의 표면의 온도 상승치 분포에 대한 (a) 측정 및 (b) 시뮬레이션 결과

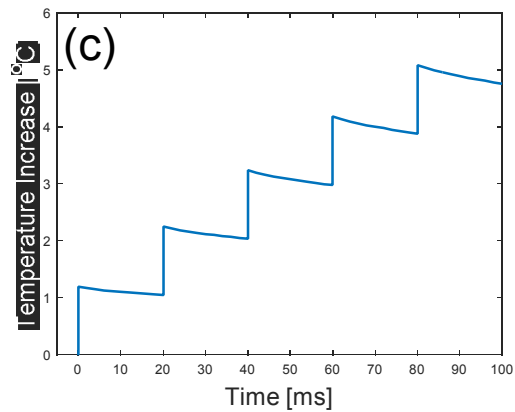
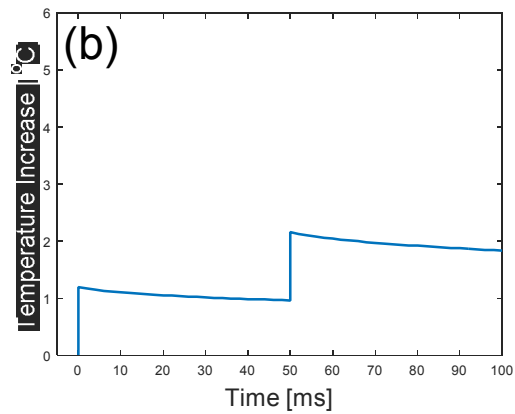
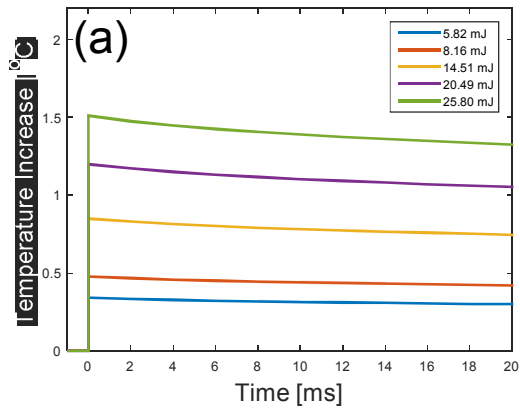


그림 2.4 매질의 표면 중심부의 온도 변화에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$  mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ)

## 2. 변위 및 가속도 시뮬레이션

본 논문에서는 열탄성 변형 시뮬레이션을 위해 구조 해석 소프트웨어인 ANSYS Mechanical(ANSYS Incorporated, USA)을 사용하였다. 그림 2.5는 ANSYS Mechanical의 시뮬레이션 레이아웃을 보여주고 있다. 모델링된 탄성 매질의 크기는 ANSYS Fluent 시뮬레이션에 사용된 모델과 동일하다. 이 경우에도 축 대칭 해석을 적용하였는데, ANSYS Mechanical 2-D 해석에서는 Y축에만 축 대칭 해석을 설정할 수 있어, ANSYS Fluent의 모델과는 다르게 레이저가 아래 방향에서 입사하는 것으로 가정하였다. 사용한 Mesh의 Cell 사이즈는 열 해석 시뮬레이션 때와 동일하게  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 가속도 센서를 이용한 측정 실험을 위해 탄성 매질 샘플을 환형 광학 마운트(annular optical mount)에 고정시켰는데, 이러한 실험적 상황을 반영하기 위해 샘플 후면의 가장자리 2 mm 영역에 고정 경계조건(fixed boundary condition)을 적용하였고 나머지 부분은 자유 경계 조건(free boundary condition)을 적용하였다.

구조 해석 시뮬레이션에 추가적으로 사용된 매질의 특성 상수는 다음과 같다. 매질의 영률, 포아송비, 선형 열팽창 계수는 각각  $E = 26.1\ \text{MPa}$ ,  $\nu = 0.49$ ,  $\beta/3 = 1.8 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$ 이었다. 영률 값은 실험에 사용한 매질에 대한 측정을 통해 얻은 값이며, 포아송비와 선형 열팽창 계수 값은 일반적인 아크릴 계열 테이프 매질에 대해 문헌[15]에 보고되어 있는 값이다. 표 2.3에 변위 및 가속도 시뮬레이션에 추가적으로 사용된 매질의 특성 상수를 정리하였다. 열 전달 방정식에 대한 시뮬레이션 결과로부터 얻은 온도 상승치의 시공간적 해(spatio-temporal solution)를 열탄성 파동 방정식의 구동 항에 대입하여 매질의 변형에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2.6은 매질 후면 중심점에서의 변위(displacement)에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 2.6(a)는 다섯 가지 서로 다른 레이저 펄스 에너지(5.82 mJ, 8.16 mJ, 14.51 mJ, 20.49 mJ, 25.80 mJ)를 갖는 단일 펄스에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 양의 값(positive value) 변위는 레이저가 입사하는 반대방향으로의 이동을 의미한다. 레이저 펄스가 입사된 직후 레이저가 입사하는 반대방향으로 변위가 급격히 증가하였다. 변위는 레이저 펄스 입사 후  $\sim 0.6\ \text{ms}$ 에서 최대값에 도달

하였으며, 그 이후 진동의 양상을 보이며 일정한 값으로 수렴하였다. 레이저 펄스 에너지가 증가함에 따라 변위 값의 크기도 비례하여 증가 하였다. 펄스 레이저 흡수 후 매질 내부에는 앞면 근처의 온도 상승치가 크고 두께 방향으로 온도 상승치가 감소하는 비균일한 온도 분포가 형성되며, 이로 인해 순간적으로 굽힘 스트레스(bending stress)가 발생하게 된다. 이러한 굽힘 스트레스가 해소된 준정상 상태(quasi-steady state)에 도달하여 궁극적으로 레이저가 입사하는 반대방향으로의 굽힘 변형이 발생하게 되는데, 그 과정 중에 샘플의 탄성에 의해 진동현상이 발생하는 것으로 이해 할 수 있다.<sup>[9]</sup>

그림 2.6(b)와 (c)는 레이저 펄스 에너지가 20.49 mJ이며, 각각 펄스 반복율이 20 Hz, 50 Hz 일 때의 변위에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 단일 펄스의 경우와 동일하게 순간적인 변위 값 상승, 진동 현상의 발생, 준정상 상태 수렴이 반복되었는데, 변위 값은 레이저 펄스가 추가적으로 입사될 때마다 직전 준정상 상태 값에 누적되는 양상을 보였다. 펄스 간 시간 간격(20 Hz의 경우 50 ms, 50 Hz의 경우 20 ms)이 온도 감쇠 시상수 값(~900 ms) 보다 매우 작아 열 확산에 의한 온도 감소가 거의 발생하지 않는다. 이로 인해 레이저 펄스가 추가적으로 입사할 때 마다 매질의 온도 상승치가 누적적으로 증가하며, 변위 값 또한 누적되어 증가하는 것으로 이해할 수 있다.

그림 2.7은 시뮬레이션을 통해 얻은 매질 후면 중심점에서의 변위 값을 사용하여 계산한 가속도(acceleration)에 대한 결과이며, 그림 2.8은 가속도 센서(352C23, PCB PIEZOTRONICS)를 사용하여 실험적으로 측정된 결과이다. 그림 2.7(a)는 다섯 가지 서로 다른 레이저 펄스 에너지(5.82 mJ, 8.16 mJ, 14.51 mJ, 20.49 mJ, 25.80 mJ)를 갖는 단일 펄스에 대한 가속도의 시간적 파형을 보여주고 있다. 레이저 펄스가 입사된 직후 가속도 값은 급격히 증가하여 ~50 ms에서 최대 값에 도달하였으며, 그 후 복잡한 파형 형태로 진동하며 점진적으로 진폭이 0에 수렴하였다. 레이저 펄스 에너지가 증가함에 따라 가속도 값의 크기도 비례하여 증가 하였다. 레이저 펄스 에너지가 25.80 mJ일 때 최대 가속도 값은 ~17 g이었는데, 이 값은 실험적으로 측정된 값(~39 g)의 ~40% 수준이다. 열 팽창 계수와 포아송 비 값으로 실험에 사용한 매질에 대해 측정된 값이 아니라 문헌으로부터 얻은 아크릴계열 테이프에 대한 일반적인 값을 시뮬레이션에 사용하였기 때문에

최대 가속도 값에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과 사이의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 측정 결과에서는  $\sim 1$  ms 이후 가속도 값이 거의 0으로 소멸하였으나, 시뮬레이션 결과에서는 결국 소멸하기는 하지만  $\sim 1$  ms 이후에도 여전히 작은 진폭의 가속도가 잠시 동안 지속됨을 발견할 수 있다. 이러한 차이점은 실험에 사용된 매질이 점탄성(viscoelastic property)을 갖고 있기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.<sup>[15]</sup>

그림 2.7(b)와 (c)는 레이저 펄스 에너지가 20.49 mJ이며, 각각 펄스 반복율이 20 Hz, 50 Hz일 때의 가속도에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 최대 가속도 값은 두 경우 모두  $\sim 13$  g 이었는데, 이 경우에도 실험적으로 측정된 값( $\sim 30$  g)의  $\sim 40\%$  수준이었다. 가속도에 대한 결과는 레이저 펄스가 입사할 때 마다 누적되었던 변위 시뮬레이션 결과와는 다르게 레이저 펄스가 입사할 때 마다 단일 펄스의 경우와 동일한 파형이 반복되었다.



표 2.3 변위 및 가속도 시뮬레이션에 추가적으로 사용된 매질의 특성 상수

Parameter	Value	Note
Young's Modulus $E$	26.1 MPa	Measured
Poisson's Ratio $\nu$	0.49	Ref
Thermal Expansion Coefficient $\beta/3$	$1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$	Ref

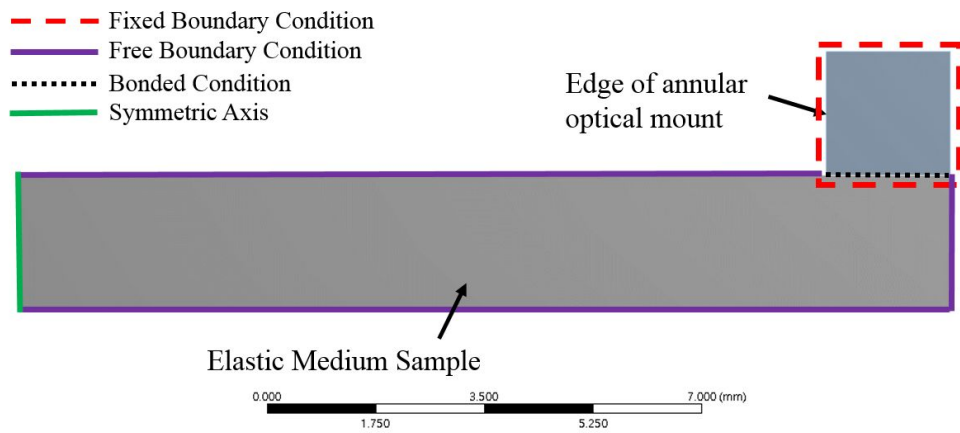


그림 2.5 ANSYS Mechanical의 시뮬레이션 레이아웃

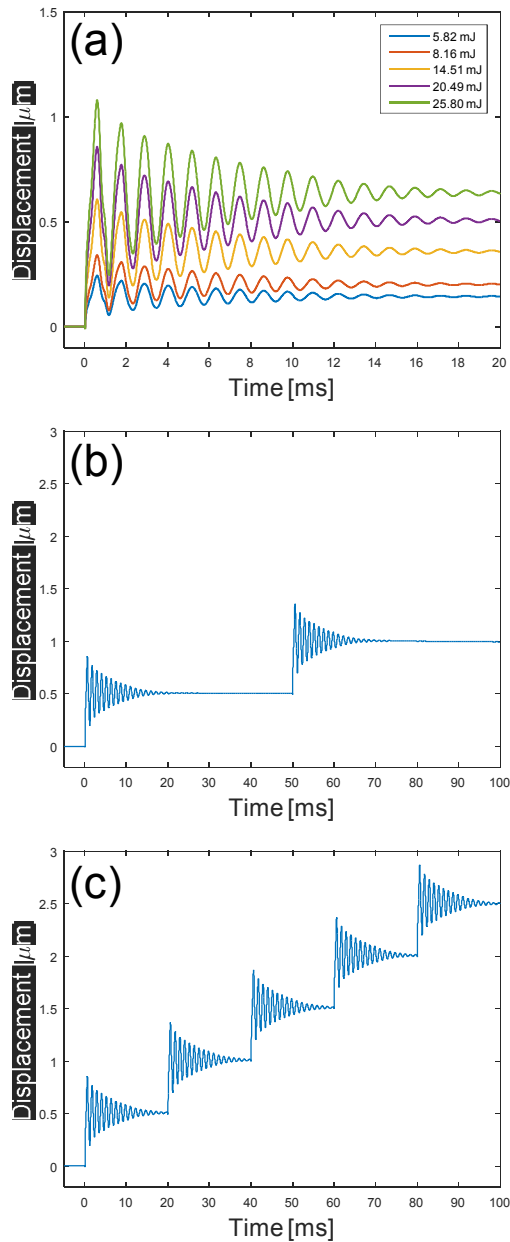


그림 2.6 매질 후면 중심점에서의 변위(displacement)에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$  mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ)

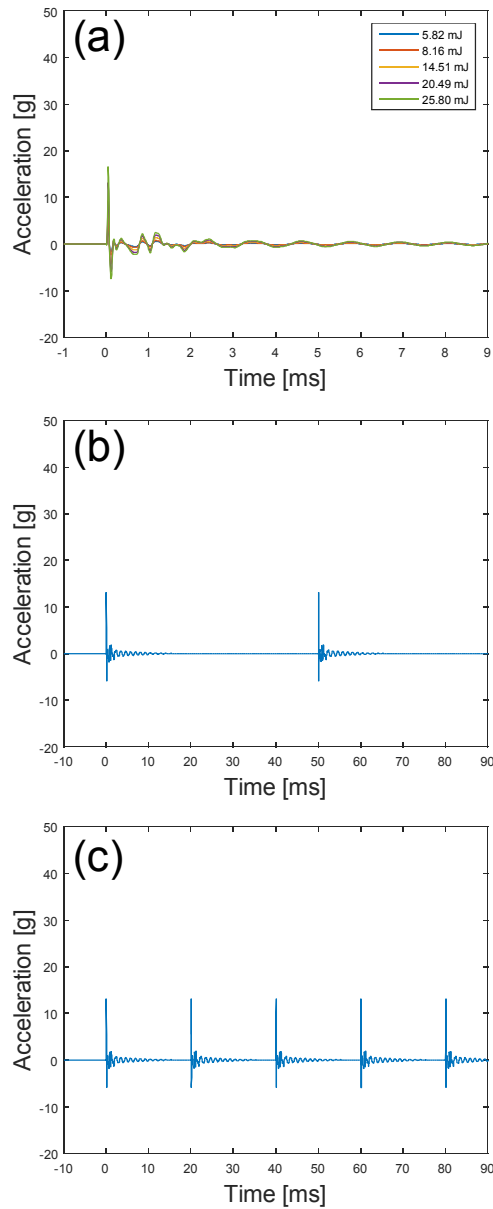


그림 2.7 매질 후면 중심점에서의 가속도(acceleration)에 대한 시뮬레이션 결과.

(a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$  mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ)

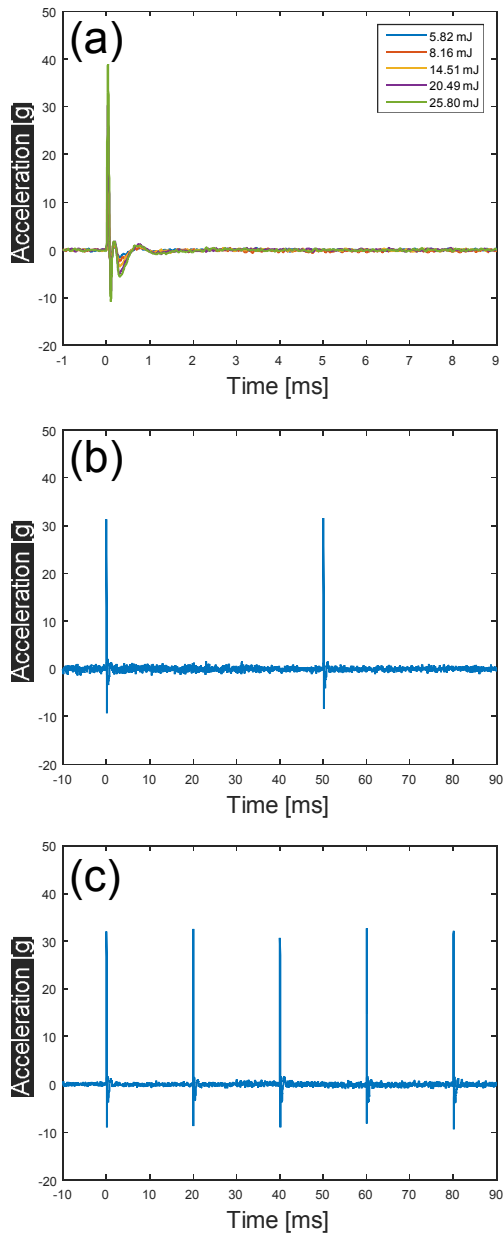


그림 2.8 매질 후면 중심점에서의 가속도(acceleration)에 대한 측정 결과. (a) 단일 펄스의 경우 ( $E_p = 5.82, 8.16, 14.51, 20.49, 25.80$  mJ), (b) 펄스 반복률이 20 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ), (c) 펄스 반복률이 50 Hz인 경우 ( $E_p = 20.49$  mJ)

## 제3장 탄성 매질의 열 및 광학 상수 결정

### 제1절 실험 및 시뮬레이션 조건

제2장에서 소개된 레이저 시스템(Centurion+, Quantel)을 사용하여 탄성 매질에 레이저 펄스를 조사하였다. 실험에 사용된 레이저 시스템으로부터 방출되는 레이저 펄스의 파장과 펄스 폭은 각각  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $\tau_p = 8 \text{ ns}$ 이었으며, 레이저 펄스 에너지는  $E_p = 25.80 \text{ mJ}$ 로 고정하였다. 두께 2.2 mm, 반경 15 mm를 갖는 원형 판 형태의 아크릴 계열 테이프 매질을 실험에 사용하였으며, 3.1, 6.5, 7.6, 14.1 mm의 네 가지 서로 다른 빔 직경( $\phi = 2\omega$ )에 대해 실험을 수행하였다. 동일 레이저 빔 직경에 대해 총 5회의 측정 실험을 진행하였다. 표면의 온도 상승치 변화 측정을 위해 적외선 카메라(T420, FLIR)를 사용하였는데, 프레임 률(frame rate), 픽셀 피치, 검출기 해상도(detector resolution)는 각각 30 Hz, 25 mm,  $320 \times 240 \text{ pixel}$ 이었다.

시뮬레이션의 경우에도 제2장에 정리되어 있는 식 (2.1) ~ (2.4)을 기반으로 ANSYS Fluent를 사용하여 열 및 온도 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 흡수 계수, 열 전도도를 제외한 매질의 다른 특성 상수는 실험에 사용된 아크릴 계열 테이프 매질에 대해 측정한 값을 사용하였다. 즉, 질량 밀도, 비열, 굴절률 값으로  $\rho = 1010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c = 2270 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $n_r = 1.52$ 를 사용하였다.

## 제2절 열 및 광학 상수 결정 시뮬레이션

### 1. 측정 및 시뮬레이션 결과

그림 3.1는 레이저 빔 직경이  $\phi = 3.1 \text{ mm}$ 일 때의 적외선 카메라 측정 결과를 보여주고 있다. 그림 3.1(a)는 매질의 표면 중심부의 온도 상승치의 시변화에 대한 측정 결과이고, 그림 3.1(b)는 온도 상승치가 최대일 때의 온도 상승치 공간 분포 측정 결과이다. 최대 온도 상승치는  $10.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 이었으며, 온도 감쇠 시상수 값은  $0.701 \text{ s}$ 이었다.

그림 3.2(a)는 빔 직경이  $\phi = 3.1 \text{ mm}$ 일 때, 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있다. 레이저 펄스 입사 직후( $t = 8^+ \text{ ns}$ ) 온도가 최대로 상승하므로 최대 온도 상승치는 매질의 열 전도도와 무관하였다. 그림 3.2(a)는 최대 온도 상승치가 매질의 흡수 계수에 선형적으로 비례함을 보여주고 있다. 흡수 계수 값이  $\mu_a = 3.55 \text{ mm}^{-1}$ 일 때, 실험적으로 측정된 최대 온도 상승치( $10.3 \text{ }^\circ\text{C}$ )를 얻을 수 있었다.

그림 3.2(b)는 빔 직경이  $\phi = 3.1 \text{ mm}$ 일 때, 흡수 계수와 열 전도도 변화에 따른 온도 감쇠 시상수 값 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 흡수 계수와 열 전도도가 증가함에 따라 온도 감쇠 시상수가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 흡수 계수 값이  $\mu_a = 3.55 \text{ mm}^{-1}$ 이고 열 전도도 값이  $k = 0.229 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 일 때, 실험적으로 측정된 온도 감쇠 시상수 값( $0.701 \text{ s}$ )을 얻을 수 있었다.

위에서 결정한 흡수 계수( $\mu_a = 3.55 \text{ mm}^{-1}$ )와 열 전도도( $k = 0.229 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 3.3과 같다. 실험적으로 측정된 그림 3.1의 결과와 거의 일치하고 있다.

빔 직경이  $\phi = 3.1 \text{ mm}$ 인 경우에 대해 네 번의 실험을 추가적으로 수행하고, 다른 빔 직경( $\phi = 6.5, 7.6, 14.1 \text{ mm}$ )에 대해서도 각각 다섯 번의 실험을 수행하고 위에 서술한 바와 동일 분석을 수행하여 실험 결과를 재현하는 흡수 계수 값과 열 전도도 값을 추출하였다. 표 3.1과 표 3.2는 각각 흡수 계수 값과 열 전도

도 값 추출 결과를 보여주고 있다. 총 20회의 실험 결과로부터 흡수 계수는  $\mu_a = 3.70 \pm 0.52 \text{ mm}^{-1}$ , 열 전도도는  $k = 0.238 \pm 0.067 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 로 각각 결정할 수 있었다. 결정된 특성 상수 값들이 큰 오차를 갖고 있음을 알 수 있는데, 이는 실험에 사용된 아크릴 계열 테이프 매질은 광학적 용도로 제조된 것이 아니어서 매질 성분의 불균일성이 일반적인 광학 매질에 비해 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

최종적으로 결정된 흡수 계수 값( $\mu_a = 3.70 \text{ mm}^{-1}$ )과 열 전도도 값( $k = 0.238 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )을 사용하여 추가 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3.4(a)는 레이저 빔 직경 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있고, 그림 3.4(b)는 레이저 빔 직경 변화에 따른 온도 감쇠 시상수 값 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 비교를 위해 측정 데이터를 함께 도시하였는데, 오차 막대(error bar)는 측정 결과의 표준 편차(standard deviation)를 나타낸다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



## 2. 논의

열 확산에 의한 온도 감쇠는 다음 식과 같이 표현되는 특성 열 확산 시간 (characteristic thermal diffusion time)  $\tau_d$  정도의 시간 척도(time scale)를 갖고 있음이 알려져 있다.<sup>[11, 16]</sup>

$$\tau_d = \frac{\rho c}{k\mu_a^2} \quad (3.1)$$

레이저 펄스 폭  $\tau_p$ 가 특성 열 확산 시간  $\tau_d$  보다 매우 작은 경우, 열 확산에 의한 온도 변화는 무시할 만 하므로 레이저 펄스가 입사된 직후의 온도 상승치 분포는 흡수된 체적 에너지(또는 열) 분포  $W$ 에 의해 다음과 같이 결정된다.<sup>[17]</sup>

$$T = \frac{W}{\rho c} = \frac{Q_v \tau_p}{\rho c} = \frac{E_p}{\rho c} (1-R) \frac{2\mu_a}{\pi\omega^2} \exp(-\mu_a z) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (3.2)$$

최대 온도 상승치  $T_{\max}$ 는 매질 표면( $z=0$ ), 레이저 빔 중앙( $r=0$ ) 위치에서 발생하므로 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{\max} = 2 \frac{(1-R)}{\rho c} \frac{E_p}{\pi\omega^2} \mu_a \quad (3.3)$$

식 (3.3)은 최대 온도 상승치가 흡수 계수  $\mu_a$ 에 선형적으로 비례함을 보여주고 있다. 매질 표면의 반사율  $R$  또한 엄밀하게는 흡수 계수  $\mu_a$ 에 의존하는 값이지만, 본 논문에서 고려한 매질의 특성 상수 값 영역에서 반사율  $R$ 의 값은 흡수 계수  $\mu_a$  값 변화에 거의 영향을 받지 않았다.

온도 감쇠 시상수의 흡수 계수와 열 전도도에 대한 의존성에 대해 추가적인 연구를 수행하였다. 본 논문에서 다룬 빔 직경과 흡수 계수 값 영역에서 온도 감쇠 시상수  $\tau_{decay}$ 의 열 전도도에 대한 멱함수 의존성(power-law dependence)은

$\tau_{decay} \propto k^{-0.93 \sim -0.97}$ 이었다. 이 의존성은 특성 열 확산 시간  $\tau_d$ 의 열 전도도에 대한 멱함수 의존성( $\tau_d \propto k^{-1}$ )과 거의 일치하는 결과이다. 열 전달 방정식 식 (2.4)를 살펴보면, 온도의 시 변화율은 임의의 주어진 온도 공간 분포에 대해 열 전도도  $k$ 에 정비례함을 알 수 있다. 이 때문에 온도 감쇠 시상수와 특성 열 확산 시간이 열 전도도의  $-1$ 승에 비례하는 멱함수 의존성을 갖는 것으로 이해할 수 있다.

온도 감쇠 시상수의 흡수 계수에 대한 멱함수 의존성은 복잡한 경향을 보였다. 빔 직경이 증가함에 따라 멱함수 의존성은  $\tau_{decay} \propto \mu_a^{-1.1}$  ( $\phi = 3.1$  mm),  $\tau_{decay} \propto \mu_a^{-1.6}$  ( $\phi = 7.6$  mm),  $\tau_{decay} \propto \mu_a^{-1.8}$  ( $\phi = 14.1$  mm)로 변화하였다. 빔 직경이 커짐에 따라 멱함수 의존성은  $\tau_{decay} \propto \mu_a^{-2}$ 에 점진적으로 수렴하였다. 빔 직경이 매우 클 때 얻게 되는 이 멱함수 의존성은 특성 열 확산 시간  $\tau_d$ 의 흡수 계수에 대한 멱함수 의존성과 일치하는 결과이다. 매질 내의 광학적 에너지의 흡수와 관련된 특성 크기들(characteristic dimensions) 중 광의 침투 깊이인  $1/\mu_a$ 가 가장 작다는 가정 하에 특성 열 확산 시간에 대한 표현식 (3.1)을 구하였다. 빔 직경이 매우 커질 경우 특성 열 확산 시간에 대한 표현식 (3.1)을 구할 때의 가정이 만족되므로 온도 감쇠 시상수가 열 확산 시간과 동일한 멱함수 의존성 ( $\propto \mu_a^{-2}$ )을 갖게 된 것으로 이해할 수 있다. 빔 직경이 작을 경우, 열 확산은 깊이 방향뿐만 아니라 반경 방향으로도 발생하므로 온도 감쇠 시상수의 흡수 계수 의존성은 빔 직경에 따라 다른 값을 갖게 된다.

표 3.1 흡수 계수 값 추출 결과 (단위: mm<sup>-1</sup>)

	#1	#2	#3	#4	#5
$\phi = 3.1 \text{ mm}$	3.55	2.81	3.88	4.10	3.69
$\phi = 6.5 \text{ mm}$	3.74	4.21	3.75	4.29	4.22
$\phi = 7.6 \text{ mm}$	3.10	3.22	3.10	3.06	3.02
$\phi = 14.1 \text{ mm}$	4.06	4.55	4.47	3.62	3.61
Results	$\mu_a = 3.70 \pm 0.52 \text{ mm}^{-1}$ (average $\pm$ standard deviation)				

표 3.2 열 전도도 값 추출 결과 (단위:  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

	#1	#2	#3	#4	#5
$\phi = 3.1 \text{ mm}$	0.229	0.28	0.201	0.191	0.226
$\phi = 6.5 \text{ mm}$	0.260	0.206	0.167	0.224	0.209
$\phi = 7.6 \text{ mm}$	0.298	0.363	0.281	0.285	0.292
$\phi = 14.1 \text{ mm}$	0.217	0.185	0.103	0.375	0.167
Results	$k = 0.238 \pm 0.067 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (average $\pm$ standard deviation)				

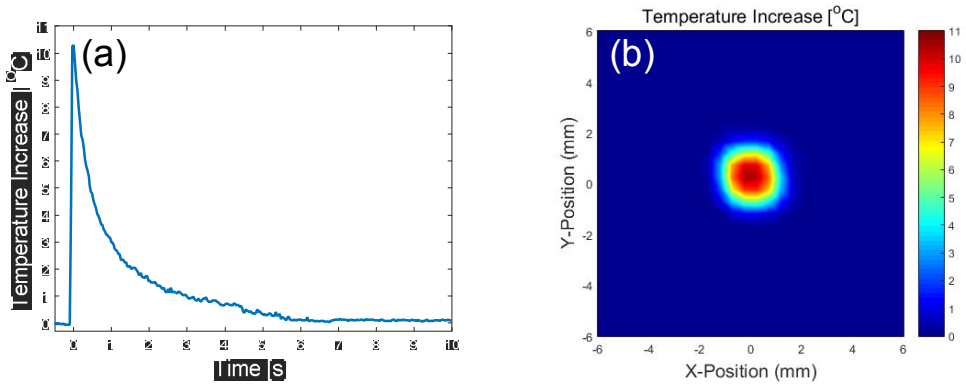


그림 3.1 레이저 빔 직경이  $\phi = 3.1 \text{ mm}$ 일 때의 적외선 카메라 측정 결과. (a) 매질의 표면 중심부의 온도 상승치의 시변화, (b) 온도 상승치가 최대일 때의 온도 상승치 공간 분포

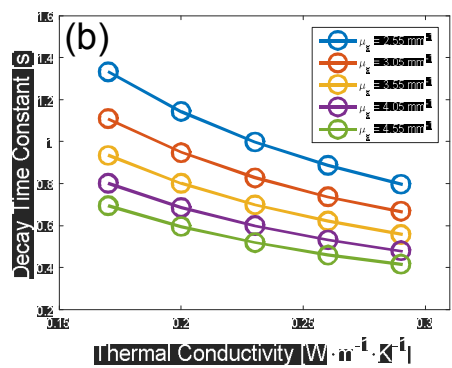
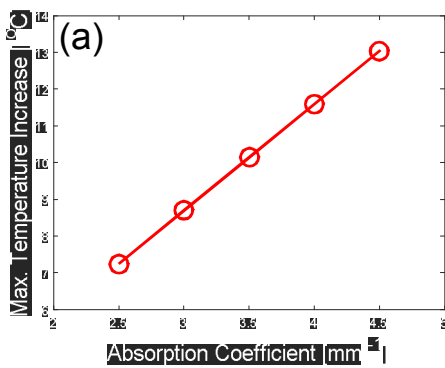


그림 3.2 레이저 빔 직경이  $\phi = 3.1 \text{ mm}$ 일 때, (a) 흡수 계수 변화에 따른 최대 온도 상승치 변화 시뮬레이션 결과, (b) 흡수 계수와 열 전도도 변화에 따른 온도 감쇠 시상수 값 변화 시뮬레이션 결과

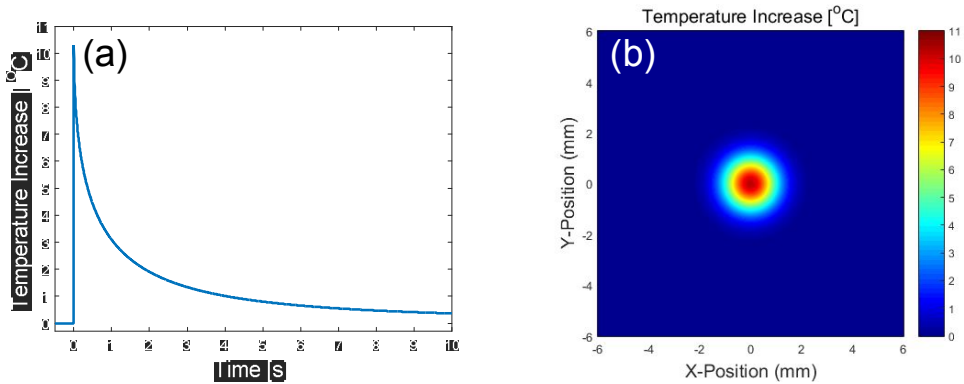


그림 3.3 레이저 빔 직경이  $\phi = 3.1$  mm일 때, 흡수 계수 및 열 전도도 추출 결과( $\mu_a = 3.55$  mm<sup>-1</sup>,  $k = 0.229$  W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과. (a) 매질의 표면 중심부의 온도 상승치의 시변화, (b) 온도 상승치가 최대일 때의 온도 상승치 공간 분포

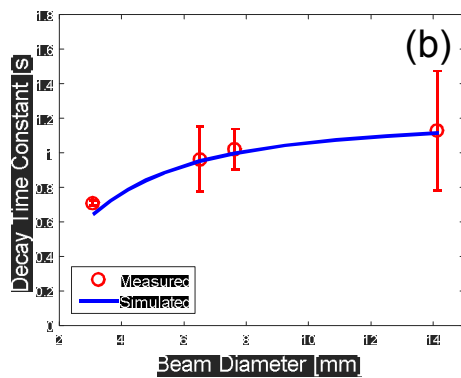
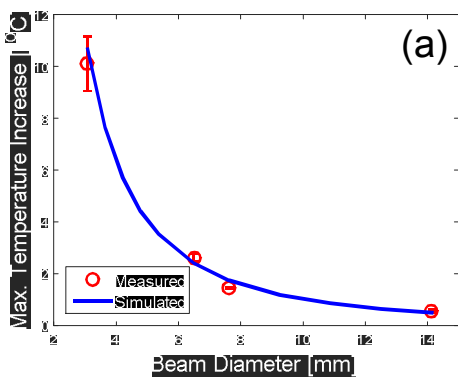


그림 3.4 레이저 빔 직경 변화에 따른 (a) 최대 온도 상승치 변화 시뮬레이션 결과, (b) 온도 감쇠 시상수 값 변화 시뮬레이션 결과



## 제4장 결 론

본 논문에서는 탄성 매질에서의 펄스 레이저 흡수로 인한 열 효과 및 구조 변형 해석에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 추가적으로 탄성 매질의 열 및 광학 특성 상수 결정 방법에 대해 제시하였다.

열 효과 시뮬레이션을 위해 열 및 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent(ANSYS Incorporated, USA)를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 탄성 매질은 두께 2.2 mm, 반경 15 mm의 원형 판 형태를 갖고 있다. 매질의 기하학적인 대칭성을 고려하여 축 대칭 해석(axisymmetric analysis)을 적용하였다. 탄성 매질의 구조 변형 시뮬레이션을 위해 구조 해석 소프트웨어인 ANSYS Mechanical(ANSYS Incorporated, USA)을 사용하였다. 온도 상승의 시공간적 분포인 ANSYS Fluent의 시뮬레이션 결과를 입력으로 사용하여 탄성 매질 후면 중심부의 변위(displacement)와 가속도(acceleration)에 대한 결과를 구하였다.

단일 펄스(펄스 폭 : 8 ns)가 입사될 경우, 펄스 레이저가 탄성 매질에 조사된 직후 매질 표면 중심점에서 최대 온도 상승을 보였으며, 시간이 지남에 따라 열 확산에 의해 점차적으로 온도가 감소하였다. 변위와 가속도의 경우, 레이저 펄스 에너지가 증가함에 따라 선형적으로 그 크기가 증가하였다. 반복 펄스가 입사될 경우, 펄스가 입사된 직후 급격한 온도 상승이 발생하였고 펄스와 펄스 사이의 시간에는 열 확산에 의해 온도가 서서히 감소하는 경향을 반복적으로 보였다. 변위의 경우 레이저 펄스가 입사할 때 마다 누적되어 증가하는 경향을 보였으나, 가속도의 경우 단일 펄스와 동일한 파형이 레이저 펄스가 입사할 때 마다 주기적으로 반복되는 양상을 보였다. 시뮬레이션 결과를 가속도 센서 측정 결과와 비교하였는데, 정성적으로 일치하는 경향을 보였다.

열 해석 시뮬레이션을 수행하면서 최대 온도 상승치는 매질의 흡수 계수에 의존하고 온도 감쇠 시상수(decay time constant)는 흡수 계수와 열 전도도에 의존함을 발견하였다. 이를 바탕으로 적외선 카메라를 사용하여 실험적으로 측정된 레이저 펄스 입사 후 매질의 온도 변화 데이터를 시뮬레이션 결과와 비교하여 매질의 흡수 계수와 열 전도도를 결정하였다.

본 논문의 연구 결과는 최근 활발하게 진행 중인 탄성 매질을 이용한 레이저 유도 축각 자극 발생 연구에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 시뮬레이션을 통해 탄성 매질에서의 펄스 레이저 흡수에 기인한 구조 변형을 정량적으로 예측할 수 있어 효과적인 축각 자극 발생을 위한 레이저 및 매질 파라미터 탐색 등의 후속 연구가 수행 중이다.

## [참고문헌]

- [1] 김병태, 레이저 공학 (상학당, 서울특별시, 대한민국, 2009).
- [2] E. Hecht, Optics (Addison-Wesley, New York, USA, 2002).
- [3] 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).
- [4] M. H. Niemz, Laser-Tissue Interactions (Springer, Heidelberg, Germany, 2004).
- [5] 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).
- [6] 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 by Using a Dual-wavelength Irradiation Method," *J. Korean Phys. Soc.* 67(12), 2146~2153 (2015).
- [7] J. Y. Kim, K. Jang, S. J. Yang, J. H. Baek, J. R. Park, D. I. Yeom, J. S. Kim, H. S. Kim, J. H. Jun, and S. C. Chung, "Simulation Study of the Thermal and the Thermoelastic Effects Induced by Pulsed Laser Absorption in Human Skin," *J. Korean Phys. Soc.* 68(8), 979~988 (2016).
- [8] H. Lee, J. S. Kim, S. Choi, J. H. Jun, J. R. Park, A. H. Kim, and S. C. Chung, "Mid-Air tactile stimulation using laser-induced thermoelastic effects: the first study for indirect radiation," In *World Haptics Conference-IEEE*, 374-380(2015).
- [9] H. Lee, J. S. Kim, J. Y. Kim, S. Choi, J. H. Jun, J. R. Park, A. H. Kim, H. B. Oh, J. H. Baek, S. J. Yang, H. S. Kim, and S. C. Chung, "Mid-air Tactile Stimulation Using Indirect Laser Radiation," accepted for publication in *IEEE*

Trans. Haptics.

- [10] 김승태, 김동진, 박국태, “점탄성 측정 실험 방법의 개발과 활용,” 한국현장과학교육학회, 현장과학교육 6(1), 23-32 (2012).
- [11] L. V. Wang, Biomedical Optics (John Wiley and Sons Inc, New Jersey, USA, 2007), pp. 1-133
- [12] 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," J. Neurosci. Methods, 223, 1-10 (2014)
- [13] D. Albagli, “Fundamental Mechanisms of Pulsed Laser Ablation of Biological Tissue,” Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA (1994).
- [14] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Theory of Elasticity (Pergamon Press, Oxford, UK, 1986).
- [15] 3M Technical Data, “3M VHB™ Tape Specialty Tapes”  
<http://multimedia.3m.com/mws/media/9866950/3m-vhb-tape-specialty-tapes.pdf>.
- [16] 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).
- [17] A. J. Welch and M. J. C. van Gemert (Eds.), Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue (Springer, Heidelberg, Germany, 2011).