



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](#)

2019년 2월
석사학위논문

레이저 간접자극의
매질 특성 의존성에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술험공학과

김승은

레이저 간접자극의
매질 특성 의존성에 관한 연구

**Study on the Dependence of Indirect Laser Tactile Stimulation
on Medium Properties**

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

김 승 은

레이저 간접자극의 매질 특성 의존성에 관한 연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 승 은

김승은의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 안태정 인

위원 조선대학교 교수 주기남 인

위원 조선대학교 교수 박종락 인

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 논문 구성	5
제2장 매질에서의 레이저 흡수와 열 및 기계적 효과 에 대한 이론	6
제1절 레이저 흡수	6
1. 가우시안 빔의 매질 내 흡수	6
2. 펄스 레이저 흡수에 의한 열 발생률의 계산	7
제2절 열 효과	10
1. 열 전달 방정식	10
2. 열 효과에 대한 시뮬레이션	11
제3절 기계적 효과	14
1. 열탄성 파동 방정식	14
2. 기계적 효과에 대한 시뮬레이션	14

제3장 레이저 간접자극의 매질 특성 의존성	18
제1절 레이저 간접자극 시뮬레이션을 위한 기본 파라미터	18
제2절 열 효과 및 기계적 효과 시뮬레이션	23
1. 매질 특성 파라미터의 변화에 따른 온도 상승 최대치	23
2. 매질 특성 파라미터의 변화에 따른 발생 가속도 최대치	36
제3절 효과적인 레이저 간접자극 유도를 위한 매질 특성 파라미터 영역 결정	54
제4장 결 론	57
[참고문헌]	58

표 목차

표 2.1 열 발생률 계산에 사용되는 물리량	8
표 2.2 열 해석 시뮬레이션에 사용되는 물리량	12
표 2.3 열탄성 과동 방정식에 사용되는 물리량	16
표 3.1 시뮬레이션에서 사용한 광흡수성 탄성 매질의 기본 특성 파라미터	20
표 3.2 레이저 간접자극의 매질 특성 의존성에 관한 시뮬레이션을 위해 사용한 레이저 파라미터와 매질의 크기	21
표 3.3 흡수 계수 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과	26
표 3.4 밀도 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과	27
표 3.5 비열 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과	28
표 3.6 흡수 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과	39
표 3.7 밀도 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과	40
표 3.8 비열 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과	41
표 3.9 열팽창 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과	42
표 3.10 영률 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과	43
표 3.11 효과적인 레이저 간접자극 유도를 위한 매질 특성 파라미터 영역	56

그림 목차

그림 2.1 $\phi = 5 \text{ mm}$, $E = 50 \text{ mJ}$, $\tau = 8 \text{ ns}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, $n_r = 1.52$, $\alpha = 3 \text{ mm}^{-1}$ 일 때의 열 발생률 계산 결과	9
그림 2.2 ANSYS Fluent 시뮬레이션 레이아웃	13
그림 2.3 ANSYS Mechanical 시뮬레이션 레이아웃	17
그림 3.1 가속도 최대치 측정 결과와 선형 열팽창 계수가 $\beta/3 = 4.15 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과	22
그림 3.2 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션 결 과(흡수 계수 α : (a) 1.0, (b) 3.4, (c) 10.0, (d) 50.0 mm^{-1})	29
그림 3.3 흡수 계수 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	30
그림 3.4 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션 결 과(밀도 ρ : (a) 100, (b) 300, (c) 500, (d) 700, (e) 900, (f) 1100, (g) 1300, (h) 1500 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	31
그림 3.5 밀도 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	32
그림 3.6 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션 결 과(비열 C : (a) 100, (b) 400, (c) 700, (d) 1000, (e) 2000, (f) 3000, (g) 4000 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	33
그림 3.7 비열 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	34
그림 3.8 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션 결 과(표 3.1의 기본 특성 파라미터 사용)	35
그림 3.9 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결 과(흡수 계수 α : (a) 0.1, (b) 0.5, (c) 1.0, (d) 2.0, (e) 3.0, (f) 4.0, (g) 5.0, (h) 10.0, (i) 20.0, (j) 30.0 mm^{-1})	44
그림 3.10 흡수 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함	

	수 곡선 맞춤 결과	45
그림 3.11	매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(밀도 ρ : (a) 500, (b) 700, (c) 900, (d) 1100, (e) 1500, (f) 3000, (g) 5000, (h) 7000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	46
그림 3.12	밀도 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	47
그림 3.13	매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(비열 C : (a) 1000, (b) 2000, (c) 3000, (d) 4000, (e) 8000, (f) 12000, (g) 16000 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	48
그림 3.14	비열 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	49
그림 3.15	매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(열팽창 계수 $\beta/3$: (a) 0.5×10^{-4} , (b) 1.0×10^{-4} , (c) 2.0×10^{-4} , (d) 3.0×10^{-4} , (e) 4.0×10^{-4} , (f) 5.0×10^{-4} K^{-1})	50
그림 3.16	열팽창 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	51
그림 3.17	매질 후면 중심점에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(영률 E : (a) 0.05, (b) 0.1, (c) 0.5, (d) 1.0, (e) 3.0, (f) 5.0, (g) 10.0, (h) 20.0, (i) 25.0, (j) 30.0, (k) 35.0, (l) 40.0 MPa)	52
그림 3.18	영률 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과	53

ABSTRACT

Study on the Dependence of Indirect Laser Tactile Stimulation on Medium Properties

By Seung-Eun Kim

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, the dependence of an indirect laser tactile stimulation method on medium properties was investigated. The indirect laser tactile stimulation method is a technique with which tactile sensations are evoked by irradiating laser pulses on a light-absorbing elastic medium attached on human skin. The characteristic medium properties considered in this study include absorption coefficient, density, specific heat, thermal expansion coefficient, Young's modulus, refractive index, Poisson's ratio and thermal conductivity. First, heat effect simulations were performed using the heat transfer equation and temperature change was evaluated. Subsequently, mechanical effect simulations were performed using the thermoelastic wave equation and medium deformation was evaluated. Commercially available simulation tools for thermal and mechanical effects, ANSYS Fluent and ANSYS Mechanical (ANSYS Incorporated, USA) respectively, were employed for the simulations.

The wavelength, pulse width, pulse energy and beam diameter ($1/e$) of the laser system used for the stimulations were assumed to be 532 nm, 8 ns, 50 mJ and 5 mm, respectively. The diameter and thickness of the elastic medium were set to be 30 mm and 2.2 mm, respectively. The dependences of the maximum increase in

temperature and the maximum acceleration on the medium properties were investigated based on the simulation results of the thermal and mechanical effects. The effects of refractive index, Poisson's ratio and thermal conductivity on the temperature and the acceleration changes were negligible. The damage threshold of the medium and the perception threshold of the tactile sensations were studied through literature search. It was assumed that the damage threshold of the medium was determined by the maximum increase in temperature and the ultimate tensile stress, and the perception threshold of the tactile sensations by the maximum acceleration. By analysing the dependences of the maximum increase in temperature and the maximum acceleration on the medium properties and the information of the damage and the perception threshold, the range of each characteristic property (upper and lower limits) in which the tactile sensations would be effectively evoked without inducing any medium damage was determined.

Currently, acrylic polymer tapes are being used as the light-absorbing elastic medium for laser indirect stimulation. It is expected that the results of this study would provide useful information for the development of or the search for a new medium that can be utilized for laser indirect stimulation.

제1장 서론

제1절 연구 배경

“Laser Amplification by Stimulated Emission of Radiation”의 약자인 레이저(Laser)는 1960년 T. H. Maiman에 의해 처음 보고되었다.^[1] 이후 다양한 종류의 고체, 액체, 기체 및 자유전자, 금속증기 등의 레이저 매질과 큐-스위칭(Q-switching), 모드잠금(Mode Locking), 처프펄스증폭(Chirped Pulse Amplification, CPA) 등의 출력 향상 기술이 개발되었다.^[2] 현재, 레이저는 정보처리학, 의학, 물리학 등의 수많은 학문 분야에 매우 유용하게 활용되고 있으며, 과학 기술의 발전뿐만 아니라 인간 삶의 질 향상에 지대한 기여를 하고 있다.^[3, 4]

레이저와 물질 사이의 상호작용, 특히 생체조직과의 상호작용에 대한 연구가 활발히 수행되었다.^[3] 레이저와 생체조직과의 상호작용 시간 폭, 즉 레이저의 펄스 폭이 감소함에 따라 광화학적 상호작용(Photochemical Interaction), 열적 상호작용(Thermal Interaction), 광 제거(Photoablation), 플라즈마유도 제거(Plasma-induced Ablation), 광 파괴(Photodisruption) 등의 현상이 순차적으로 발생하게 된다. 광화학적 상호작용은 일반적으로 레이저와 생체조직과의 직접적인 상호작용이 아니라 레이저와 생체조직 내에 주입된 광감작제(Photosensitizer)와의 상호작용을 의미하며, 광역동 치료법(Photodynamic Therapy)에 활용되고 있다. 열적 상호작용은 레이저의 생체조직 내 흡수에 의한 온도 상승에 기인하는 현상으로, 온도가 상승함에 따라 응고(Coagulation), 기화(Vaporization), 탄화(Carbonization), 용융(Melting) 등의 현상이 차례대로 발생한다. 광 제거는 주로 고 광자에너지를 갖는 자외선 레이저를 생체조직에 조사하여 분자 결합을 끊음으로써 발생하는 현상으로 라식, 라섹 등 시력교정 수술에 활용되고 있다. 플라즈마유도 제거는 플라즈마 생성을 통해 열 효과나 기계적 손상 없이 생체조직이 제거되는 현상으로 충치 제거 등에 활용될 수 있다. 광 파괴는 레이저에 의해 발생한 충격파를 이용해 생체조직이 파쇄되거나 절단되는 현상으로, 레이저를 이용해 신장결석이나 요로결석을 제거하는 기술인 레이저 쇄석술에 활용되고 있다.

최근, 펄스 레이저를 피부조직에 직접 조사하여 촉각자극을 유도하고자 하는 레이저 직접자극 기술에 대한 연구가 활발히 수행되었다.^[5-10] 참고문헌 [5]에서는 레이저를 사용하는 비접촉식 햅틱 자극 기술을 처음으로 제안하였다. 물리적, 인지적 연구를 수행하여 레이저 유도 열탄성 효과(Laser-induced Thermoelastic Effects)에 의해 촉각 자극이 발생할 수 있음을 보였다. 또한, 피험자 뇌파(Electroencephalogram, EEG) 연구를 통해 레이저 자극에 대한 피험자들의 뇌 반응이 통상적인 기계적 자극에 대한 것과 매우 유사함을 확인하였다.^[5] 참고문헌 [6]에서는 레이저 에너지 밀도를 다르게 하여 수행된 인지 실험을 통해 레이저에 의한 촉각 자극 응답 특성을 조사하였으며, 레이저 에너지 밀도가 증가할수록 피험자의 인지율 또한 증가함을 확인하였다.^[6] 참고문헌 [7]에서는 열 효과의 변화 없이 레이저에 의한 피부 조직의 변형을 연속적으로 제어할 수 있는 방법인 이중 파장 조사법을 제안하였다.^[7] 참고문헌 [8]에서는 피부 조직에 펄스 레이저가 흡수될 때 발생하는 열 및 열탄성 효과에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 레이저 직접자극에 의한 온도 변화, 스트레스파(Stress Wave)의 발생 및 전파, 피부 변형 등에 대해 상세히 분석하였다.^[8] 참고문헌 [9]에서는 제1형 콜라겐을 피부 조직 팬텀(Tissue Phantom)으로 사용하여 레이저 직접자극에 대한 다양한 실험을 수행하였으며, 레이저 파라미터의 조절을 통해 열탄성 효과의 크기를 제어할 수 있음을 보였다.^[9] 참고문헌 [10]에서는 레이저의 펄스 에너지, 빔 직경, 펄스 반복률을 변화시키며 피험자의 인지 특성을 조사하였는데, 빔 직경이 작아질수록, 펄스 반복률이 증가할수록 촉각 자극에 대한 인지율이 증가하였다.^[10]

그러나, 레이저 직접자극의 경우 피험자별 인지의 개인차가 항상 존재하였다. 참고문헌 [5]의 연구 결과에 따르면 동일한 레이저 파라미터 조건에서 과반수 이상(56.3%)의 피험자가 통증이 없는 촉각 자극을 느꼈다고 응답하였으나, 12.3%의 피험자는 통증을 동반한 촉각 자극을, 나머지 31.4%는 아무런 자극을 느끼지 못했다고 응답하였다. 통증이 없는 촉각 자극, 통증을 동반한 촉각 자극 응답을 기계적, 전기적, 열적 자극으로 그 종류를 분류하면 각각 75.0%, 21.4%, 3.6%의 응답률을 나타내었다. 기계적 자극을 좀 더 세분하였을 때, 가볍게 건드리는 느낌(14.3%), 누르는 느낌(6.3%), 통증이 없는 찌르는 느낌(36.5%), 통증을 동반한 찌르는 느낌(28.6%), 퍼지는 느낌(14.3%)으로 분류되었다.^[5] 참고문헌 [10]에서도

동일한 레이저 파라미터 조건에서 무감각(24%), 진동(3%), 뜨거움(16.5%), 따끔함(51.5%), 통증(5%) 등 다양한 피험자 응답을 보고하였다.^[10] 이러한 레이저 직접 자극의 단점을 보완하기 위한 방안으로 피부 조직 위에 부착된 흡수 매질에 레이저를 조사하여 촉각 자극을 유도하는 레이저 간접자극 기술이 제안되어 활발히 연구되고 있다.^[11-15]

참고문헌 [11]에서는 피부 조직에 부착된 광흡수성 탄성 매질에 레이저를 조사하여 기계적 촉각 자극을 이끌어낼 수 있음을 최초로 제안하였으며, 유도된 촉각 자극은 개인차가 거의 없는 짧은 기계적 두드림(Short Mechanical Tap)과 유사한 느낌이었다.^[11] 참고문헌 [12]에서는 레이저 간접자극 기술에 대한 시뮬레이션을 통해 광흡수성 탄성 매질에서의 국소적 레이저 흡수에 의한 스트레스트와의 발생, 굽힘 응력(Bending Stress)의 생성, 탄성 매질의 변형 및 떨림 등의 일련의 현상을 통해 촉각 자극이 유도될 수 있음을 보였다.^[12] 참고문헌 [13]에서는 적외선 온도 측정법(Infrared Thermometry)과 열해석 시뮬레이션 결과를 비교하여 간접자극 기술에 사용되는 광흡수성 탄성 매질의 흡수 계수와 같은 광학적 특성 상수와 열 전도도와 같은 열적 특성 상수를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.^[13] 참고문헌 [14]에서는 레이저 간접자극 기술에 기반한 새로운 형태의 공중 촉각 디스플레이(Mid-air Tactile Display)를 소개하고 있다. LaserStroke으로 명명된 이 디스플레이는 손목에 부착된 자기 트래커(Magnetic Tracker)와 방향 제어가 가능한 레이저 시스템을 사용하여 피험자가 원거리에서 자유롭게 손을 움직이는 동안에도 손바닥에 두드리거나 때리는 듯한 느낌(Tapping and Stroking Sensations)을 전달할 수 있다.^[14] 참고문헌 [15]에서는 참고문헌 [14]에서 소개된 LaserStroke의 성능을 향상시켜 피부 위의 특정 윤곽선을 따라 연속적으로 이동하며 촉각 자극을 전달할 수 있는 기술을 개발하고 이를 시연하였다.^[15]

레이저 직접 및 간접자극 기술은 압력 또는 진동 등의 촉각을 통해 정보를 전달하는 햅틱스(Haptics) 기술에 적용될 수 있다.^[16] 햅틱스 기술은 인간과 컴퓨터가 쉽고 편하게 상호작용할 수 있도록 하는 HCI(Human Computer Interaction) 시스템과 인간과 기계 사이의 조작 편의성 및 안전성을 극대화한 HMI(Human Machine Interface) 시스템 등에 응용된다.^[17] 햅틱스 시장 규모는 급속히 성장하고 있다. 해외시장조사업체 아이디테크엑스(IDTechEx)의 조사에 따르면 2018년도 햅

틱스의 글로벌 시장 규모는 약 1,800백만 달러로 예상되며, 2022년도에는 약 2,600백만 달러로 성장할 것으로 전망된다.^[18]

본 논문에서는 광흡수성 탄성 매질의 특성이 레이저 간접자극에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 시뮬레이션을 통해 탄성 매질의 특성 파라미터인 흡수 계수, 밀도, 영률, 포아송비, 비열, 열팽창 계수, 열 전도도를 변화시키며 매질의 온도 상승 및 발생 가속도 최대치를 구하였다. 매질 손상 및 체성감각 인지 임계치 등의 정보를 활용하여 매질의 손상이 발생하지 않으면서도 효과적인 체성감각을 유도할 수 있는 매질 특성 파라미터의 영역을 결정하였다.

매질 손상 및 체성감각 인지 임계치는 문헌 조사와 시뮬레이션을 통해 정보를 획득하였다. 매질의 온도 상승에 탄성 매질의 특성 파라미터가 미치는 영향을 조사하기 위해 열 전달 방정식(Heat Transfer Equation)에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 매질의 변형(가속도)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열탄성 파동 방정식(Thermoelastic Wave Equation)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

제2절 논문 구성

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 광흡수성 탄성 매질에서의 레이저 흡수와 열 및 기계적 효과에 대한 이론을 소개하였다. 제2장 1절에서는 가우시안 빔의 매질 내 흡수와 레이저 흡수에 의한 열 발생률의 계산 방법에 대해 설명하였다. 제2장 2절에서는 열 전달 방정식과 경계 조건 설정 등의 열 효과 시뮬레이션 방법을 정리하였고, 제2장 3절에서는 열탄성 파동 방정식을 이용한 기계적 효과 시뮬레이션 방법에 대해 기술하였다.

제3장에서는 레이저 간접자극의 매질 특성 의존성에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 먼저, 제3장 1절에서는 문헌조사와 시뮬레이션 결과를 바탕으로 레이저 간접자극의 피험자 인지 및 매질 손상 문턱치에 대해 정리하였다. 그런 다음, 제3장 2절에서는 매질의 특성 파라미터 변화에 따른 온도 변화 및 매질 변형 시뮬레이션 결과를 정리하였고, 이 결과를 바탕으로 온도 상승과 발생 가속도 최대치의 특성 파라미터 의존성을 제시하였다. 마지막으로 제3장 3절에서는 1절과 2절의 결과를 기반으로 효과적인 레이저 간접자극 유도를 위한 매질 특성 파라미터들의 영역을 결정하였다.

제4장에서는 본 논문의 연구 결과를 요약하여 정리하였다.

제2장 매질에서의 레이저 흡수와 열 및 기계적 효과에 대한 이론

제1절 레이저 흡수

1. 가우시안 빔의 매질 내 흡수

빔 반경($1/e^2$ 기준) ω 를 갖고 있는 가우시안 빔(Gaussian Beam)의 진행 방향(z 축)에 수직인 평면(xy 평면, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$)에서의 규격화된 공간분포는 다음과 같이 주어진다.^[2]

$$I(r) = \frac{2}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (2.1)$$

매질 내에서의 흡수 계수가 α , 공기와 매질 경계면에서의 반사율이 R , 레이저 펄스 에너지가 E_p , 레이저 펄스 폭이 τ 일 때, 가우시안 형태의 횡공간분포를 갖고 있는 레이저가 매질 내부에 흡수되어 발생하는 열 발생률(Heat Generation Rate) $q(r, z)$ 는 다음 식을 이용해 계산할 수 있다.^[19]

$$q(r, z) = \alpha (1 - R) \frac{E_p}{\tau} \frac{2}{\pi\omega^2} \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (2.2)$$

$1/e$ 기준 반경은 $\omega/\sqrt{2}$ 이며, 직경은 반경의 2배이기 때문에, 가우시안 빔의 $1/e^2$ 기준 반경 ω 는 본 논문에서 사용하는 $1/e$ 기준 직경 ϕ 와 다음의 관계를 만족한다.

$$\phi = \sqrt{2}\omega \quad (2.3)$$

공기와 매질(굴절률 실수부: n_r , 굴절률 허수부: n_i) 경계면에서의 반사율 R 은 다음과 같이 표현된다.^[4]

$$R = \left| \frac{(n_r - in_i) - 1}{(n_r - in_i) + 1} \right|^2 \quad (2.4)$$

매질의 굴절률 허수부는 소멸 계수(Extinction Coefficient)라고도 한다. 흡수 계수 α 는 소멸 계수가 n_i , 레이저의 파장이 λ 일 때 다음과 같은 관계를 만족한다.^[4]

$$\alpha = \frac{\lambda n_i}{4\pi} \quad (2.5)$$

본 절에서 소개한 여러 물리량들을 표 2.1에 정리하였다.

2. 펄스 레이저 흡수에 의한 열 발생률의 계산

펄스 레이저의 매질 내부 흡수에 의해 발생하는 열 발생률 $q(r,z)$ 를 계산하기 위하여 Matlab 코드를 작성하였다. 예를 들어, 빔 직경 ϕ 는 5 mm, 레이저 펄스 에너지 E_p 는 50 mJ, 레이저 펄스 폭 τ 는 8 ns, 레이저 파장 λ 는 532 nm, 굴절률 실수부 n_r 은 1.52, 흡수 계수 α 는 3 mm⁻¹일 때의 열 발생률 $q(r,z)$ 계산 결과는 그림 2.1과 같다. Matlab 코드를 사용하여 계산한 열 발생률 결과는 열 효과 시뮬레이션을 위한 입력 데이터로 사용된다.

표 2.1 열 발생률 계산에 사용되는 물리량

Symbol	Description
ω	$1/e^2$ Gaussian Beam Radius
ϕ	$1/e$ Gaussian Beam Diameter, $\phi = \sqrt{2}\omega$
α	Absorption Coefficient
R	Reflectance at the Boundary between Air and Medium
E_p	Laser Pulse Energy
τ	Laser Pulse Width
n_r	Real Part of Refractive Index
n_i	Imaginary Part of Refractive Index, Extinction Coefficient
λ	Laser Wavelength

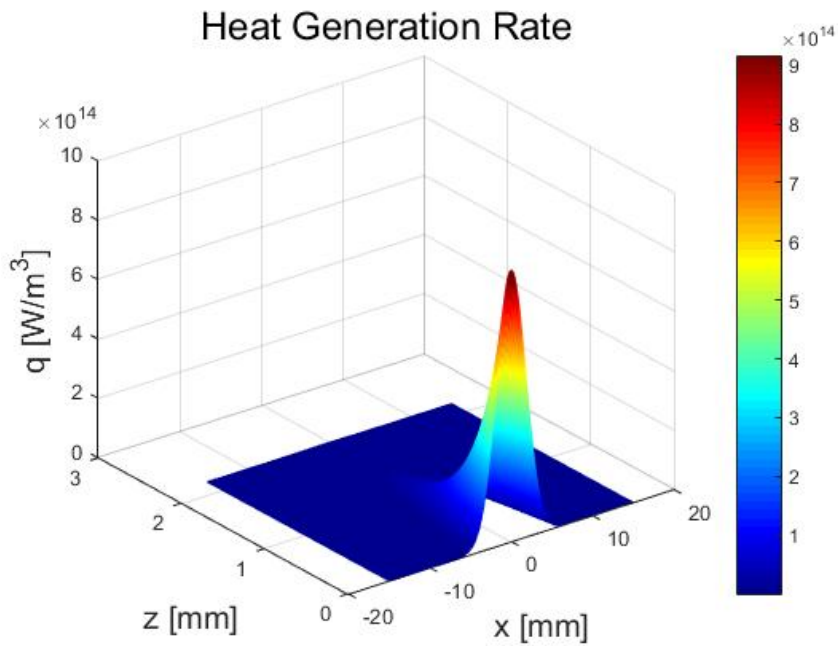


그림 2.1 $\phi = 5 \text{ mm}$, $E = 50 \text{ mJ}$, $\tau = 8 \text{ ns}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, $n_r = 1.52$,
 $\alpha = 3 \text{ mm}^{-1}$ 일 때의 열 발생률 계산 결과

제2절 열 효과

1. 열 전달 방정식

열에너지는 한 지점에서 다른 지점으로 전달될 수 있다. 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation) 등의 현상에 의해 열은 이동되며, 일반적으로 더 높은 온도에서 낮은 온도로 전달된다. 레이저 빔이 매질에 흡수되면 열에너지로 변환되어 흡수된 부분의 매질 온도가 상승하게 되며, 주변으로 열이 이동하여 온도 변화가 발생하게 된다. 매질 내에서의 온도 분포 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 다음과 같은 식으로 표현되는 열 전달 방정식(Heat Transfer Equation)을 사용하였다.^[20]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = q \quad (2.6)$$

식 (2.6)에서 ρ , C , T , k 는 각각 밀도, 비열, 온도 분포, 열 전도도를 의미한다.

매질 사이의 경계 조건에는 특정 표면 온도(Specified Surface Temperature), 특정 표면 열 유속(Specified Surface Heat Flux), 표면 대류(Surface Convection) 등이 있으며,^[20] 본 논문에서는 매질과 공기 경계면에 표면 대류 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표면 대류 조건에서는 다음의 식을 사용하여 매질과 공기 경계면에서의 온도 변화를 계산한다.^[20]

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

식 (2.7)에서 h 는 열 전달 계수(Heat Transfer Coefficient)를 의미하며, T_{air} 는 매질과의 경계면으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 공기 온도를 의미한다. 본 절에서 소개한 여러 물리량들을 표 2.2에 정리하였다.

2. 열 효과에 대한 시뮬레이션

본 논문에서는 열 및 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent(ANSYS Incorporated, USA)를 사용하여 열 효과에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 서술한 바와 같이 Matlab 코드를 사용하여 계산한 펄스 레이저 흡수에 의한 열 발생률 결과를 입력으로 사용하였다. 매질은 지름 30 mm, 두께 2.2 mm를 갖는 원판의 형태이며, 문제의 대칭성(Cylindrical Symmetry)에 근거하여 축 대칭 해석(Axisymmetric Analysis)을 수행하였다. 대칭축(Symmetric Axis)을 제외한 모든 면에 표면 대류 조건을 지정하였는데, 열 전달 계수 h 는 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, T_{air} 는 298 K로 설정하였다.^[21] 그림 2.2는 열 효과 해석에 사용된 ANSYS Fluent의 시뮬레이션 레이아웃을 보여주고 있다.

표 2.2 열 해석 시뮬레이션에 사용되는 물리량

Symbol	Description	Units
ρ	Mass Density	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
C	Specific Heat	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
T	Temperature Increase Distribution	K or $^{\circ}\text{C}$
k	Thermal Conductivity	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
q	Heat Generation Rate	$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
h	Heat Transfer Coefficient	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

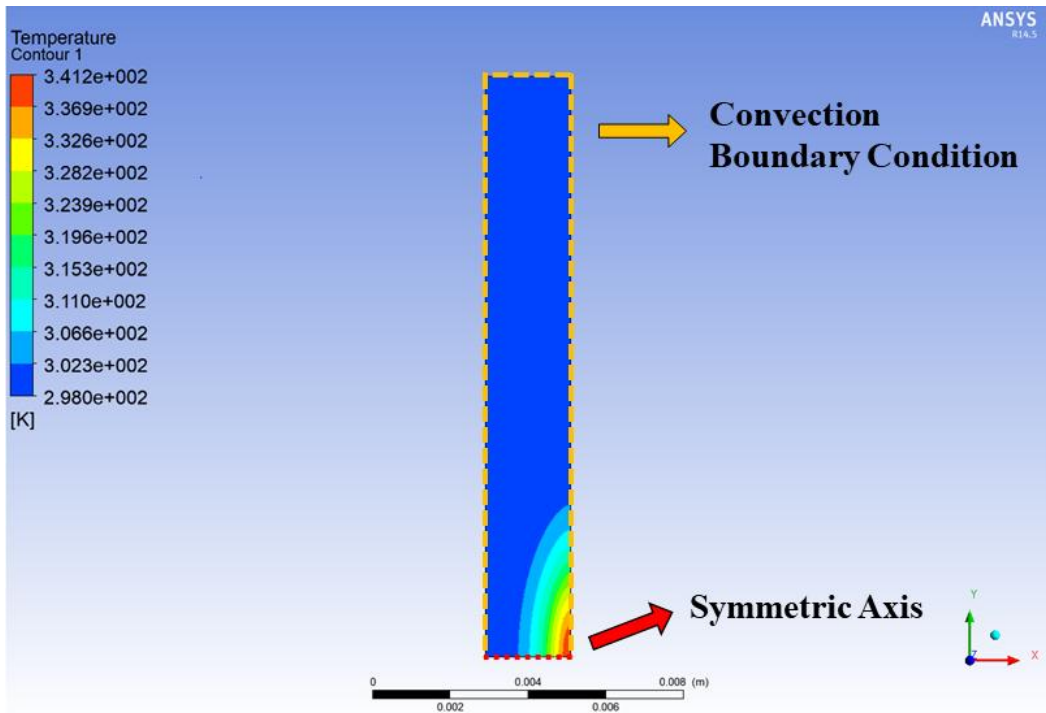


그림 2.2 ANSYS Fluent 시뮬레이션 레이아웃

제3절 기계적 효과

1. 열탄성 파동 방정식

펄스 레이저가 매질에 흡수되어 형성된 국소적으로 상승한 형태의 비균일한 온도 분포의 구배(Gradient) ∇T 가 구동 항(Driving Term)으로 작용하여 매질의 변형이 발생하게 되는데, 이를 수식적으로 표현한 것이 다음과 같이 표현되는 열탄성 파동 방정식(Thermoelastic Wave Equation)이다.^[22, 23]

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \frac{E}{2(1+\nu)} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) = -\frac{E\beta}{3(1-2\nu)} \nabla T \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서 \mathbf{u} 는 변위 벡터, E 는 영률, ν 는 포아송비, β 는 체적 열팽창 계수를 의미한다. 열탄성 파동 방정식에 사용된 물리량들을 표 2.3에 정리하였다.

기계적 효과와 관련된 시뮬레이션에서 사용하는 매질 사이의 경계 조건에는 고정 경계 조건(Fixed Boundary Condition), 자유 경계 조건(Free Boundary Condition) 등이 있다.^[22] 본 논문의 기계적 효과 시뮬레이션에서는 원판 형태의 광흡수성 탄성 매질이 환형(외경: 30 mm, 내경: 26 mm, 두께: 2 mm)의 광학 마운트(Annular Optical Mount)에 부착되어 있는 것으로 가정하였다.

2. 기계적 효과에 대한 시뮬레이션

본 논문에서는 구조 해석 소프트웨어인 ANSYS Mechanical(ANSYS Incorporated, USA)를 사용하여 기계적 효과에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. ANSYS Fluent를 사용하여 계산한 온도의 시공간 분포 $T(r,t)$ 를 입력으로 사용하였다. 이 경우에도 문제의 대칭성에 근거하여 축 대칭 해석을 수행하였다. 광학 마운트에는 고정 경계 조건을, 광학 마운트와 매질이 접하는 2 mm 영역은 ANSYS Mechanical의 접합 조건(Bonded Condition)을 지정하였다. 대칭축을 제외

한 매질과 공기가 접하는 나머지 부분은 자유 경계 조건을 지정하였다. 그림 2.3은 기계적 효과 해석에 사용된 ANSYS Mechanical의 시뮬레이션 레이아웃을 보여주고 있다.

표 2.3 열탄성 파동 방정식에 사용되는 물리량

Symbol	Value	Units
u	Displacement	nm
E	Young's Modulus	MPa
ν	Poisson's Ratio	-
β	Volumetric Thermal Expansion Coefficient	K^{-1}

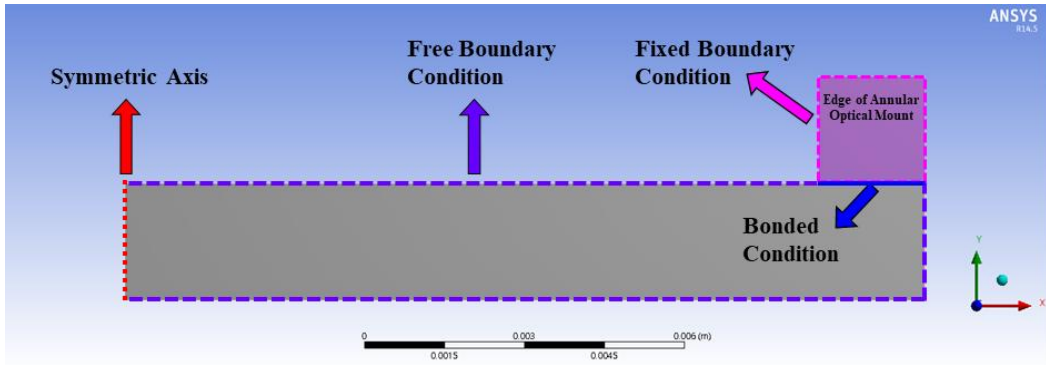


그림 2.3 ANSYS Mechanical 시뮬레이션 레이아웃

제3장 레이저 간접자극의 매질 특성 의존성

제1절 레이저 간접자극 시뮬레이션을 위한 기본 파라미터

본 절에서는 열 및 기계적 효과에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 사용한 탄성 매질의 기본 특성 파라미터들과 레이저의 조사 조건에 대해 소개하고자 한다. 표 3.1은 시뮬레이션에서 기본적으로 사용한 광흡수성 탄성 매질의 특성 파라미터들을 보여주고 있다. 현재, 대부분의 레이저 간접자극 실험에서는 아크릴 계열 테이프 매질^[24]을 광흡수성 탄성 매질로 사용하고 있다. 영률, 밀도, 비열, 열 전도도, 흡수 계수, 굴절률은 실험에 사용되고 있는 아크릴 계열 테이프 매질에 대해 직접 측정하여 얻은 값이며, 포아송비는 참고문헌 [24]에 보고된 값이다. 열팽창 계수는 최대 가속도 측정 결과에 시뮬레이션 결과를 피팅하여 얻어낸 값이다. 가속도 측정 실험에 사용된 매질은 지름 30 mm, 두께 2.2 mm이었다. 환형 광학 마운트에 가장자리를 고정시켰으며, 중심부 후면에 가속도 센서(352C23, PCB PIEZOTRONICS)를 부착하였다. 532 nm 파장의 주파수 배가된 Q-switched Nd:YAG 레이저(Centurion+, Quantel)를 사용하였으며, 펄스 폭은 8 ns, $1/e^2$ 기준 빔 반경은 3.95 mm이었다. 그림 3.1은 레이저 펄스 에너지 변화에 따른 최대 가속도 변화에 대한 측정 결과와 선형 열팽창 계수가 $\beta/3 = 4.15 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 일 때의 시뮬레이션 결과를 함께 보여주고 있다. 두 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

참고문헌 [25]에서는 인체 각 부위의 두점 식별력(Two-point Discrimination)에 대해 정리하여 보고하고 있다.^[25] 손끝의 경우 2~8 mm, 입술의 경우 2~4 mm, 손바닥의 경우 8~12 mm, 정강이 또는 등의 경우 30~40 mm로 보고되고 있는데, 본 논문에서는 손 끝에 대해 보고된 두점 식별력 값의 평균인 5 mm를 시뮬레이션을 위한 $1/e$ 기준 빔 직경으로 선정하였다. 레이저 간접자극에 사용될 수 있는 소형의 이동가능한 일반적인 ns 레이저의 펄스 에너지는 대략 1~100 mJ이다. 이러한 사실에 기반하여 그 평균값인 50 mJ을 시뮬레이션을 위한 레이저 펄

스 에너지 값으로 선정하였다. 또한, 레이저 간접자극 실험에 일반적으로 사용되고 있는 원판 형태(지름 30 mm, 두께 2.2 mm)의 매질에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3.2는 본 논문에서 시뮬레이션을 위해 사용한 레이저 파라미터와 매질의 크기에 대한 정보를 보여주고 있다.

표 3.1 시뮬레이션에서 사용한 광흡수성 탄성 매질의 기본 특성 파라미터

Parameter	Value	Remark
Young's Modulus E	26.05 MPa	Measured
Density ρ	1014 kg·m ⁻³	Measured
Specific Heat C	2269 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Measured
Thermal Conductivity k	0.3073 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Measured
Absorption Coefficient α	3.4365 mm ⁻¹	Measured
Index of Refraction n_r	1.52	Measured
Poisson's Ratio ν	0.49	Ref. [24]
Thermal Expansion Coefficient $\beta/3$	4.15×10 ⁻⁴ K ⁻¹	Fitted

표 3.2 레이저 간접자극의 매질 특성 의존성에 관한 시뮬레이션을 위해 사용한 레이저 파라미터와 매질의 크기

Parameter		Value
Laser	Wavelength λ	532 nm
	Pulse Energy E_p	50 mJ
	Pulse Width τ	8.0 ns
	Beam Diameter ϕ	5.0 mm
Medium	Diameter	30 mm
	Thickness	2.2 mm

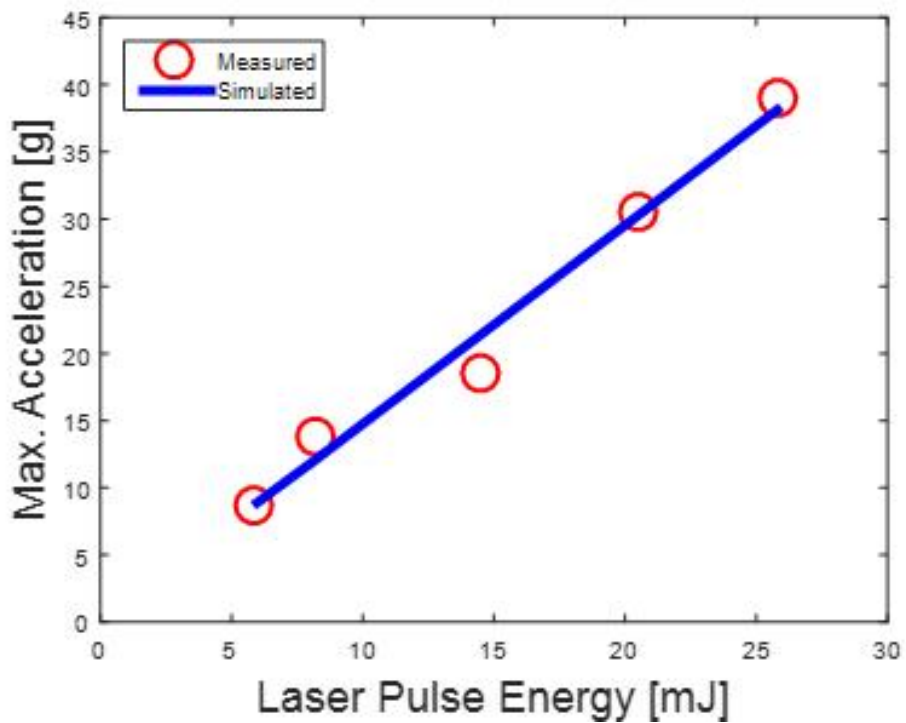


그림 3.1 가속도 최대치 측정 결과와 선형 열팽창 계수가 $\beta/3 = 4.15 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과

제2절 열 효과 및 기계적 효과 시뮬레이션

1. 매질 특성 파라미터의 변화에 따른 온도 상승 최대치

먼저, 흡수 계수를 변화시키며 열 효과 시뮬레이션을 수행하여 시간에 따른 온도 변화에 대한 결과를 구하였다. 흡수 계수가 1.0, 3.4, 10.0, 50.0 mm⁻¹인 네 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 레이저가 입사하는 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 결과는 그림 3.2와 같다. 흡수 계수 이외의 다른 파라미터들은 표 3.1에 정리된 광흡수성 탄성 매질의 기본 특성 파라미터 값을 그대로 사용하였다. 같은 방식으로 다른 특성 파라미터의 변화에 대한 시뮬레이션의 경우에도 그 파라미터 이외의 값들은 표 3.1의 기본 특성 값들을 사용하였다. 레이저가 입사한 순간 온도가 급격히 상승한 후 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 흡수 계수가 증가할수록 온도 상승 최대치는 증가하였다. 표 3.3에 각 흡수 계수별 시뮬레이션을 통해 얻은 온도 상승 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.3은 흡수 계수 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수(Power Function) 곡선 맞춤(Curve Fitting) 결과를 보여주고 있다. 온도 상승 최대치 변화는 흡수 계수 변화에 정비례(1승의 멱함수 의존성)하였으며, 그 비례 상수는 1.06 °C·mm이었다. 펄스 레이저가 입사한 직후의 온도 상승 최대치는 다음 식과 같이 주어진다.^[26-28]

$$T_{\max} = 2 \frac{(1-R)}{\rho C} \frac{E_p}{\pi \omega^2} \alpha \quad (3.1)$$

이론적으로는 공기와 매질 사이의 반사율 R 또한 흡수 계수 α 에 의존하는 값이지만 본 논문에서 시뮬레이션을 수행한 영역에서는 거의 흡수 계수에 무관하였다. 따라서, 식 (3.1)을 통해 온도 상승 최대치 T_{\max} 는 흡수 계수 α 에 정비례해야만 함을 확인할 수 있다. 식 (3.1)의 비례 상수부 $2(1-R)E_p/(\rho C\pi\omega^2)$ 를 수치적으로 계산하면 멱함수 곡선 맞춤 결과와 동일한 값인 1.06을 모든 흡수 계수

경우에 대하여 얻을 수 있었다.

두 번째로, 밀도를 변화시키며 열 효과 시뮬레이션을 수행하여 시간에 따른 온도 변화에 대한 결과를 구하였다. 밀도가 100, 300, 500, 700, 900, 1100, 1300, 1500 kg·m⁻³인 여덟 가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 레이저가 입사하는 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 결과는 그림 3.4와 같다. 흡수 계수를 변화시킨 경우와 마찬가지로 레이저가 입사한 순간 온도가 급격히 상승한 후 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으나, 밀도가 증가함에 따라 온도 상승 최대치는 감소하였다. 표 3.4에 각 밀도별 시뮬레이션을 통해 얻은 온도 상승 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.5는 밀도 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 온도 상승 최대치 변화는 밀도 변화에 반비례(-1승의 멱함수 의존성)하였으며, 그 비례 상수는 $3.69 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$ 이었다. 식 (3.1)을 통해 다른 파라미터들이 고정되어 있다면, 온도 상승 최대치 T_{\max} 는 밀도 ρ 에 반비례해야함을 알 수 있다. 이 때, 비례 상수부는 $2(1-R)E_p\alpha/(C\pi\omega^2)$ 로 주어지며, 이를 수치적으로 계산하여 멱함수 곡선 맞춤 결과로부터 얻은 값과 동일한 3.69×10^3 을 얻을 수 있었다.

세 번째로, 비열을 변화시키며 열 효과 시뮬레이션을 수행하여 시간에 따른 온도 변화에 대한 결과를 구하였다. 매질의 비열이 1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 12000, 16000 J·kg⁻¹·K⁻¹인 일곱 가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 레이저가 입사하는 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 결과는 그림 3.6과 같다. 이 경우에도 레이저가 입사한 순간 온도가 급격히 상승한 후 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으나, 비열이 증가함에 따라 온도 상승 최대치는 감소하였다. 표 3.5에 각 비열별 시뮬레이션을 통해 얻은 온도 상승 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.7은 비열 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 밀도 변화의 경우와 마찬가지로 온도 상승 최대치 변화는 비열 변화에 반비례(-1승의 멱함수 의존성)하였으며, 그 비례 상수는 $8.26 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{kg}$ 이었다. 이 경우에도, 식 (3.1)을 통해 다른 파라미터들이 고정되어 있다면, 온도 상승 최대치 T_{\max} 는 비열 C 에 반비례해야함을 알 수 있다. 이 때, 비례 상수부는 $2(1-R)E_p\alpha/(\rho\pi\omega^2)$ 로 주어지며, 이를 수치적

으로 계산하여 먹함수 곡선 맞춤 결과로부터 얻은 값과 동일한 8.26×10^3 을 얻을 수 있었다.

열팽창 계수와 영률이 변화되는 경우, 열 효과 시뮬레이션 결과는 변화하지 않는다. 이 경우에는 열 효과 시뮬레이션에 이어 수행되는 기계적 효과 시뮬레이션의 입력으로 표 3.1의 기본 특성 파라미터 값에 대한 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 이 때, 레이저가 입사하는 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 결과는 그림 3.8과 같다. 온도 상승 최대치는 약 $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 이었으며, 이 경우에도 레이저 펄스가 입사할 때 순간적으로 온도가 상승한 후 서서히 감소하는 경향을 보였다.

표 3.3 흡수 계수 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과

Absorption Coefficient α [mm^{-1}]	Max. Temperature Increase T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]
1.0	1.06
3.4	3.60
10.0	10.60
50.0	52.99

표 3.4 밀도 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과

Density ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Max. Temperature Increase T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]
100	36.93
300	12.31
500	7.39
700	5.28
900	4.10
1100	3.36
1300	2.84
1500	2.46

표 3.5 비열 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과

Specific Heat C [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Max. Temperature Increase T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]
100	82.63
400	20.66
700	11.80
1000	8.26
2000	4.13
3000	2.75
4000	2.07

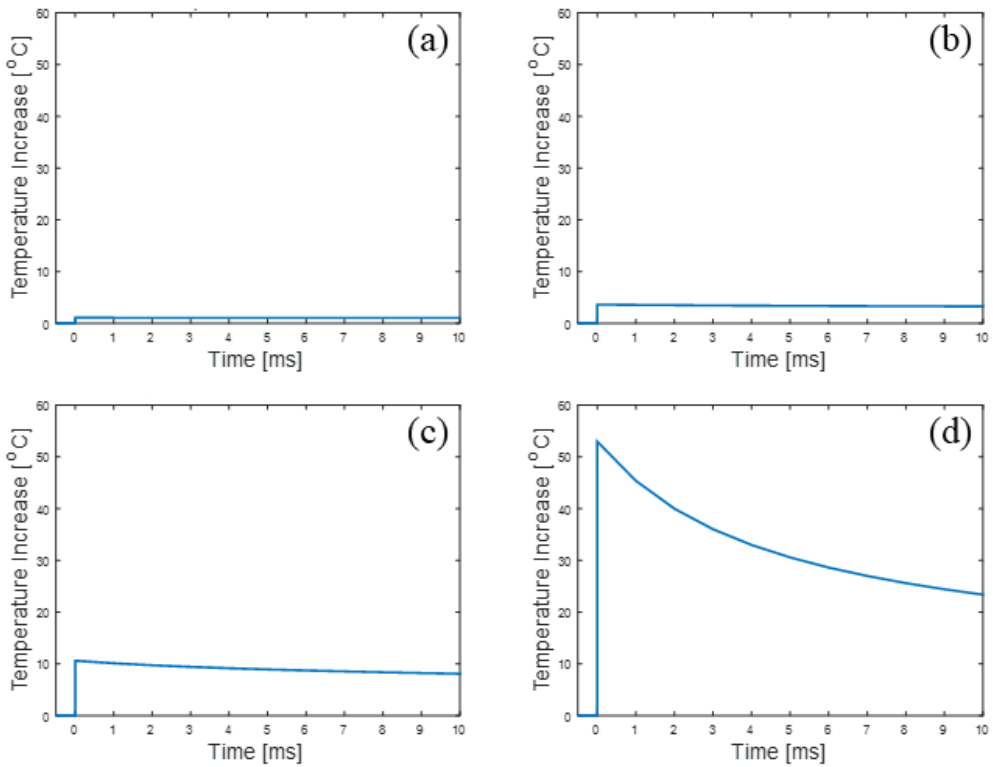


그림 3.2 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션
 결과(흡수 계수 α : (a) 1.0, (b) 3.4, (c) 10.0, (d) 50.0 mm^{-1})

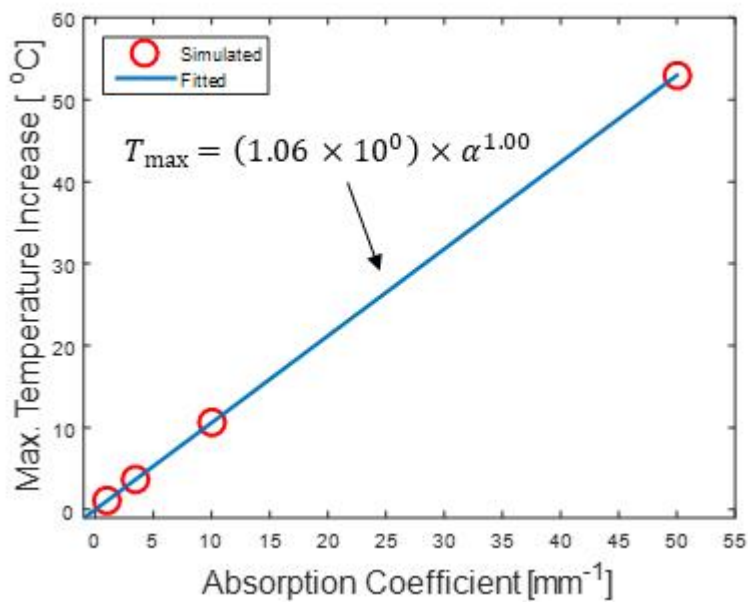


그림 3.3 흡수 계수 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션
 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과

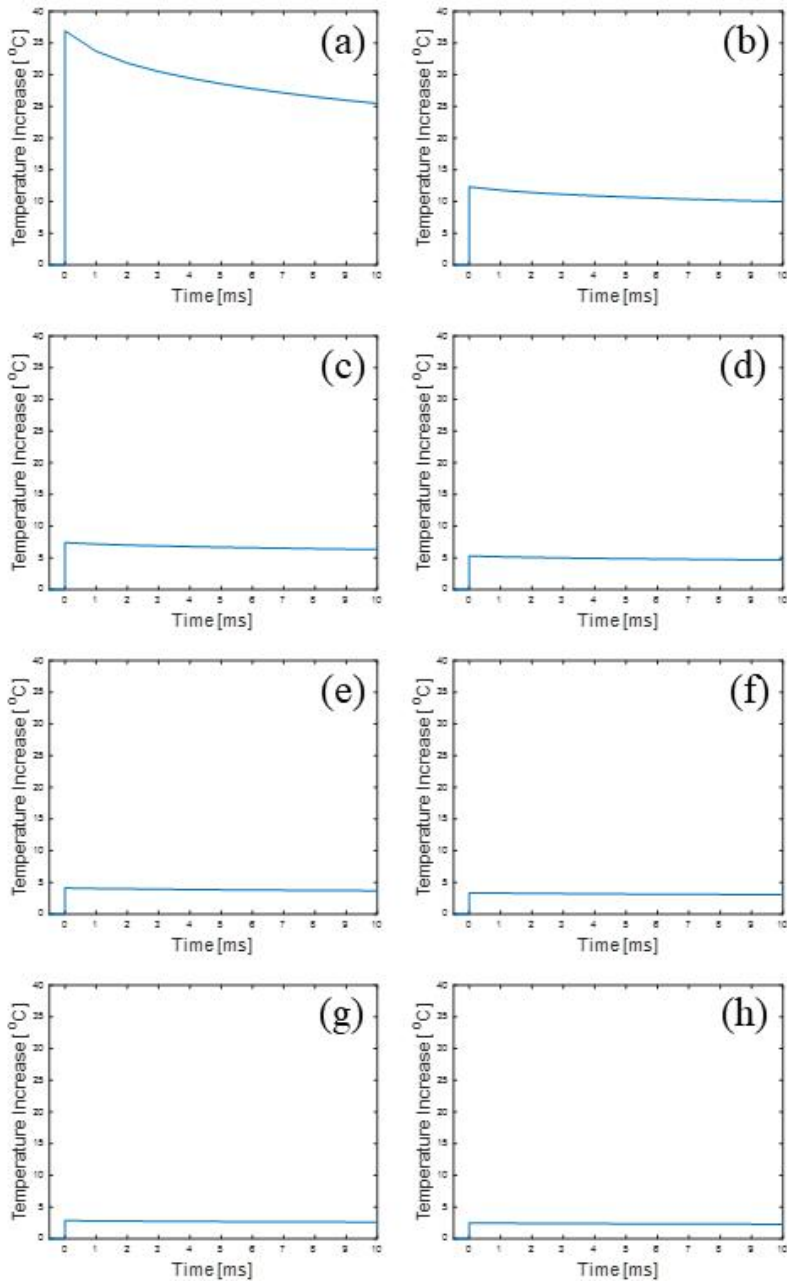


그림 3.4 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션 결과(밀도 ρ : (a) 100, (b) 300, (c) 500, (d) 700, (e) 900, (f) 1100, (g) 1300, (h) 1500 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

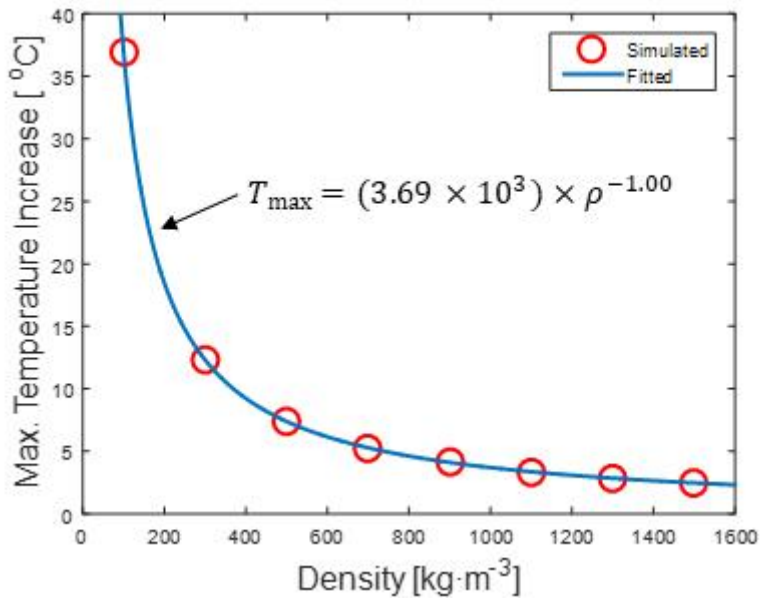


그림 3.5 밀도 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과

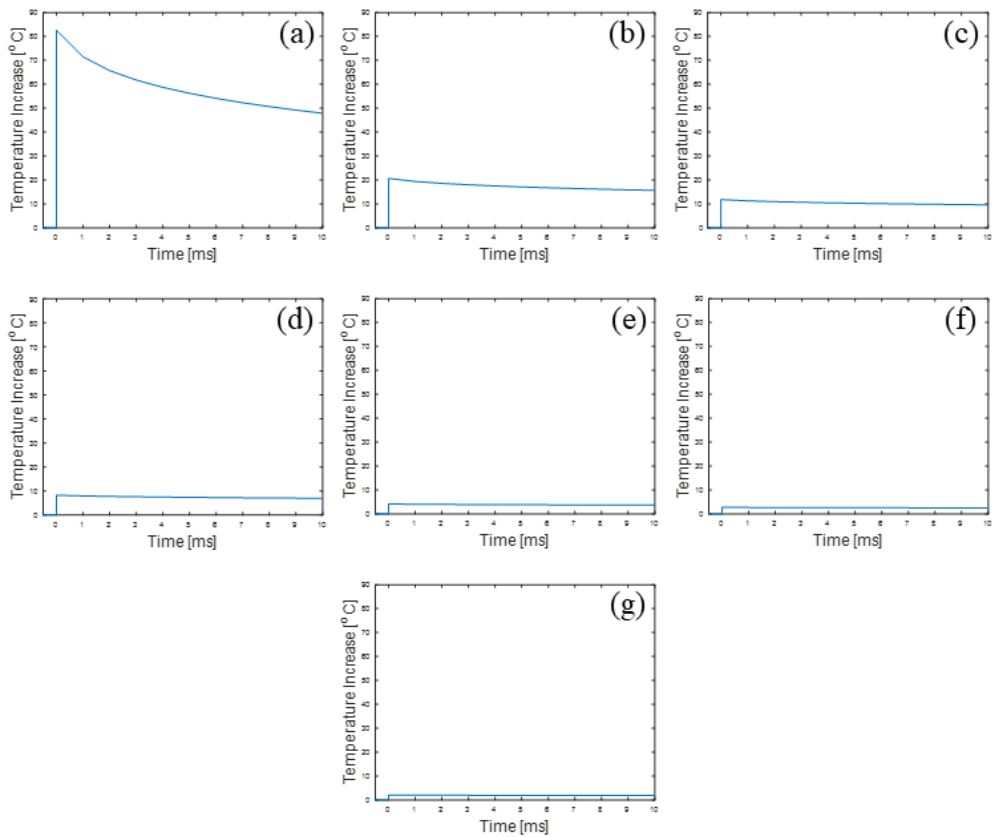


그림 3.6 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션 결과(비열 C : (a) 100, (b) 400, (c) 700, (d) 1000, (e) 2000, (f) 3000, (g) 4000 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

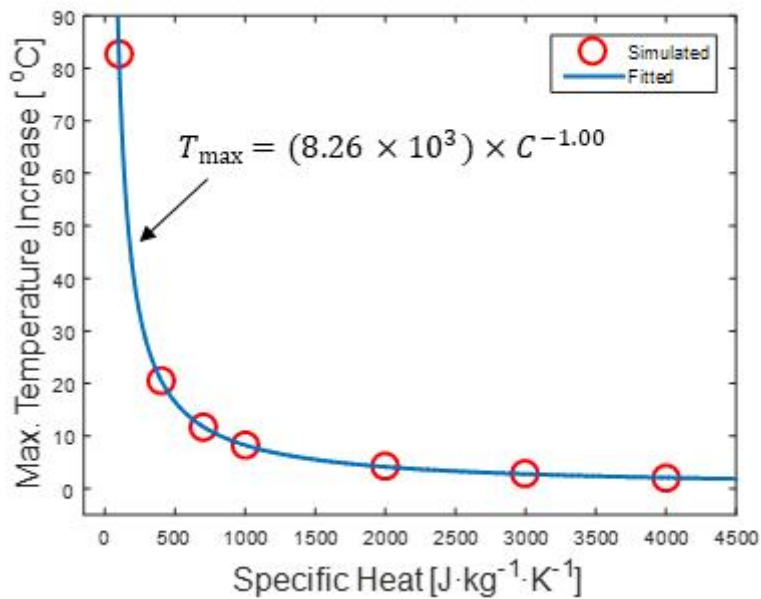


그림 3.7 비열 변화에 따른 온도 상승 최대치 시뮬레이션 결과와
 멱함수 곡선 맞춤 결과

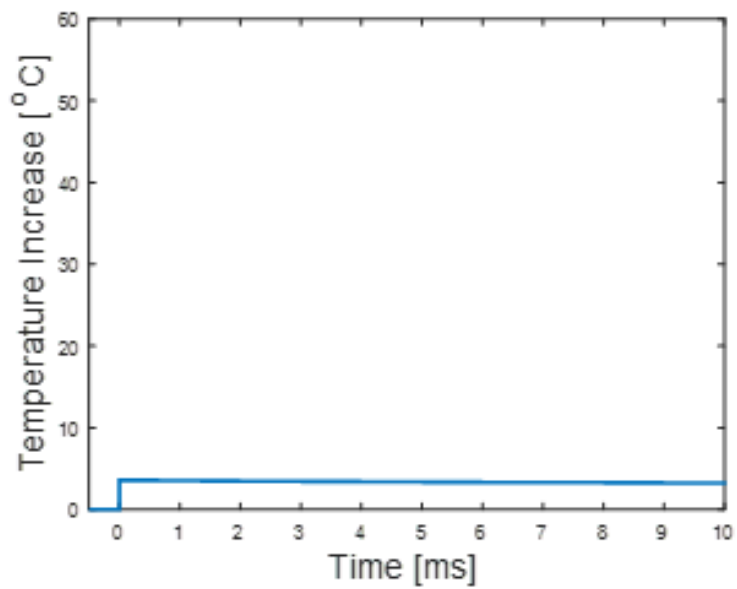


그림 3.8 레이저 입사 표면 중앙부에서의 시간에 따른 온도 변화 시뮬레이션
 결과(표 3.1의 기본 특성 파라미터 사용)

2. 매질 특성 파라미터의 변화에 따른 발생 가속도 최대치

첫 번째로 흡수 계수를 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0 mm⁻¹으로 변화시키며 기계적 효과에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저, ANSYS Fluent를 사용하여 열 효과에 관한 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 ANSYS Mechanical의 입력으로 사용하여 매질의 변형에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3.9는 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 레이저가 입사된 직후 가속도 값이 급격히 증가한 뒤, 복잡한 파형을 보이다가 진동하며 0으로 수렴하는 형태를 보이고 있다. 흡수 계수가 증가함에 따라 발생 가속도 최대치는 증가하는 경향을 보이고 있다. 표 3.6에 각 흡수 계수별 시뮬레이션을 통해 얻은 발생 가속도 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.10은 흡수 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 이 경우에는 한 개의 멱함수만으로는 곡선 맞춤이 어려워 두 개의 멱함수를 사용하여 곡선 맞춤을 수행하였다. 흡수 계수가 작은 경우 흡수 계수가 증가함에 따라 발생 가속도 최대치가 급격히 증가하고 있으나, 흡수 계수가 큰 경우 흡수 계수 증가에 따른 발생 가속도 최대치의 증가율이 감소함을 알 수 있다. 흡수 계수가 0인 경우 레이저 빔은 흡수 없이 매질을 통과하게 된다. 흡수 계수가 작은 경우에는 흡수 계수에 비례하여 매질에 흡수되는 레이저 펄스 에너지가 증가하게 되고, 이에 따라 기계적 효과 또한 증가하게 된다. 이에 반해 흡수 계수가 아주 큰 경우에는 침투 깊이가 매우 짧아져 레이저 펄스 에너지는 매질 표면에서 거의 모두 흡수된다. 따라서, 흡수 계수가 아주 큰 경우 흡수 계수 증가에 의한 기계적 효과의 발생은 포화된다. 이러한 방식으로 그림 3.10의 경향을 정성적으로 설명할 수 있다.

두 번째로, 밀도를 500, 700, 900, 1100, 1500, 3000, 5000, 7000 kg·m⁻³으로 변화시키며 기계적 효과에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3.11은 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 표 3.7에 각 밀도별 시뮬레이션을 통해 얻은 발생 가속도 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.12는 밀도 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 밀도가 증가함에 따라 -1.16승의 멱함수 의존성을 갖고 발생 가속도 최대치가 감소하였다. 온도 상승 최대치의

경우 밀도에 대하여 -1승의 멱함수 의존성을 갖고 있었는데, 발생 가속도 최대치는 온도 상승 최대치보다도 좀 더 급격하게 감소함을 의미한다. 가속도는 매질의 가해지는 힘이 일정할 때 질량에 반비례하므로 밀도가 커질수록 발생 가속도는 작아지게 된다. 이러한 효과가 반영되어 온도 상승 최대치보다 더 큰 절댓값 승수의 멱함수 의존성을 갖게 되는 것으로 판단된다.

세 번째로 비열을 1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 12000, 16000 J·kg⁻¹·K⁻¹으로 변화시키며 기계적 효과에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3.13은 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 표 3.8에 각 비열별 시뮬레이션을 통해 얻은 발생 가속도 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.14는 비열 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 이 경우 온도 상승 최대치 경우와 마찬가지로 발생 가속도 최대치 변화는 비열 변화에 반비례하였으며, 그 비례 상수는 $2.03 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}$ 이었다. 식 (2.8)의 열탄성 파동 방정식을 통해 알 수 있는 바와 같이 기본적으로 비열은 기계적 효과에 직접적인 영향을 끼치는 파라미터가 아니다. 그러나 구동 항인 온도 구배를 통해 간접적으로 기계적 효과에 영향을 미친다. 따라서, 기계적 효과에 대한 비열 의존성은 열 효과에 대한 비열 의존성과 동일하게 된다. 발생 가속도 최대치에 대한 비례 상수와 온도 상승 최대치에 대한 비례 상수의 비율은 24.6 g·°C⁻¹으로 계산된다. 이는 기본 특성 파라미터를 갖고 있는 매질의 경우 1 °C 온도 상승 당 24.6 g의 가속도가 발생함을 의미한다.

네 번째로 열팽창 계수를 0.5×10^{-4} , 1.0×10^{-4} , 2.0×10^{-4} , 3.0×10^{-4} , 4.0×10^{-4} , 5.0×10^{-4} K⁻¹으로 변화시키며 기계적 효과에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3.15는 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 표 3.9에 각 열팽창 계수별 시뮬레이션을 통해 얻은 발생 가속도 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.15는 열팽창 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 발생 가속도 최대치 변화는 열팽창 계수 변화에 정비례하였으며, 그 비례 상수는 $2.14 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{K}$ 이었다. 식 (2.8)의 열탄성 파동 방정식을 살펴보면 온도 구배를 포함한 구동 항이 열팽창 계수에 비례함을 알 수 있다. 이는 열탄성 파동 방정식

을 따르는 기계적 효과 또한 열팽창 계수에 비례함을 의미한다. 따라서, 발생 가속도 최대치 변화가 열팽창 계수 변화에 정비례하게 된다.

마지막으로 영률을 0.05, 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, 25, 30, 35, 40 MPa으로 변화시키며 기계적 효과에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3.16은 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 가속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 표 3.10에 각 영률별 시뮬레이션을 통해 얻은 발생 가속도 최대치 데이터를 정리하였다. 그림 3.17은 영률 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과를 보여주고 있다. 이 경우에는 한 개의 멱함수만으로는 곡선 맞춤이 어려워 하나의 멱함수와 하나의 지수함수의 합을 사용하여 곡선 맞춤을 수행하였다. 영률이 증가함에 따라 0.05 MPa에서 0.1 MPa 사이를 제외하고 대략 1 MPa까지는 발생 가속도 최대치가 감소하였으며, 그 후 증가하였고 대략 30 MPa이상에서는 포화되는 경향을 보였다. 이러한 경향이 발생하는 원인에 대해서는 현재 이론적인 분석이 수행 중이며, 심도있는 추가 연구가 필요한 것으로 생각된다.

표 3.6 흡수 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과

Absorption Coefficient α [mm^{-1}]	Max. Acceleration A_{max} [g]
0.1	5.845
0.5	25.63
1.0	46.65
2.0	71.85
3.0	84.55
4.0	94.15
5.0	97.45
10.0	112.7
20.0	131.1
30.0	146.7

표 3.7 밀도 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과

Density ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Max. Acceleration A_{max} [g]
500	191.9
700	139.9
900	103.6
1100	79.05
1500	53.03
3000	19.95
5000	10.57
7000	6.45

표 3.8 비열 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과

Specific Heat C [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Max. Acceleration A_{max} [g]
1000	200.7
2000	100.2
3000	66.76
4000	50.08
8000	25.04
12000	16.76
16000	12.52

표 3.9 열팽창 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과

Thermal Expansion Coefficient $\beta/3$ [K ⁻¹]	Max. Acceleration A_{\max} [g]
0.5×10^{-4}	10.71
1.0×10^{-4}	21.41
2.0×10^{-4}	42.82
3.0×10^{-4}	64.23
4.0×10^{-4}	85.65
5.0×10^{-4}	107.06

표 3.10 영률 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과

Young's Modulus E [MPa]	Max. Acceleration A_{\max} [g]
0.05	67.6
0.1	80.6
0.5	37.68
1	29.22
3	39.31
5	50.59
10	66.32
20	80.99
25	86.98
30	92.59
35	95.84
40	96.65

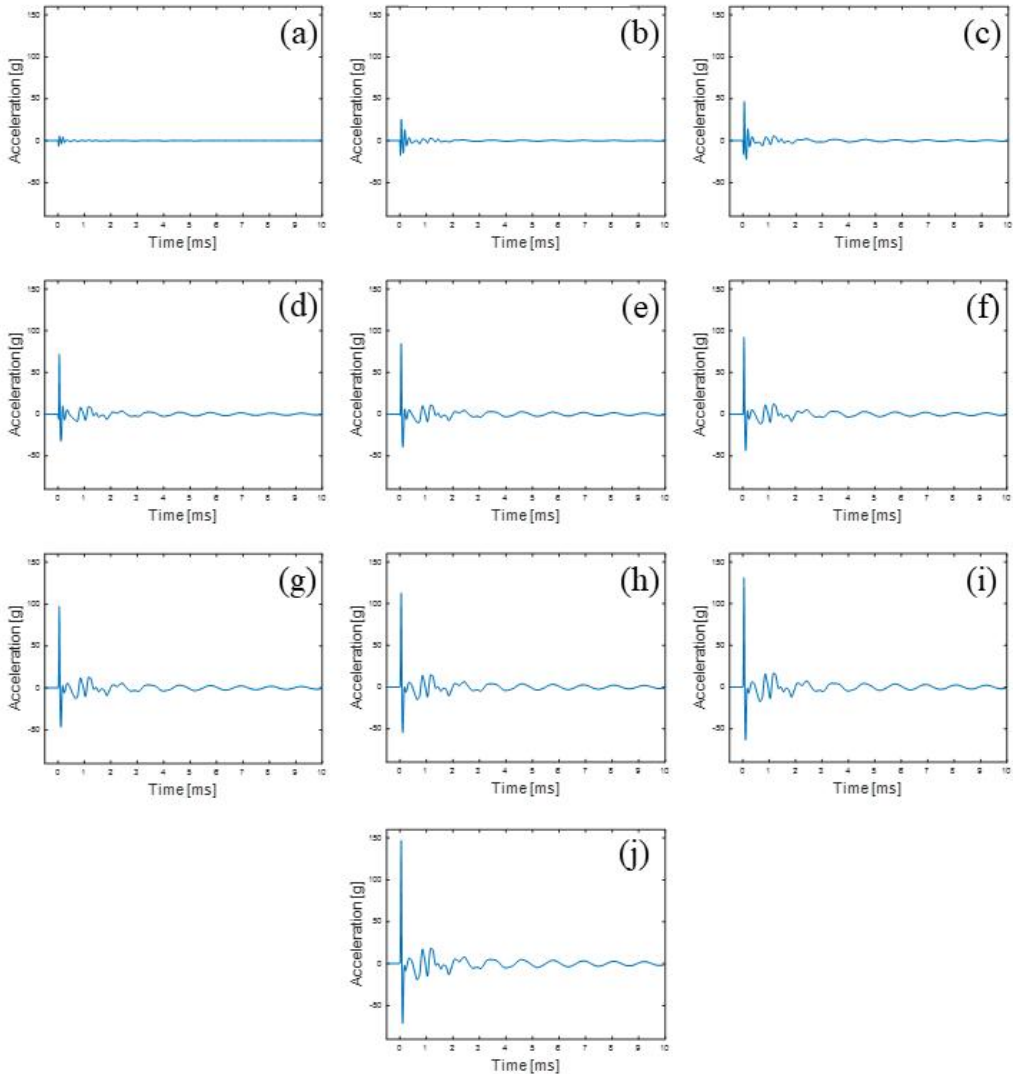


그림 3.9 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(흡수 계수 α : (a) 0.1, (b) 0.5, (c) 1.0, (d) 2.0, (e) 3.0, (f) 4.0, (g) 5.0, (h) 10.0, (i) 20.0, (j) 30.0 mm^{-1})

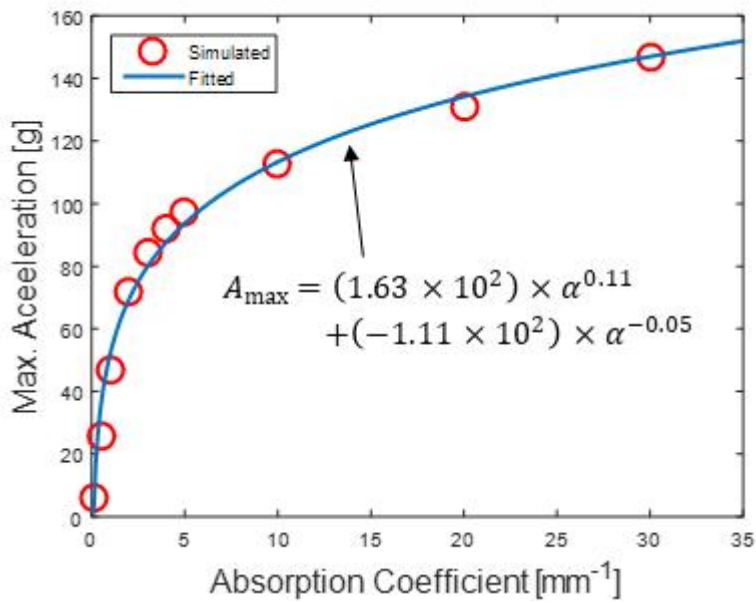


그림 3.10 흡수 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과

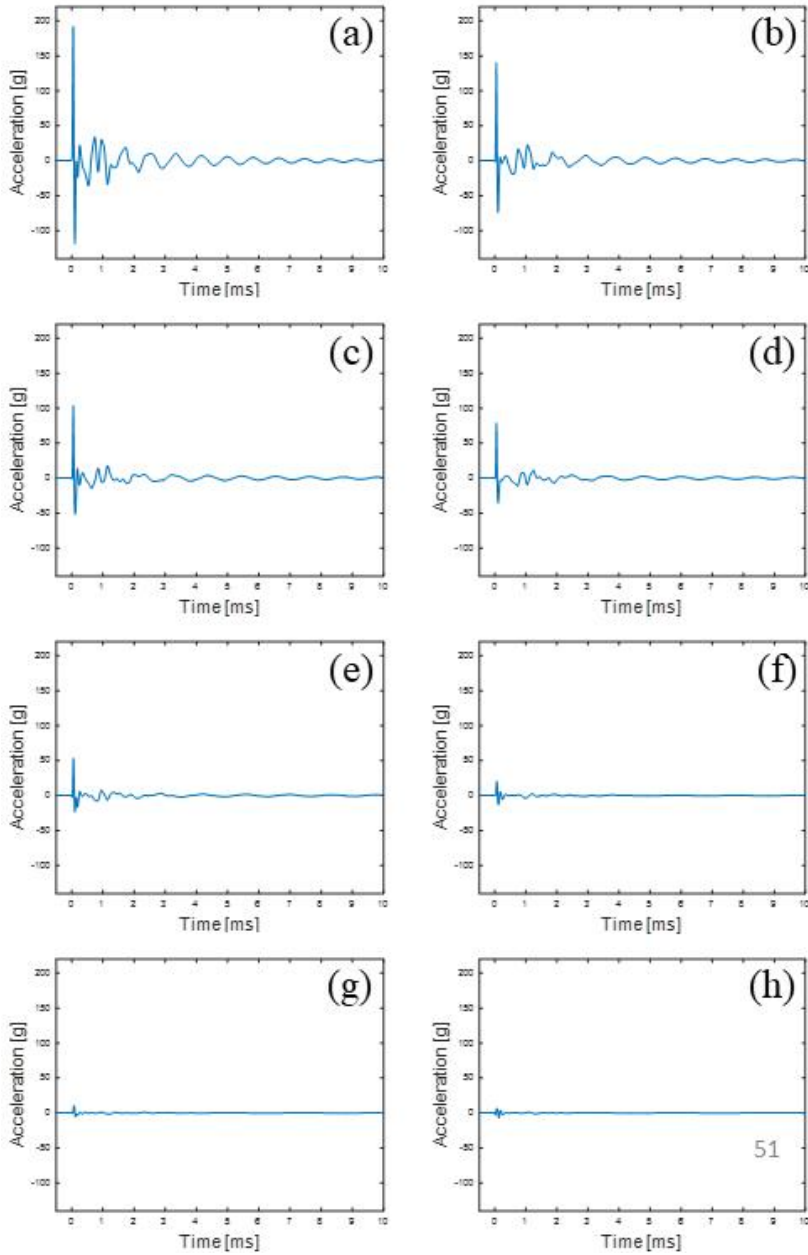


그림 3.11 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(밀도 ρ : (a) 500, (b) 700, (c) 900, (d) 1100, (e) 1500, (f) 3000, (g) 5000, (h) 7000 kg·m⁻³)

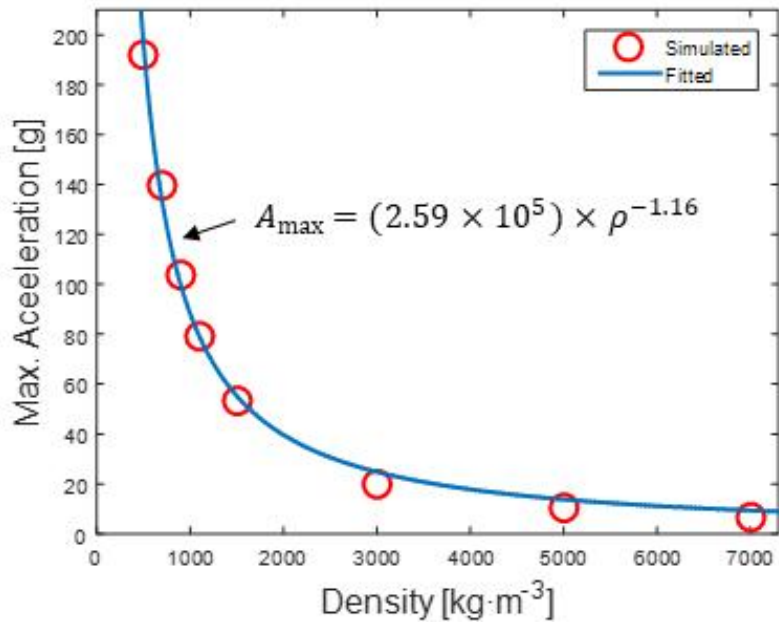


그림 3.12 밀도 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와
 멱함수 곡선 맞춤 결과

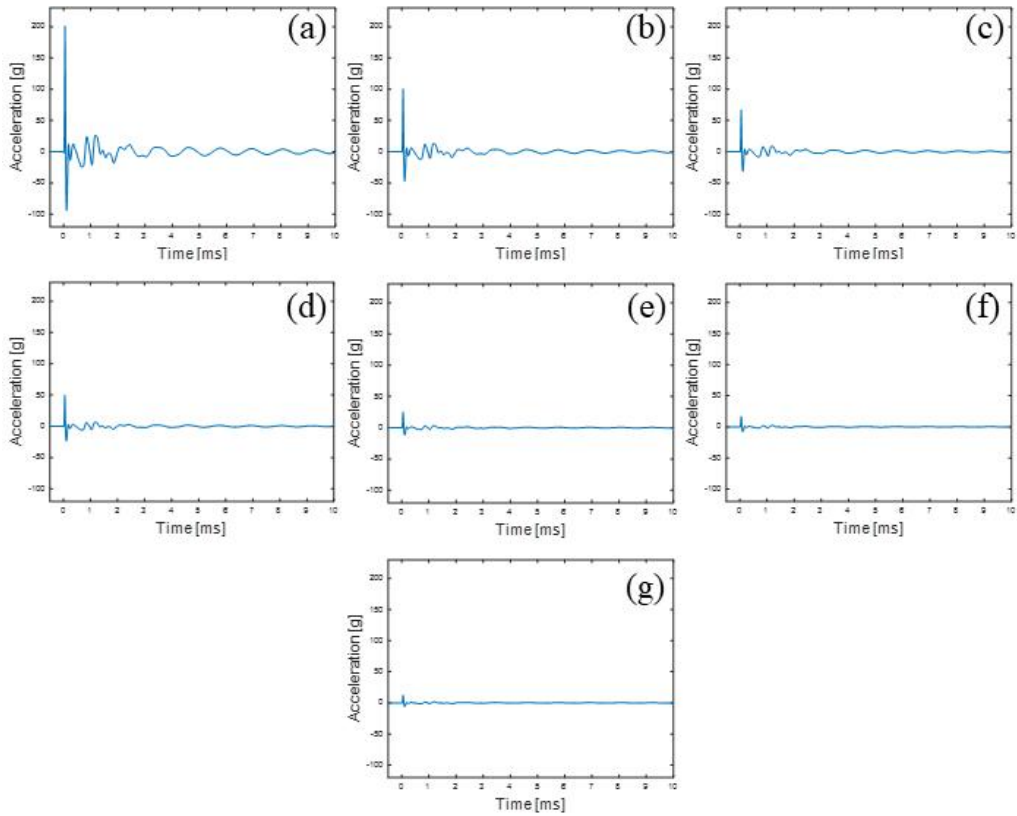


그림 3.13 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션
 결과(비열 C : (a) 1000, (b) 2000, (c) 3000, (d) 4000, (e) 8000, (f) 12000, (g)
 16000 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

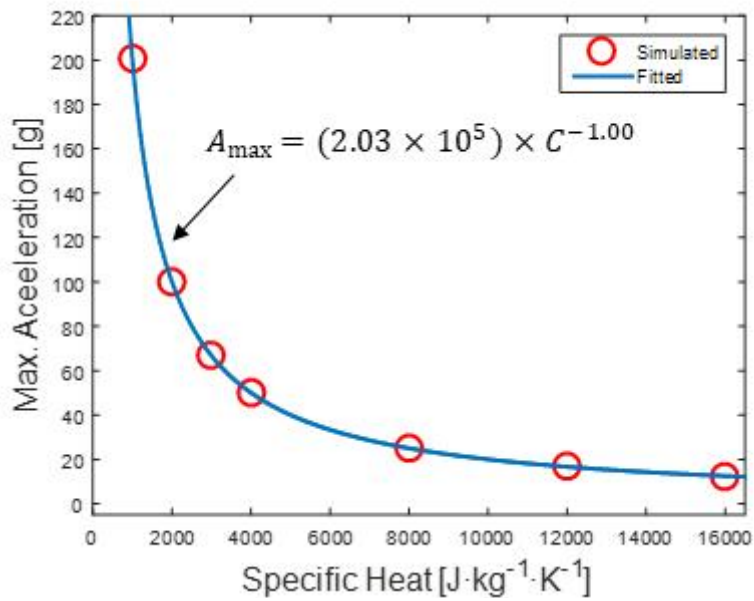


그림 3.14 비열 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션
 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과

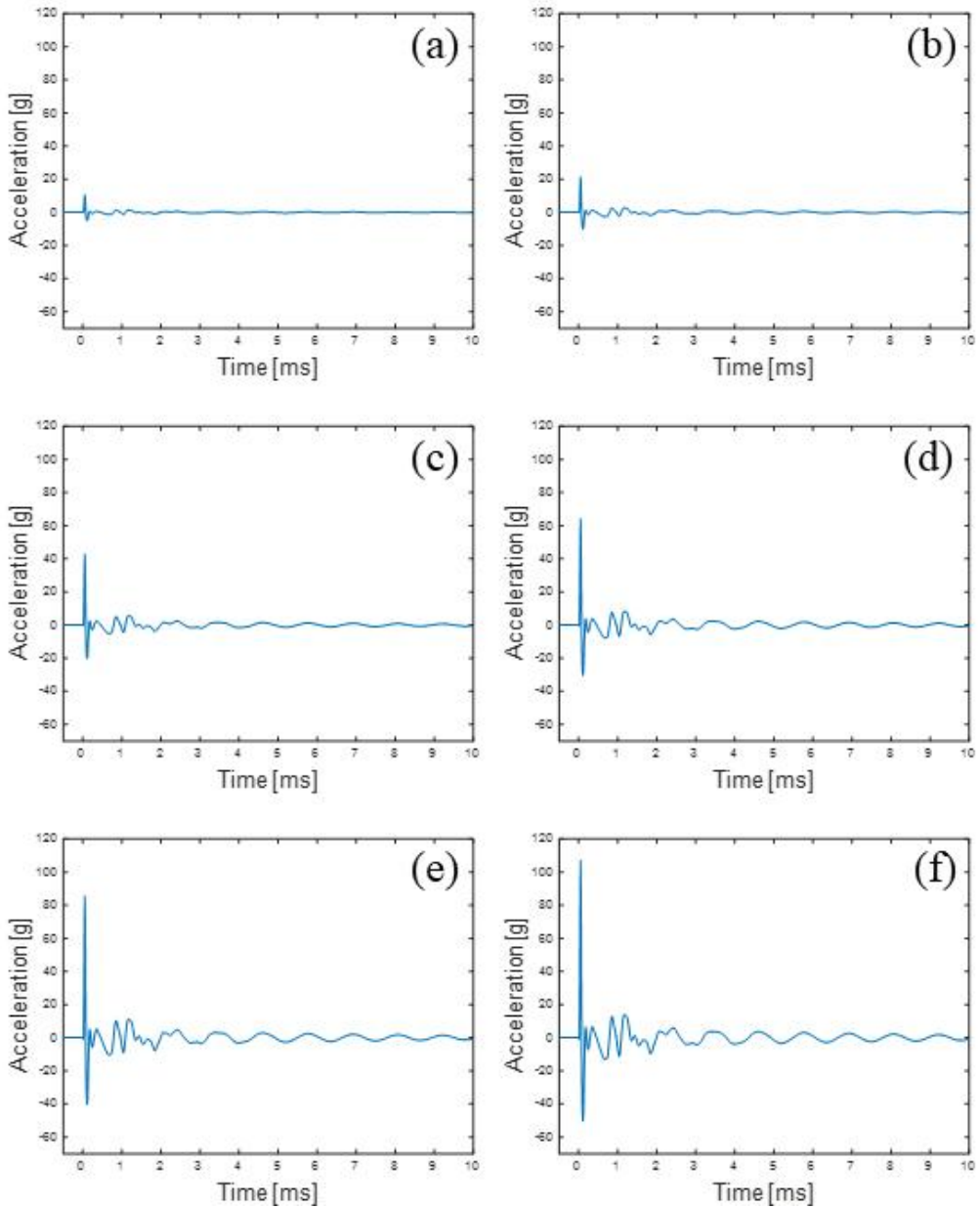


그림 3.15 매질 후면 중앙부에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(열팽창 계수 $\beta/3$: (a) 0.5×10^{-4} , (b) 1.0×10^{-4} , (c) 2.0×10^{-4} , (d) 3.0×10^{-4} , (e) 4.0×10^{-4} , (f) $5.0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)

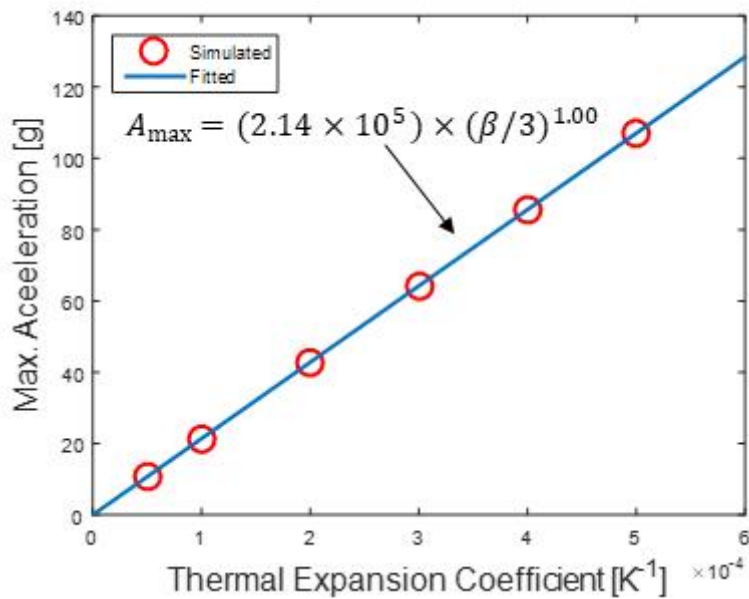


그림 3.16 열팽창 계수 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과

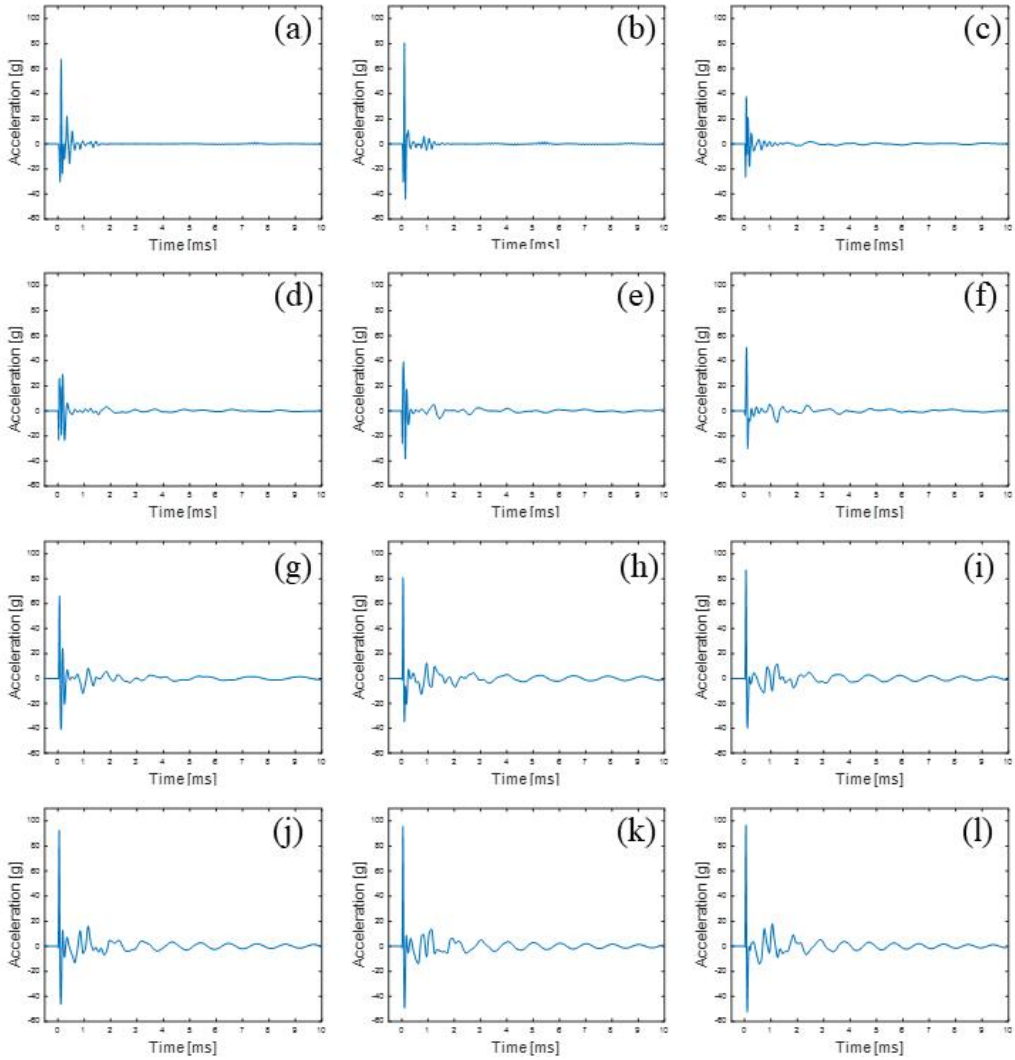


그림 3.17 매질 후면 중심점에서의 시간에 따른 발생 가속도 변화 시뮬레이션 결과(영률 E : (a) 0.05, (b) 0.1, (c) 0.5, (d) 1.0, (e) 3.0, (f) 5.0, (g) 10.0, (h) 20.0, (i) 25.0, (j) 30.0, (k) 35.0, (l) 40.0 MPa)

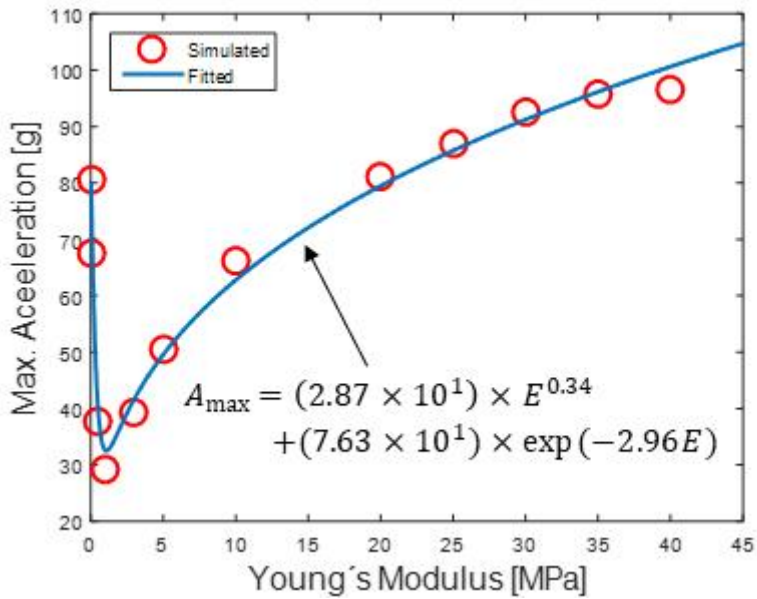


그림 3.18 영률 변화에 따른 발생 가속도 최대치 시뮬레이션 결과와 멱함수 곡선 맞춤 결과

제3절 효과적인 레이저 간접자극 유도를 위한 매질 특성 파라미터 영역 결정

최근, 레이저 간접자극의 피험자 인지 및 매질 손상에 관한 연구 결과가 보고되었다.^[29] 참고문헌 [29]에서는 실험, 시뮬레이션 및 문헌 조사를 통해 레이저 간접자극의 피험자 인지 문턱치와 매질 손상 문턱치를 제시하고 있다. 피험자 인지의 경우, 50%의 피험자가 레이저 간접자극에 의해 촉감을 느꼈다고 응답한 최대 가속도 값인 13 g를 인지 문턱치로 제시하였으며, 매질 손상의 경우, 아크릴 계열 테이프의 열 손상이 실험적으로 발생한 최대 온도 상승치 34 °C와 문헌에 보고된 아크릴 계열 폴리머의 최대 인장응력(Ultimate Tensile Stress, UTS) 값인 40 MPa^[30]을 손상 문턱치로 제시하였다. 제2절에 정리되어 있는 본 논문의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 참고문헌 [29]에서 제시된 인지 및 손상 문턱치를 참조하여 매질 손상 없이 효과적으로 레이저 간접자극을 유도할 수 있는 매질 특성 파라미터의 영역을 결정하였다.

흡수 계수의 경우, 열 효과에 대한 시뮬레이션 결과인 표 3.3과 그림 3.3을 통해 32.08 mm⁻¹일 때 매질 손상 문턱치인 최대 온도 상승치 34 °C에 도달하며, 기계적 효과에 대한 시뮬레이션 결과인 표 3.6과 그림 3.10을 통해 0.25 mm⁻¹일 때 인지 문턱치인 발생 가속도 최대치 13 g에 도달함을 알 수 있다. 따라서, 흡수 계수가 0.25~32.08 mm⁻¹ 사이에 존재할 경우 50% 이상의 확률로 피험자가 촉각 자극을 느끼고 매질 손상은 발생하지 않을 것으로 기대되며, 이 영역을 효과적인 레이저 간접자극을 위한 흡수 계수의 파라미터 영역으로 지정할 수 있다. 본 논문에서는 파라미터 영역의 상한과 하한을 시뮬레이션 결과값들을 통해 결정할 때 데이터 내삽(Interpolation)을 이용하였다. 밀도와 비열의 경우, 흡수 계수의 경우와 같은 방식으로 파라미터 영역을 각각 110~5240 kg·m⁻³, 240~15580 J·kg⁻¹·K⁻¹로 결정하였다.

펄스 레이저의 매질 흡수에 의해 발생하는 최대 응력은 다음 식과 같이 주어진다.^[22]

$$S_{\max} = \frac{E}{3(1-2\nu)}\beta T_{\max} \quad (3.2)$$

따라서, 열 효과의 변화에 영향을 미치지 않는 매질 특성 파라미터인 열팽창 계수와 영률의 경우 식 (3.2)를 사용하여 파라미터 상한을 구할 수 있다. 기본 특성 파라미터의 경우 온도 상승 최대치가 3.6 °C이므로, 식 (3.2)를 통해 열팽창 계수 $\beta/3$ 가 $8.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 일 때 최대 응력 S_{\max} 가 UTS값인 40 MPa에 도달함을 알 수 있다. 따라서 이 값을 열팽창 계수의 파라미터 상한으로 결정하였다. 열팽창 계수의 파라미터 하한은 기계적 효과 시뮬레이션 결과인 표 3.9와 그림 3.16을 통해 인지 문턱치인 발생 가속도 최대치 13 g를 얻을 수 있는 $0.6 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 로 결정하였다. 영률의 경우 식 (3.2)를 사용하여 파라미터 상한을 535 MPa로 결정할 수 있었으나, 기계적 효과 시뮬레이션 결과에 발생 가속도 최대치 13 g를 얻을 수 있는 영률의 값이 존재하지 않아 파라미터 하한은 결정할 수 없었다. 이러한 방식으로 결정한 광흡수성 탄성 매질의 특성 파라미터 영역은 표 3.11의 Condition A와 같다.

안전 계수(Safety Factor) 2와 5를 적용할 경우, 피험자 인지 문턱치(발생 가속도 최대치), 매질 손상 문턱치(온도 상승 최대치, UTS)는 각각 26 g($13 \times 2 \text{ g}$), 17 °C($34/2 \text{ °C}$), 20 MPa($40/2 \text{ MPa}$)와 65 g($13 \times 5 \text{ g}$), 6.8 °C($34/5 \text{ °C}$), 8 MPa($40/5 \text{ MPa}$)로 설정할 수 있다. 안전 계수 2와 5인 경우의 대해서도 특성 파라미터 영역을 안전 계수 1인 경우와 같은 방식으로 결정하였는데, 그 결과는 각각 표 3.11의 Condition B, C와 같다.

표 3.11 효과적인 레이저 간접자극 유도를 위한 매질 특성 파라미터 영역

Medium Property	Condition A (Safety Factor 1)		Condition B (Safety Factor 2)		Condition C (Safety Factor 5)	
	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
Absorption Coefficient [mm^{-1}]	0.25	32.08	0.51	16.04	1.73	6.42
Density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	110	5240	220	2880	540	1300
Specific Heat [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	240	15580	490	7800	1200	3100
Thermal Expansion Coefficient [K^{-1}]	0.6×10^{-4}	8.5×10^{-3}	1.2×10^{-4}	4.3×10^{-3}	3.0×10^{-4}	1.7×10^{-3}
Young's Modulus [MPa]	-	535	-	268	9.58	107

제4장 결 론

본 논문에서는 레이저 간접자극의 매질 특성 의존성에 관한 연구를 수행하였다. 레이저 간접자극은 피부 위에 부착된 광흡수성 탄성 매질에 펄스 레이저를 조사하여 체성감각을 유도하는 기술이다. 본 논문에서 고려한 매질의 특성 파라미터들은 흡수 계수, 밀도, 비열, 열팽창 계수, 영률, 굴절률, 포아송비, 열 전도도 등이다. 열 전달 방정식을 사용한 열 효과 시뮬레이션과 열탄성 파동 방정식을 사용한 기계적 효과 시뮬레이션을 통해 각각의 매질 특성 파라미터들이 온도와 가속도(매질의 변형) 변화에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 열 효과 시뮬레이션과 기계적 효과 시뮬레이션을 위해 열 및 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent(ANSYS Incorporated, USA)와 구조 해석 소프트웨어인 ANSYS Mechanical(ANSYS Incorporated, USA)을 각각 사용하였다.

시뮬레이션을 위해 레이저의 파장은 532 nm, 펄스 폭은 8 ns, 펄스 에너지는 50 mJ, 빔 직경($1/e$ 기준)은 5 mm인 것으로 가정하였으며, 광흡수성 탄성 매질의 크기는 지름 30 mm, 두께 2.2 mm로 설정하였다. 열 효과 시뮬레이션과 기계적 효과 시뮬레이션 결과를 바탕으로 매질의 온도 상승 최대치와 발생 가속도 최대치의 특성 파라미터 의존성을 정리하였다. 특성 파라미터들 중 굴절률, 포아송비, 열 전도도가 온도 및 가속도 변화에 미치는 영향은 매우 미미하였다.

문헌 조사를 통해 매질 손상 임계치와 체성감각 인지 임계치를 정리하였다. 매질의 손상은 온도 상승 최대치와 극한 인장응력에 의해 결정되며, 체성감각 인지는 발생 가속도 최대치에 의해 결정된다고 가정하였다. 온도 상승 및 발생 가속도 최대치의 매질 특성 파라미터 의존성 결과와 매질 손상 및 체성감각 인지 임계치 정보를 분석하여, 매질의 손상이 발생되지 않으면서도 효과적인 체성감각을 유도할 수 있는 특성 파라미터의 영역(상한 및 하한)을 결정하였다.

현재, 레이저 간접자극을 위한 광흡수성 탄성 매질로는 아크릴 계열 테이프가 사용되고 있다. 본 논문의 연구 결과는 레이저 간접자극에 사용될 새로운 매질의 개발 및 탐색을 위한 후속 연구에 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] T. H. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby,” *Nature*, **187**(4736), 493 (1960).
- [2] W. Koechner and M. Bass, *Solid-State Lasers: A Graduate Text* (Springer-Verlag, New York, USA, 2003).
- [3] M. H. Niemz, *Laser-Tissue Interactions* (Springer-Verlag, New York, USA, 2004).
- [4] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, New York, USA, 2002).
- [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] 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**, 68 (2015).
- [7] 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**, 2146 (2015).
- [8] 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**, 979 (2016).
- [9] G.-I. Jung, J.-S. Kim, T.-H. Lee, J.-H. Choi, H.-B. Oh, A.-H. Kim, J.-S. Kim, J.-R. Park, S.-C. Chung, D.-I. Yeom, H.-S. Kim and J.-H. Jun, “Photomechanical effect on Type I collagen using pulsed diode laser,” *Technology and Health Care* **23**, S535 (2015).
- [10] 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,” *Technology and Health Care* **24**, S697 (2016).
- [11] 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,” in *Proceedings of 2015 IEEE World Haptics Conference*, 374 (2015).
- [12] 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,” *IEEE Trans. Haptics* **9**, 574 (2016).
- [13] S.-J. Yang, J.-H. Baek, S.-E. Kim, M.-K. Kwon, J.-R. Park, D.-I. Yeom, J.-S. Kim, J.-Y. Baek, H.-S. Kim, J.-H. Jun and S.-C. Chung, “Determination of the Optical and the Thermal Properties of an Absorbing Medium by Using Infrared Thermometry,” *J. Korean Phys. Soc.* **69**(12), 1744 (2016).
- [14] H. Lee, H. Cha, J. Park, S. Choi, H.-S. Kim and S.-C. Chung, “LaserStroke: Mid-air Tactile Experiences on Contours Using Indirect Laser Radiation,” in *Proceedings of Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 73 (2016).
- [15] H. Cha, H. Lee, J. Park, H.-S. Kim, S.-C. Chung and S. Choi, “Mid-air Tactile Display Using Indirect Laser Radiation for Contour-Following Stimulation and Assessment of Its Spatial Acuity,” in *Proceedings of 2017 IEEE World Haptics Conference*, 6 (2017).
- [16] A. Bicchi, M. Buss, M. O. Ernst and A. Peer, *The Sense of Touch and Its Rendering* (Springer-Verlag, Berlin. Germany, 2008).
- [17] V. Hayward, O. R. Astely, M. CrusHernandez, D. Grant and G. Robles-De-La-Toree, "Haptic interfaces and devices," *Sensor Review* **24**, 16 (2004).
- [18] J. Hayward, “Haptics 2017-2027: Technologies, Markets and Players,” *IDTechEX* (2017).

- [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,” *J. Neurosci. Methods* **223**, 1 (2014).
- [20] F. Kreith and M. S. Bohn, *Principles of Heat Transfer* (Brooks/Cole, CA, USA, 2006).
- [21] T. Dai, B. M. Pikkula, L. V. Wang, and B. Anvari, “Comparison of Human Skin Opto-Thermal Response to Near-Infrared and Visible Laser Irradiation: A Theoretical Investigation,” *Phy. Med. Biol.* **49**, 4861 (2004).
- [22] D. Albagli, *Fundamental Mechanisms of Pulsed Laser Ablation of Biological Tissue* (Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1994).
- [23] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Theory of Elasticity* (Pergamon Press, Oxford, UK, 1986).
- [24] 3M Technical Data, “3M VHB™ Tape Specialty Tapes” <http://multimedia.3m.com/mws/media/9866950/3m-vhb-tape-specialty-tapes.pdf>.
- [25] L. S. Bickley and P. G. Szilagyi, *Bates' Guide to Physical Examination and History Taking* (Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, USA, 2012).
- [26] A. J. Welch and M. J. C. van Gemert (Eds.), *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue* (Springer, Heidelberg, Germany, 2011).
- [27] 장경민, 펄스 레이저의 매질 흡수에 의해 발생하는 열 효과 시뮬레이션 및 해석에 관한 연구 (석사학위청구논문, 조선대학교, 대한민국, 2016).
- [28] 양승진, 레이저의 탄성 매질 흡수에 의해 발생하는 열 및 기계적 효과에 관한 연구 (석사학위청구논문, 조선대학교, 대한민국, 2017).
- [29] 오한별, 김지선, 김승은, 박종락, 전재훈, “레이저 간접자극의 피험자 인지 및 매질 손상에 관한 연구,” 2018년도 한국물리학회 가을학술논문 발표회 초록집, 748 (2018).
- [30] S. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (Pearson, New York, USA, 2007).

이 력 서

성 명 : 김 승 은 (金 承 恩)

생 년 월 일 : 1994년 6월 18일 (양력)

출 생 지 : 광주광역시

주 소 : 광주광역시 서구 상일로 53 304동 1204호

학 력

2011.3. - 2013.2. 광주상일여자고등학교

2013.3. - 2017.2. 조선대학교 광기술공학과 학사과정

2017.3. - 2019.2. 조선대학교 광기술공학과 석사과정

학위 논문

- [1] “레이저 간접자극의 매질 특성 의존성에 관한 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2019).

국제 학술지 게재 논문

- [1] S.-J. Yang, J.-H. Baek, S.-E. Kim, M.-K. Kwon, J.-R. Park, D.-I. Yeom, J.-S. Kim, J.-Y. Baek, H.-S. Kim, J.-H. Jun and S.-C. Chung, “Determination of the Optical and the Thermal Properties of an Absorbing Medium by Using Infrared Thermometry,” J. Korean Phys. Soc. **69**, 1744 (2016).
- [2] J.-S. Kim, S.-J. Yang, J.-R. Park, D.-I. Yeom, J.-Y. Baek, H.-B. Oh, J.-H. Baek, S.-E. Kim, S. Choi, S.-C. Chung, H.-S. Kim and J.-H. Jun, “Selective and Reliable Tactile Stimulation by Indirect Irradiation of Nd:YAG Pulsed Laser to Human Skin,” (in preparation).

국내 학술지 게재 논문

- [1] 김승은, 방광수, 정재훈, 안재현, 주기남, 권민기, 박종락, “경관조명용 LED 투광등에 대한 광학 시뮬레이션,” 공학기술논문지, **10**, 245 (2017).
- [2] 김승은, 김유신, 박종락, “캠핑용 LED 랜턴 개발을 위한 광학 설계에 관한 연구,” (투고 중).
- [3] 권민기, 방광수, 김승은, 박종락, 정재훈, 김영심, 정형식, “경관조명을 위한 800 W급 LED 투광등 개발,” (작성 중).
- [4] 김승은, 황희남, 박종락, “석영유리판더미를 이용한 자외선 편광기 분석에 관한 연구,” (작성 중).

학술 대회 발표

- [1] 김승은, 방광수, 정재훈, 안재현, 김영심, 정형식, 김남훈, 백준혁, 양승진, 권민기, 박종락, “RGB 3색 LED 투광등 패턴 분석 및 광학 시뮬레이션에 관한 연구,” 2016년도 한국물리학회 가을학술논문발표회 초록집, P1-op.011 (2016).
- [2] 방광수, 정재훈, 안재현, 김영심, 정형식, 김남훈, 백준혁, 김승은, 양승진, 권민기, 박종락, “300 W급 경관조명용 LED 투광등 개발에 관한 연구,” 2016년도 한국물리학회 가을학술논문발표회 초록집, P1-op.012 (2016).
- [3] 장경민, 양승진, 김승은, 백준혁, 김유신, 박종락, “LED 우산의 조명부 배광 해석 및 최적 배광을 위한 광학구조 설계,” 2016년도 한국물리학회 가을학술논문발표회 초록집, P1-op.013 (2016).
- [4] 김승은, 양승진, 백준혁, 권민기, 박종락, “ANSYS Fluent를 이용한 온도 변화 해석과 이를 통한 흡수 매질의 광학 및 열적 특성 측정,” 2017년도 한국광학회 하계학술발표회 초록집, 104 (2017).
- [5] 김승은, 주기남, 권민기, 박종락, “LightTools를 이용한 경관조명용 LED 투광등 시뮬레이션,” 2017년도 한국광학회 하계학술발표회 초록집, 265 (2017).
- [6] 김승은, 강산은, 최인형, 정다영, 안재현, 박종락, “RGB LED 투광등의 패턴 분석 및 광학 시뮬레이션에 관한 연구,” 2017년도 대한전자공학회 추계학술논문대회 논문집, 1135 (2017).
- [7] 김승은, 박종락, “경관조명용 LED 투광등의 구현 가능한 투광 패턴에 대한 LightTools 시뮬레이션,” 2018년도 한국광학회 추계학술발표회 초록집, 59 (2018).
- [8] 김승은, 박종락, “레이저 간접 자극 관련 가속도 센서 측정 결과 분석 및 ANSYS Fluent/Mechanical을 이용한 시뮬레이션,” 2018년도 한국광학회 동계학술논문발표회 초록집, 319 (2018).
- [9] 김승은, 황희남, 박종락, “LightTools를 이용한 석영유리판 자외선 편광기

- 시뮬레이션,” 2018년도 한국광학회 하계학술논문발표회 초록집, 48 (2018).
- [10] 김승은, 김유신, 박종락, “캠핑용 LED 랜턴의 최적 배광분포 도출을 위한 LightTools 시뮬레이션,” 2018년도 한국광학회 하계학술논문발표회 초록집, 49 (2018).
- [11] 오한별, 김지선, 김승은, 박종락, 전재훈, “레이저 간접자극의 피험자 인지 및 매질 손상에 관한 연구,” 한국물리학회 가을학술논문발표회 초록집, 748 (2018).
- [12] 김승은, 방광수, 정재훈, 권민기, 박종락, “600 W급 경관조명용 LED 투광기 개발에 관한 연구,” 한국물리학회 가을학술논문발표회 초록집, 773 (2018).

특허

- [1] 정순철, 박종락, 김형식, 김승은, 전재훈, “간접 자극에 의한 체성감각 유도 시스템,” 대한민국 특허 출원번호 10-2017-0022475 (등록결정).

프로젝트 수행

- [1] “레이저 촉감 제시 기술 개발,” 미래유망 융합기술 파이오니어사업, 미래창조과학부 (2015. 03. - 2017. 02.).
- [2] “인터랙션디자인 기반의 경관조명 제품 개발,” 산업통상자원부 (2015. 10. - 2017. 09.).
- [3] “2017년 WISET 여대학원(생) 공학연구팀제 지원사업, 과학기술정보통신부 (2017. 04. - 2017. 11.).
- [4] “석영유리판더미를 이용한 자외선 편광기 분석에 관한 연구,” 조선대학교 (2018. 04. - 현재).
- [5] “한국에너지기술평가원 에너지인력양성사업, 건물 그린 리모델링을 위한

엔지니어링 및 시스템 고급트랙,” 산업통상자원부 (2018. 05. - 현재).

기술지도

- [1] 김승은, 백준혁, 양승진, 박종락, “LED 랜턴의 조명부 배광해석 및 최적 배광을 위한 광학 구조 설계,” ㈜속엔, 조선대학교 2016년 BI 보육역량강화사업 (2016. 6. 1. - 2016. 8. 31.).

교육훈련

- [1] “LightTools활용 LED해양, 선박특수조명 광학계 설계(중급과정),” 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터 (2016. 12. 01. - 2016. 12. 02.).
- [2] “ANSYS Mechanical 기본,” 태성에스앤이 (2017. 02. 14. - 2017. 02. 16.).
- [3] “LightTools를 이용한 특수조명 설계 실습,” 한국광기술원 (2017. 11. 09. - 2017. 11. 10.).
- [4] “LightTools Advanced(자동차 조명광학계 설계 실무),” (주)싸이팜 (2018. 02. 05. - 2018. 02. 06.).