

# 레이저 흡수에 의해 발생하는 열 효과의 빔 직경 및 흡수 계수 의존성

장 경 민\*, 백 준 혁\*, 양 승 진\*, 정 재 훈\*\*, 권 민 기\*, 박 종 락\*<sup>†</sup>

\*조선대학교, 광기술공학과

\*\* (주) 다스디자인

## Beam Diameter and Absorption Coefficient Dependences of Thermal Effects Induced by Laser Absorption in Optical Media

Kyungmin Jang\*, Jun-Hyeok Baek\*, Seung-Jin Yang\*, Jae Hoon Jung\*\*, Min-Ki Kwon\*, and Jong-Rak Park\*<sup>†</sup>

\*Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

\*\*Das Design Co., Gwangju Design Center, Gwangju 61012, Korea

(Received : May. 18, 2016, Revised : Jun. 16, 2016, Accepted : Jun. 21, 2016)

**Abstract** : The thermal effects induced by pulsed laser absorption in an optical medium were simulated. In particular, the dependences of maximum temperature increase and decay time constant on the laser beam diameter and the medium absorption coefficient were investigated. 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.

**Keyword** : Laser absorption, Thermal effects, Laser beam diameter, Absorption coefficient

### 1. 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].

레이저를 이용하여 촉각 자극(Tactile Sensations)을 발생시키고자 하는 연구가 최근 활발히 진행 중에 있다 [3-9]. 피부 조직에서의 레이저 흡수 [10], 레이저 최대 허용 노출(MPE, Maximum Permissible Exposure)에서의 온도 상승 [11], 레이저 흡수에 의해 발생하는 축 방향 변위의 펄스 폭 의존성 [12] 등에 대한 기초 연구 또한 수행되었다. 기존에 사용되었던 촉각 자극 유도 기술은 주로 통증 및 가려움 유발을 위해 기계적 [13], 열적 [13, 14], 전기적 [13, 15] 기술을 이용하여 피부에 직접적인 접촉을 해야 하며, 자극량, 자극 위치, 자극 형태 제어의 시공간적 한계를 가지고 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 레이저 유도 열탄성 효과(Laser-induced Thermoelastic Effects)를 이용하여 직접적으로 접촉하지 않으면서도 효과적으로 촉각 자극을 유도할 수 있는 새로운 촉감 제시 기술에 대한 연구가 활발히 수행되고 있는 것이다.

펄스 레이저 흡수 후 발생하는 열 효과는 레이저 유도 열탄성 효과를 이해하는데 매우 중요한 물리 현상이며, 레이저 흡수에 의한 열 효과의 레이저 펄스 폭

<sup>†</sup>Corresponding Author

성명 : 박종락

소속 : 조선대학교 광기술공학과

주소 : 광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)

전화 : 062-230-7036

E-mail : ejrpark@chosun.ac.kr

의존성에 대한 연구 결과가 최근 보고되었다 [16]. 본 논문에서는 펄스 레이저가 광학 매질에 흡수될 때 발생하는 열 효과의 레이저 빔 직경과 매질의 흡수 계수의 의존성에 대한 연구를 추가적으로 수행하였다. 레이저의 빔 직경과 매질의 흡수 계수를 변화시키며 열 확산 방정식(Thermal Diffusion Equation)을 풀어 시간에 따른 매질의 온도변화에 대한 해를 구하였다. 시뮬레이션을 위해 열 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent(ANSYS Incorporated, USA)를 사용하였다. 시뮬레이션 결과를 분석하여 최대 온도 상승치와 온도 시간 감쇠 상수의 빔 직경 및 흡수 계수 의존성에 대해 조사하였다.

## 2. 빔 직경 의존성

### 2.1 시뮬레이션 조건

빔 직경 의존성과 흡수 계수 의존성 관련 시뮬레이션을 위해 사용한 매질의 특성 상수와 레이저 파라미터는 참고문헌 [16]과 동일하다. 즉, 매질의 굴절률  $n_R$ , 질량 밀도  $\rho$ , 비열  $c$ , 열 전도도  $k$ 는 각각  $n_R = 1.4$  [17],  $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$  [18],  $c = 3400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [18],  $k = 0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [18]인 것으로 가정하였는데, 참고문헌 [17]과 [18]에 보고된 피부 조직에 대한 일반적인 특성 상수 값들이다. 레이저 파장  $\lambda$ 와 펄스 에너지  $E$ 는 각각  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $E = 2.5 \text{ mJ}$  인 것으로 가정하였다. 본 논문의 시뮬레이션 조건에 대해 예측된 최대 온도 상승치는 모두  $20^\circ\text{C}$  이하이었기 때문에 매질의 상변태는 고려하지 않았다. 또한 본 논문에서는 특정 상황에 대한 시뮬레이션을 수행하여 실험 결과와 비교하고자 한 것이 아니라 열 효과의 빔 직경 및 흡수 계수 의존성에 대한 이론적인 경향성만을 살펴보고자 하였기 때문에 매질 특성 상수의 온도 의존성 또한 무시하였다.

Figure 1은 ANSYS Fluent의 시뮬레이션 레이아웃을 보여주고 있다. 효율적인 시뮬레이션을 위해 원통 좌표계를 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 매질의 크기는 반경 10 mm, 두께 10 mm로 설정하였으며, 매질의 크기는  $0.02 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$ 이었다. Figure 1에서 매질의 아래쪽 면이 원통 좌표계에서의 대칭축(Symmetric Axis)이며, 오른쪽 면이 매질과 공기의 경계면이다. 매질과 공기의 경계면에는 표면 대류 조건(Surface Convection Condition)을 적용하였다. 표면 대류 조건에 사용된 열 전달 계수  $h$ 와 공기의 온도  $T_{air}$ 는 각각  $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  [19],  $T_{air} = 298 \text{ K}$  [19]인 것으로 가정하였다. Figure 1에서 위쪽 면과 왼쪽 면에는 등온 경계조건(지정된 표면온도, 298 K)을 부과하였다.

열 효과의 레이저 빔 직경 의존성에 대해 조사하기 위해 선정한 시뮬레이션 파라미터 조건은 Table 1과 같다. 레이저 펄스 폭  $\tau$ 를 5 ns으로 고정하고, 흡수 계수  $\alpha$ 가  $1 \text{ mm}^{-1}$ ,  $3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $6 \text{ mm}^{-1}$ 인 경우에 대해 레이저 빔 직경  $\phi(1/e$  기준)를 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 모두 단일

레이저 펄스가 매질에 조사된 것으로 가정하였다.

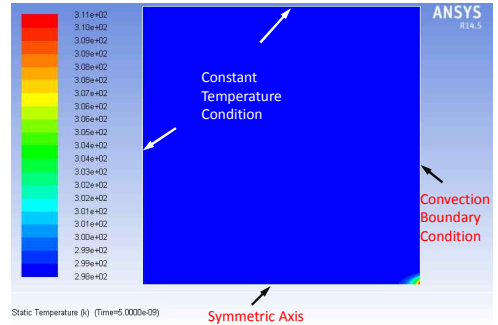


Figure 1. Simulation layout of ANSYS Fluent.

Table 1. Parameters chosen for the simulations of laser beam diameter dependence

Parameter	Value	Note
Laser Beam Diameter $\phi$	0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm	Varied
Absorption Coefficient $\alpha$	$1 \text{ mm}^{-1}$ , $3 \text{ mm}^{-1}$ , $6 \text{ mm}^{-1}$	Varied
Laser Pulse Width $\tau$	5 ns	Fixed

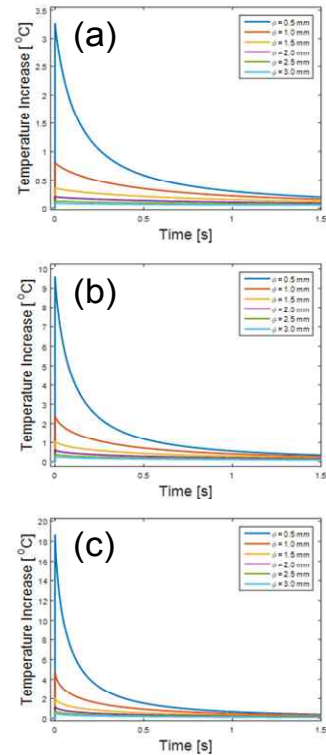


Figure 2. Simulation results of temperature increase at the beam center on the surface of the medium.

(a)  $\alpha = 1 \text{ mm}^{-1}$ , (b)  $\alpha = 3 \text{ mm}^{-1}$ , and  
(c)  $\alpha = 6 \text{ mm}^{-1}$ .

2.2 시뮬레이션 결과

Figure 2(a), (b), (c)는 각각 흡수 계수가  $1\text{ mm}^{-1}$ ,  $3\text{ mm}^{-1}$ ,  $6\text{ mm}^{-1}$ 인 경우 빔 직경의 변화에 따른 매질 표면에서 레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. Figure 3은 각 시뮬레이션 결과에서 최대 온도 상승치와 최대 온도의  $1/e$  수준까지 온도가 감소하는데 걸리는 시간으로 정의된 온도 시감쇠 상수를 추출하여 정리한 것이다.

Figure 3(a)와 (a')은 흡수 계수가  $1\text{ mm}^{-1}$ 인 경우에 대한 결과이다. 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 시감쇠 상수는 증가하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 효율적인 시뮬레이션 수행을 위해 시뮬레이션 분석 시간을 1.5 s로 제한하여 이 이상의 시간에 대해서는 시뮬레이션 결과를 구하지 않았다. 빔 직경이 2.5 mm, 3.0 mm인 경우 레이저 펄스 흡수 후 1.5 s가 지난 후에도 표면 온도가 최대 온도 상승치의  $1/e$  수준에 도달하지 않아 1.5 s까지의 시뮬레이션 결과로는 온도 시감쇠 상수를 결정할 수 없었다. 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수의 빔 직경 의존성을 정량적으로 분석하기 위해 멱함수(power function)를 이용한 곡선 맞춤(curve fitting)을 수행하였다. 최대 온도 상승치는 멱함수로 곡선 맞춤을 수행한 결과 빔 직경에 대해 -2승의 의존성을 갖고 있으며, 온도 시감쇠 상수는 약 1.7승의 의존성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

Figure 3(b)와 (b')은 흡수 계수가  $3\text{ mm}^{-1}$ 인 경우에 대한 결과이다. 이 경우에도 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 시감쇠 상수는 증가하였다. 최대 온도 상승치는 이 경우에도 빔 직경에 대해 -2승의 의존성을 갖고 있었으며, 온도 시감쇠 상수는 흡수 계수가  $1\text{ mm}^{-1}$ 인 경우 보다 감소하여 약 1.0승의 의존성을 갖고 있었다.

Figure 3(c)와 (c')은 흡수 계수가  $6\text{ mm}^{-1}$ 인 경우에 대한 결과이다. 이 경우 또한 펄스 빔 직경이 증가함에 따라 최대 온도 상승치가 감소하고 온도 시감쇠 상수는 증가하였다. 최대 온도 상승치의 경우 앞의 두 경우와 마찬가지로 빔 직경에 대해 -2승의 의존성을 갖고 있었으며, 온도 시감쇠 상수의 경우 흡수 계수가  $3\text{ mm}^{-1}$ 인 경우 보다 더 감소하여 약 0.7승의 의존성을 갖고 있었다.

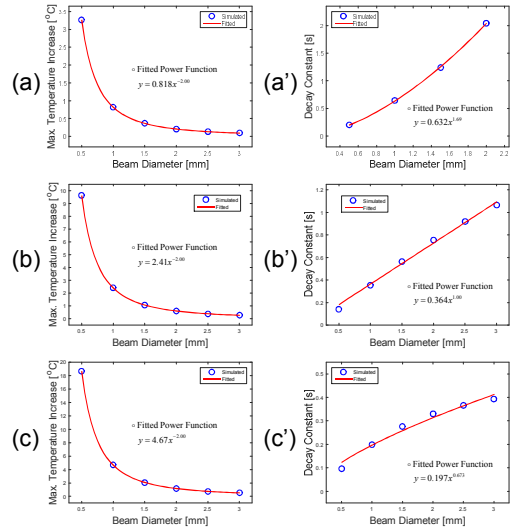


Figure 3. Simulated results of maximum temperature increase [(a), (b), and (c)] and decay time constant [(a'), (b'), and (c')] when  $\alpha = 1\text{ mm}^{-1}$  [(a) and (a')],  $\alpha = 3\text{ mm}^{-1}$  [(b) and (b')], and  $\alpha = 6\text{ mm}^{-1}$  [(c) and (c')].

2.3 논의

최대 온도 상승치는 흡수 계수와 무관하게 항상 빔 직경에 대해 -2승의 멱함수 의존성을 보였다. 펄스 폭이 짧은 경우 온도 상승치  $T$ 는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다 [20].

$$T = \frac{W}{\rho c} \tag{1}$$

위 식에서  $W$ 는 흡수 에너지 밀도(absorbed energy density)를 의미한다. 열 발생률(heat generation rate)  $q$ 는 흡수 파워 밀도(absorbed power density)에 해당하므로  $W$ 는 다음과 같이  $q$ 와 레이저 펄스 폭  $\tau$ 의 곱으로 계산된다.

$$W = q\tau \tag{2}$$

한편, 원통 좌표계에서 펄스 레이저의 매질 내 흡수에 의한 열 발생률  $q(r, z)$ 는 다음 식과 같이 주어진다 [16, 21].

$$q(r, z) = \alpha(1 - R) \frac{E}{\tau} \frac{2}{\pi\omega^2} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega^2}\right) \exp(-\alpha z) \tag{3}$$

위 식에서  $R$ 은 공기와 매질 경계면에서의 반사율이고,  $\omega$ 는  $1/e^2$  기준 레이저 빔의 반경을 의미한다.  $\omega$ 는  $1/e$  기준 레이저 빔의 직경인  $\phi$ 와  $\phi = \sqrt{2}\omega$ 인 관계

를 갖는다. 식 (3)은 레이저의 매질 내 흡수를 Beer-Lambert 법칙을 기반으로 계산하였음을 보여주고 있다. 본 논문에서는 빔 직경 별로 다른 렌즈를 사용하여 항상 집속된 레이저의 빔 허리(Beam Waist)에 매질 표면이 위치한다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우 레이저가 매질에 입사하는 각도는 항상  $0^\circ$ 를 유지한다. 입사 각도가  $0^\circ$ 일 때 반사율  $R$ 은 매질의 굴절률  $n_R$ 과 흡수계수  $\alpha$ 를 고려하여 다음 식과 같이 주어진다 [22].

$$R = \left| \frac{(n_R + i n_I) - 1}{(n_R + i n_I) + 1} \right|^2 \quad (4)$$

$$n_I = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (5)$$

굴절률  $n_R$ 이 1.4이고 흡수계수  $\alpha$ 가  $1 - 6 \text{ mm}^{-1}$  일 때, 반사율  $R$ 은 약 3.0%로 계산된다.

레이저 빔 중앙 지점( $r=0, z=0$ )의 온도가 제일 크게 상승하므로, 최대 온도 상승치  $T_{\max}$ 는 다음과 같은 표현식을 갖게 된다.

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{q(r=0, z=0)\tau}{\rho c} \quad (6) \\ &= \alpha(1-R) \frac{2E}{\pi\omega^2} \frac{1}{\rho c} \\ &\propto \frac{1}{\phi^2} = \phi^{-2} \end{aligned}$$

식 (6)은 최대 온도 상승치의 빔 직경에 대한 의존성을 직접적으로 보여주고 있는데, 시뮬레이션 결과가 보여준 -2승의 멱함수 의존성을 확인할 수 있다. 식 (6)에서 최대 온도 상승치는  $4\alpha(1-R)E/(\pi\rho c)$ 과 빔 직경 의존성을 나타내는  $\phi^{-2}$ 의 곱으로 표현됨을 알 수 있다. Figure 3(a), (b), (c)의 멱함수 곡선 맞춤 결과  $\phi^{-2}$ 항 앞의 곡선 맞춤 상수는 각각 0.818, 2.41, 4.67이었는데, 이 값들은 각 시뮬레이션 조건에 대해 수치적으로  $4\alpha(1-R)E/(\pi\rho c)$ 을 각각 계산한 값인 0.827, 2.48, 4.96  $^\circ\text{C} \cdot \text{mm}^2$ 과 최대 약 6% 이내에서 정량적으로 일치하였다. 이는 식 (3)을 이용하여 최대 온도 상승치의 빔 직경 의존성을 정량적으로 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 보여준다.

Figure 4는 흡수 계수가  $1 \text{ mm}^{-1}$ ,  $3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $6 \text{ mm}^{-1}$ 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)  $\tau_d$ 는 다음과 같이 주어진다 [23].

$$\tau_d = \frac{d^2}{D} \quad (7)$$

위 식에서  $d$ 는 온도가 상승된 영역의 특성 거리(characteristic length of heated region)를 의미하고,  $D$ 는 열 확산도를 의미한다. 열 확산도  $D$ 는 열 전도도  $k$ , 질량 밀도  $\rho$ , 비열  $c$ 와 다음과 같은 관계식을 만족한다 [24].

$$D = \frac{k}{\rho c} \quad (8)$$

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  $1.07 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 이다. 흡수 계수가  $6 \text{ mm}^{-1}$ 인 경우 침투 깊이는 약 0.17 mm이므로, 이 때 식 (7)을 사용하여 예측한 열 확산 시상수  $\tau_d$ 는 약 0.26 s이다. Figure 3에서 흡수 계수가  $6 \text{ mm}^{-1}$ 인 경우 온도 시감쇠 상수는 빔 직경에 상대적으로 둔감하며 열 확산 시상수  $\tau_d$ 인 0.26 s와 매우 근접한 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 이 경우 온도 시감쇠 상수는 열 확산 시상수와 거의 비슷한 값을 갖게 됨을 알 수 있다. Figure 4에 열 확산 시상수 값을 시뮬레이션으로부터 얻은 온도 시감쇠 상수와 함께 표시하였다.

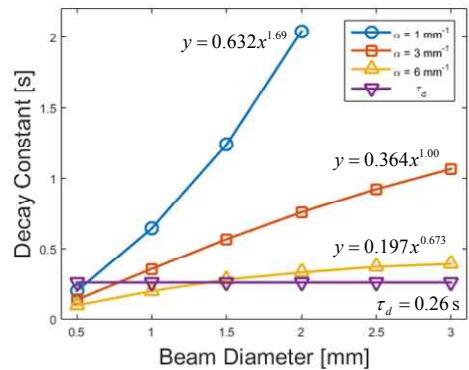


Figure 4. Simulated results of decay time constant as a function of beam diameter.

### 3. 흡수 계수 의존성

#### 3.1 시뮬레이션 조건

열 효과의 흡수 계수 의존성에 대해 조사하기 위해 선정된 시뮬레이션 파라미터 조건은 Table 2와 같다.

레이저 펄스 폭을 5 ns으로 고정하고 레이저 빔 직경이 0.5 mm, 3.0 mm인 경우에 대해 매질의 흡수 계수를 1 mm<sup>-1</sup>, 2 mm<sup>-1</sup>, 3 mm<sup>-1</sup>, 4 mm<sup>-1</sup>, 5 mm<sup>-1</sup>, 6 mm<sup>-1</sup>로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 피부 조직의 흡수 계수 값은 인종, 연령, 샘플 준비 및 측정 방법에 따라 가시광 파장 영역에서 0.002 - 10 mm<sup>-1</sup>의 매우 큰 편차를 갖고 있음이 알려져 있다 [25]. 레이저 유도 촉각 자극 실험(간접 자극)을 위해 참고문헌 [7]에서 사용한 매질의 흡수 계수는 약 4 mm<sup>-1</sup>이었다. 이에 근거하여 본 논문에서는 간접 자극 매질의 흡수 계수를 포함하고 피부 조직의 평균적인 흡수 계수를 포함하는 값인 1 - 6 mm<sup>-1</sup> 사이의 흡수 계수 값에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 2. Parameters chosen for the simulations of absorption coefficient dependence

Parameter	Value	Note
Laser Beam Diameter $\phi$	0.5 mm, 3.0 mm	Varied
Absorption Coefficient $\alpha$	1 mm <sup>-1</sup> , 2 mm <sup>-1</sup> , 3 mm <sup>-1</sup> , 4 mm <sup>-1</sup> , 5 mm <sup>-1</sup> , 6 mm <sup>-1</sup>	Varied
Laser Pulse Width $\tau$	5 ns	Fixed

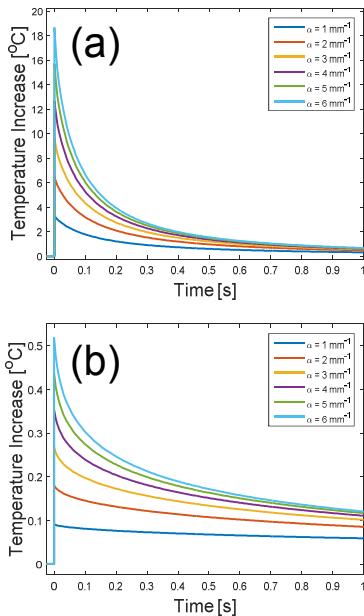


Figure 5. Simulation results of temperature increase at the beam center on the surface of the medium. (a)  $\phi = 0.5$  mm and (b)  $\phi = 3.0$  mm.

3.2 시뮬레이션 결과

Figure 5(a), (b)는 각각 빔 직경이 0.5 mm, 3.0 mm 일 때, 매질의 흡수 계수 변화에 따른 매질 표면에서

레이저 빔 중심점의 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 각 시뮬레이션 결과에서 최대 온도 상승치와 온도 시감쇠 상수를 추출하여 Figure 6에 정리하였다.

Figure 6(a)와 (a')은 빔 직경이 0.5 mm인 경우에 대한 결과이다. 매질의 흡수 계수가 증가함에 따라 최대 온도 상승치는 증가하고 온도 시감쇠 상수는 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 매질의 흡수 계수가 1 mm<sup>-1</sup>에서 6 mm<sup>-1</sup>까지 증가할 때 최대 온도 상승치는 약 3.3 °C에서 약 18.7 °C로 변화하여 거의 선형적으로 증가하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm<sup>-1</sup>에서 6 mm<sup>-1</sup>까지 증가할 때, 온도 시감쇠 상수는 약 0.2 s에서 약 0.1 s로 약 50% 정도 감소하였다. 최대 온도 상승치는 흡수 계수 변화에 대해 거의 1승의 의존성을 갖고 있어 정비례함을 확인할 수 있었다. 온도 시감쇠 상수는 약 -0.4승의 의존성을 갖고 있었다.

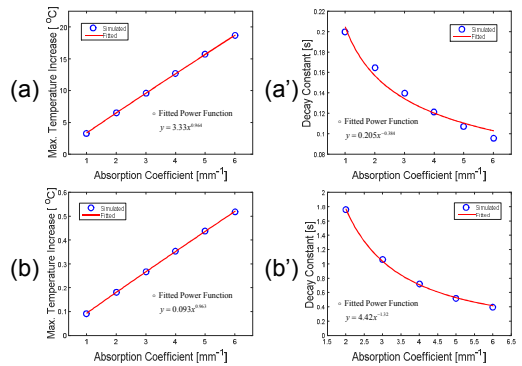


Figure 6. Simulated results of maximum temperature increase [(a) and (b)] and decay time constant [(a') and (b')] when  $\phi = 0.5$  mm [(a) and (a')] and  $\phi = 3.0$  mm [(b) and (b')].

Figure 6(b)와 (b')은 빔 직경이 3.0 mm인 경우에 대한 결과이다. 이 경우에도 매질의 흡수 계수가 증가함에 따라 최대 온도 상승치는 증가하였으며, 온도 시감쇠 상수는 감소하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm<sup>-1</sup>에서 6 mm<sup>-1</sup>까지 증가할 때 최대 온도 상승치는 약 0.09 °C에서 약 0.52 °C까지 거의 선형적으로 증가하였다. 온도 시감쇠 상수는 매질의 흡수 계수가 2 mm<sup>-1</sup>에서 6 mm<sup>-1</sup>까지 증가할 때 약 1.8 s에서 약 0.4 s까지 약 78% 감소하였다. 매질의 흡수 계수가 1 mm<sup>-1</sup>일 때 온도 상승치가 매우 낮고 온도 변화가 너무 천천히 일어나 온도 시감쇠 상수를 시뮬레이션 결과로부터 구할 수 없었다. 이 경우에도 최대 온도 상승치는 흡수 계수 변화에 대해 거의 1승의 의존성을 갖고 있어 정비례함을 확인할 수 있었다. 온도 시감쇠 상수는 약 -1.3 승의 의존성을 갖고 있어 빔 직경이 커짐에 따라 흡수 계수 의존성이 증가하고 있음을 알 수 있다.

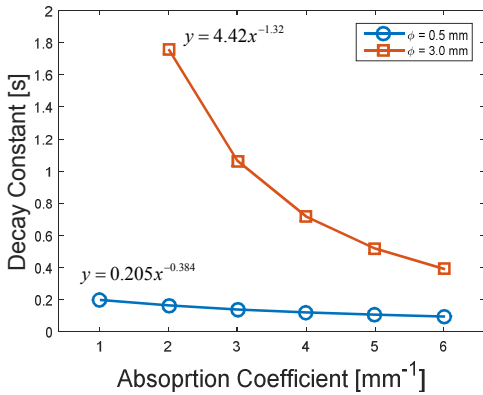


Figure 7. Simulated results of decay time constant as a function of absorption coefficient.

### 3.3 논의

최대 온도 상승치는 빔 직경과 거의 무관하게 항상 흡수 계수에 대해 1승의 멱함수 의존성(정비례)을 보였다. 최대 온도 상승치에 대한 식 (6)을 흡수 계수 의존성 관점에서 다시 살펴보면 다음과 같이 항상 흡수 계수에 정비례함을 확인할 수 있다.

$$T_{\max} = \alpha(1-R) \frac{2E}{\pi\omega^2 \rho c} \frac{1}{\alpha} \propto \alpha \quad (9)$$

식 (9)에서 최대 온도 상승치는  $2(1-R)E/(\pi\omega^2\rho c)$  과 흡수 계수  $\alpha$ 의 곱으로 표현됨을 알 수 있다. Figure 6(a), (b)의 멱함수 곡선 맞춤 결과  $\alpha$ 항 앞의 곡선 맞춤 상수는 각각 3.33, 0.093이었는데, 이 값들은 각 시뮬레이션 조건에 대해 수치적으로  $2(1-R)E/(\pi\omega^2\rho c)$ 을 각각 계산한 값인 3.31, 0.092  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}$ 과 최대 약 2% 이내에서 정량적으로 일치하였다. 이는 식 (3)을 이용하여 최대 온도 상승치의 흡수 계수 의존성을 정량적으로 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 다시 한 번 보여준다.

Figure 7은 빔 직경이 0.5 mm, 3.0 mm일 때 흡수 계수 변화에 따른 온도 시감쇠 상수의 변화를 함께 보여주고 있다. 빔 직경 3.0 mm에서 0.5 mm로 감소하였을 때, 온도 시감쇠 상수의 흡수 계수 의존성과 관련된 멱함수 승수가 약 -1.3승에서 약 -0.4승으로 절대값이 감소하였다. 승수의 절대값이 감소한다는 것은 온도 시감쇠 상수가 흡수 계수 변화에 둔감하게 변화한다는 의미이다. Figure 7을 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 거리

는 빔 직경과 밀접한 관련을 갖게 된다. 따라서, 온도 시감쇠 상수는 흡수 계수와는 거의 무관하고 빔 직경에 의존하는 값을 갖게 될 것이다. 식 (7)은 1차원 문제에 대해 적용할 수 있는 식이어서 일반적인 경우 빔 직경을 특성 거리  $d$ 에 대입하여 온도 시감쇠 상수를 계산할 수 없다. 일반적인 경우에 대해서는 보다 심도 있는 후속 연구가 수행되어야 할 것이다.

흡수 계수에 따른 매질 내부의 온도 분포 변화에 대해 추가적으로 살펴보았다. Figure 8은 레이저 펄스가 흡수된 직후(시간  $t = 5 \text{ ns}$ ) 레이저 빔의 중앙부에서 매질의 깊이 방향을 따라 형성된 온도 상승치에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 흡수 계수가 증가할수록 표면 근처에서 더 많은 흡수가 발생하여 표면 온도 상승치는 증가하고 침투 깊이는 감소함을 확인할 수 있다. 흡수 계수가  $3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $4 \text{ mm}^{-1}$ ,  $5 \text{ mm}^{-1}$ 일 때, 최대 온도 상승치의  $1/e$  수준으로 온도 상승치가 감소하는 깊이인 침투 깊이는 각각 0.33 mm, 0.25 mm, 0.2 mm 이었으며, 정확히 흡수 계수의 역수에 해당함을 확인할 수 있었다.

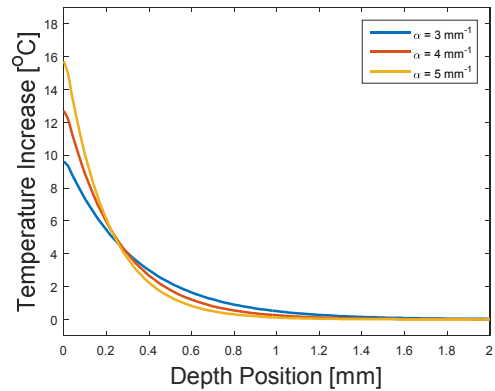


Figure 8. Simulated results of temperature increase as a function of depth position.

## 4. 결론

본 논문에서 레이저의 매질 흡수에 의해 발생하는 열 효과의 레이저 빔 직경 및 매질 흡수 계수 의존성을 조사하기 위해 열 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent를 사용하여 열 확산 방정식에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 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 연구 결과는 펄스 레이저 흡수에 의해 발생하는 열 효과의 예측과 레이저 유도 촉각 자극 유도 실험 계획 등에 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

## 감 사

본 논문은 산업통상자원부 디자인혁신역량개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10054112, 인터랙션 디자인 기반의 경관조명제품 개발).

## 참고문헌

- Koechner, W. and Bass, M., *Solid-State Lasers : A Graduate Text*, Springer-Verlag, New York, USA, 1-11 (2003).
- Niemz, M. H., *Laser-Tissue Interactions*, Springer-Verlag, New York, USA, 1-150 (2007).
- 정순철, 박종락, 최미현, 촉각 자극 시스템 및 그 방법, 대한민국 특허등록번호 10-1147850 (2012).
- 정순철, 정재훈, 박종락, 김형식, 정구인, 민병찬, 광-기계적 효과를 일으키는 레이저 장치 및 이를 이용한 방법, 대한민국 특허등록번호 10-1340358 (2013).
- Jun, J.-H. *et al.*, "Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations," *Sci. Rep.*, 5, 11016 (2015).
- Kim, H.-S. *et al.*, "Evaluation of the possibility and response characteristics of laser-induced tactile sensation," *Neurosci. Lett.* 602, 68-72 (2015).
- Lee, H. *et al.*, "Mid-air tactile stimulation using laser-induced thermoelastic effects: the first study for indirect radiation," *Proc. of the IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 374-380 (2015).
- Baek, J.-H. *et al.*, "Control of Laser-induced Mechanical Effects by Using a Dual-wavelength Irradiation Method," *J. Korean Phys. Soc.*, 67, 2146-2153 (2015).
- Kim, J.-Y. *et al.*, "Simulation Study of the Thermal and the Thermoelastic Effects Induced by Pulsed Laser Absorption in Human Skin," *J. Korean Phys. Soc.*, 68, 979-988 (2016).
- Shin, S.-S. and Park, J.-R., "Simulation of Laser Absorption in Tissues," *J. of Advanced Engineering and Technology*, 8(1), 59-64 (2015).
- Shin, S.-S., Kim, J.-Y., Jang, K., Baek, J.-H., Yang, S.-J. and Park, J.-R., "Temperature Increase in Human Tissues at Maximum Permissible Exposure Conditions of Laser Irradiation," *J. of Advanced Engineering and Technology*, 8(2), 99-103 (2015).
- Yang, S.-J., Baek, J.-H., Kim, J.-Y., Jang, K. and Park, J.-R., "Pulse-width Dependence of Axial Displacement Generated by Laser Absorption in Human Tissues," *J. of Advanced Engineering and Technology*, 8(3), 205-209 (2015).
- Neddermeyer, T. J., Fluhr, K. and Lotsch, J., "Principle components analysis of pain thresholds to thermal, electrical, and mechanical stimuli suggests a predominant common source of variance," *Pain*, 138, 286-291 (2008).
- Wong, F., Vierck, C. J., Riley III, J. L., King, C. and Mauderli, A. P., "A new thermal stimulation method for human psychophysical studies: Pain intensity clamping," *Neurosci. Lett.*, 188, 83-88 (2010).
- Ikoma, A., Handwerker, H., Miyachi, Y. and Schmelz, M., "Electrically evoked itch in humans," *Pain*, 113, 148-154 (2005).
- Jang, K., Yang, S.-J., Baek, J.-H., Kim, J.-Y., Jung, J. H., Kwon, M.-K. and Park, J.-R., "Pulse-width Dependence of Thermal Effects Induced by Laser Absorption in Optical Media," *J. of Advanced Engineering and Technology*, 9(1), 1-7 (2016).
- Salomatina, E., Jiang, B., Novak, J. and Yaroslavsky, A. N., "Optical properties of normal and cancerous human skin in the visible and near-infrared spectral range," *J. Biomed. Opt.* 11, 064026 (2006).
- Jean, M., Schulmeister, K. and Stuck, B. E., "Computer modeling of laser induced injury of the skin," *ILSC Conf. Proc.*, 366-370 (2013).
- Dai, T., Pikkula, B. M., Wang, L. V. and Anvari, B., "Comparison of Human Skin Opto-Thermal Response to Near-Infrared and Visible Laser Irradiations: A Theoretical Investigation," *Phy. Med. Biol.* 49, 4861-4877 (2004).
- A. J. Welch, A. J. and van Gemert, M. J. C. (Eds.), *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*, Springer, Heidelberg, Germany, 385-409 (1995).
- Marchandise, E., Mouraux, A., Plaghki, L. and Henrotte, F., "Finite element analysis of thermal laser skin stimulation for a finer characterization of the nociceptive system," *Neurosci. Lett.* 223, 1-10 (2014).
- Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M. and Pedrotti, L. S., *Introduction to Optics*, Pearson, New York, USA, 491-509 (2007).
- Albagli, D., Dark, M., von Rosenberg, C., Perelma, L., Itzka, I. and Feld, M. S., "Laser-induced thermoelastic deformation: A three-dimensional solution and its application to the ablation of biological tissue," *Med. Phys.*, 21, 1323-1331 (1994).
- Kreith, F. and Bohn, M. S., *Principles of Heat Transfer*, Brooks/Cole, CA, USA, 73-169 (2006).

25. Lister, T., Wright, P. A., Chappell, P. H., "Optical properties of human skin," *J. Biomed Opt.*, 17, 090901 (2012).