

펨토초 레이저가 조사되는 동안의 금속 박막내의 비평형 에너지 전달 현상에 대한 수치해석 연구

論 文

56-2-22

Numerical Investigation on Nonequilibrium Energy Transfer in Thin Metal Film Structures during the Irradiation of Femtosecond Pulse Laser

沈 炯 燮* · 李 晟 赫†

(Hyung Sub Sim · Seong Hyuk Lee)

Abstract - The present study investigates numerically nonequilibrium energy transfer between electrons and phonons in metal thin films irradiated by ultrashort pulse lasers and it also provides the temporal and spatial variations of electron and phonon temperatures using the well-established two-temperature model(TTM) on the basis of the Boltzmann transport equation(BTE). This article predicts the crater shapes in gold film structures, and compares the results by using two-dimensional energy transport equation. From the results, it is found that nonequilibrium energy transfer between electrons and phonons takes place, and the equilibrium time increases with the increase of laser fluence. On the other hand, above threshold fluence the ablation time doesn't change nearly with increasing fluences. Compared with one-dimensional TTM, it also reveals that the temporal distributions of electron and phonon temperatures at the top surface estimated by using two-dimensional TTM have a similar tendency. The results show that two-dimensional TTM can simulate the crater shape of metals during the irradiation of femtosecond pulse lasers and the absorbed energy is propagated to z -direction faster than to r -direction.

Key Words : Femtosecond Laser(펨토초 레이저), Nonequilibrium Energy Transfer(비평형 에너지 전달), Two-Temperature Model(2-온도 모델), Crater Shape(과쇄형상), Ablation(어블레이션)

1. 서 론

최근 레이저를 이용한 기술은 미세가공, 담금질(annealing), 박막의 물성측정, 바이오 물질의 합성(synthesis) 및 손상(damage), 그리고 의학 분야 등에서 눈부시게 발전하였다[1-2]. 펄스지속시간(pulse duration time)이 펨토초(femtosecond: fs)를 갖는 극초단 펄스레이저는 불필요한 열 영향부를 현격히 감소시키므로 재료의 미세가공을 하는데 응용되고 있으며, 관련된 매커니즘 규명 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 그럼에도 불구하고, 에너지 전달 현상의 복잡성과 측정 장비의 한계성 때문에 펨토초 레이저가 조사되는 동안 재료 내부에 나타나는 에너지 전달 특성에 대해서 정확하게 밝혀지지 않고 있다. 극초단 펄스 레이저에 의한 재료내의 에너지 전달 현상은 광자(photon)에 의한 복사에너지가 전자(electron)에 흡수되고, 전자는 포논(phonon)으로 흡수한 에너지를 전달하는 과정으로 나타난다[4]. 본 연구에서 고려된 펨토초 레이저는 펄스지속시간이 140 펨토초로서 금 박막의 경우 일반적으로 전자-포논의 에너지 이완시간(energy relaxation time)이 70~120 피코초(picosecond: ps)보다 매우 짧다[5-6]. 일반적으로 10~100 펨토초의 에너지 이완시간을 갖는 전자-전자간의 에너지 전달이 전자-포논간

의 에너지 전달보다 먼저 발생하기 때문에 전자와 포논간의 에너지 비평형 현상(nonequilibrium energy transfer)이 나타난다[7]. 따라서 펨토초 레이저를 조사하는 경우 펄스지속시간과 에너지 전달에 참여하는 열전달자의 에너지 이완시간의 관계를 이해하는 것은 필수적이다.

많은 연구자들은 볼츠만 수송 방정식(BTE)으로부터 유도된 전자-포논간의 1 차원 에너지 전달 방정식을 이용하여 에너지 전달 현상을 연구하였다[8-11]. Qui와 Tien[8-10]은 볼츠만 수송 방정식을 이용하여 펨토초 레이저가 조사되는 동안 금속박막내부의 열전달 매커니즘을 연구하였고 볼츠만 방정식의 산란항을 양자역학적 해석을 통해서 단순화 하였다. 그들은 쌍곡선형 이온도 복사열전달 모델(hyperbolic two temperature radiation model)을 제안하였고, 극초단 펄스 레이저를 금속 박막에 조사하였을 때 전자와 포논간의 비평형 에너지 전달 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, Brorson등[12]이 수 피코초 레이저를 금속 박막에 조사하였을 때 나타나는 반사율 변화를 측정한 실험 결과와 비교함으로써 이온도 모델의 타당성을 검증하였다. Jiang과 Tsai[11]는 기존의 제시된 이온도 모델이 임계손상강도보다 높은 플루언스(fluence: J/cm^2)에 대해서 어블레이션 깊이(ablation depth)를 예측하는데 한계점이 있다고 지적하고 모든 상태량에 대해서 양자역학 해석 방법을 이용하여 페르미 온도보다 높은 온도영역에서의 펨토초 레이저가 조사되는 동안의 금속 박막 내부의 에너지 전달 현상을 해석하였다. 그러나 1 차원 2 온도 모델은 재료를 레이저로 가공하였을 때 나타나는 크레이터 형상을 예측할 수 없는 한계점이 있다. 펨토초 레이저의 빔의 크기가 수 ~ 수십 마이크로

† 교신저자, 正會員 : 中央大學 機械學科 助教授 · 工博
E-mail : shlee89@cau.ac.kr

* 非會員 : 中央大學 機械學科 碩士課程
接受日字 : 2006年 10月 9日
最終完了 : 2006年 12月 1日

정도로 크기 때문에 금속 박막의 반경 방향으로 레이저 에너지의 침투 효과를 고려하지 않을 수 없다.

본 연구에서는 2 차원 2 온도 모델을 이용하여 금 박막내의 전자와 포논간의 비평형 에너지 전달 현상을 해석하고, 펄스 레이저의 플루언스의 변화에 따른 시간과 공간상의 전자와 포논의 온도 분포 변화를 예측한다. 또한, 임계손상 강도(threshold fluence)보다 높은 레이저 플루언스에 대해 재료의 용융점(melting temperature)을 근거로 한 크레이터 형상(crater shape)을 예측한다. 특히 본 연구에서는 동일한 조건에서의 1 차원 2 온도 모델의 해석 결과와 비교함으로써 2 차원 2 온도 모델의 타당성을 검증하고 금 박막에 대한 펄스 레이저의 어블레이션 깊이와 형상을 예측한다.

2. 지배 방정식 및 해석 조건

극초단 펄스 레이저가 조사되는 동안 광자의 복사 에너지를 받은 전자는 에너지 이완시간의 차이에 의해서 포논과 에너지 비평형 상태를 나타낸다. 비평형 상태는 조사 시간이 지남에 따라 전자와 포논간의 에너지 교환을 통해서 평형 상태에 도달하게 되며 금 박막의 경우 수 ~ 수십 피코초 정도이다[5-6]. 따라서 전자와 포논간의 에너지 수송방정식(energy transport equation)은 다음과 같이 2 차원 원통 좌표계로 나타낼 수 있다[5,13].

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ k_e r \frac{\partial T_e}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right\} - G(T_e - T_l) + S(r, z, t) \quad (1)$$

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = G(T_e - T_l) \quad (2)$$

$$S(r, z, t) = \frac{2J}{\sqrt{\pi} \ln 2 t_p} (1 - R(t, r)) \times \exp \left\{ -4 \ln 2 \left(\frac{t}{t_p} \right)^2 - \int_0^z \alpha(t, r, z) dz - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

여기서 $C(T)$ 는 온도에 따른 열용량(heat capacity)을 의미하고 k_e 는 전자의 열전도도(electron thermal conductivity), 그리고 하첨자 e 와 l 은 전자와 포논을 의미한다. 또한, G 는 전자와 포논간의 열교환 계수(electron-phonon coupling factor)를 나타내고, S 는 레이저 복사에너지에 의한 생성항(source term)이다. J 는 레이저 플루언스를 의미하고, t_p 는 펄스지속시간, R 는 표면에서의 반사율(reflectivity), α 는 깊이 방향으로의 흡수율(absorption coefficient), 그리고 r_0 는 반경방향으로의 투과깊이(penetration depth)를 의미한다.

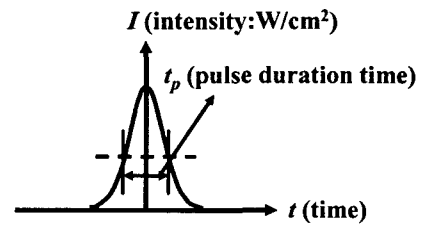
전자의 열용량은 전자의 온도에 비례하고 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$C_e = \gamma T_e \quad (4)$$

표 1 금 박막의 물성값

Table 1 The physical properties of gold thin film

Property	Value	Ref.
Electron number density	$5.9 \times 10^{28} \text{ [m}^{-3}\text{]}$	[15]
Electron heat capacity constant	$6.7 \times 10^{-4} \text{ [J/molK]}$	[14]
Electron thermal conductivity	315 [W/mK]	[15]
Lattice heat capacity	$2.5 \times 10^6 \text{ [J/m}^3\text{K]}$	[14]
Melting temperature	1337 [K]	[14]
Reflectivity	0.93	[8]
Absorption coefficient	$6.5 \times 10^7 \text{ [m}^{-1}\text{]}$	[8]
Electron-phonon coupling factor	$2.6 \times 10^{16} \text{ [J/m}^3\text{K]}$	[8]
R-directional penetration depth	$10 \times 10^{-6} \text{ [m]}$	[13]



Femtosecond Pulse Laser ($\lambda=1053 \text{ nm}$)

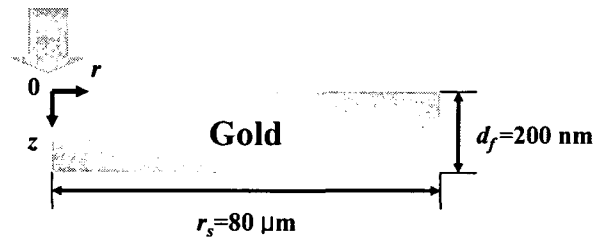


그림 1 펄스 레이저에 의해 가열되는 금속 박막의 개략도. Fig. 1 A schematic of gold thin film structure irradiated by femtosecond pulse laser.

여기서 γ 는 전자 열용량 상수(electron heat capacity constant)를 의미한다.

본 연구에서는 물성값 계산의 복잡성을 피하기 위해서 문헌[8, 13-15]으로부터 얻은 값을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 금속 박막은 금(Au) 박막을 채택하였고, 금의 물성을 Table 1에 정리하였다.

금속 박막에 대한 레이저 가열동안의 에너지 전달 현상을 해석하기 위해서 앞서 언급한 식 (1)과 식 (2)를 완전 암시 기법(fully implicit scheme)을 이용하여 차분하였고 공간에 대해 제어 체적 내 적분을 통해 차분방정식(discretised equations)을 유도하였다. 전자와 포논의 초기 온도는 300 K로 고정하고 금 박막 내의 전자수밀도(electron number density)는 5.9×10^{28} 로 고정하였다[15]. 표면에서의 경계 조건은 레이저의 복사에너지가 아주 짧은 시간 동안에 금 박막 내부로 흡수된다는 가정을 통해서 다음과 같이 적용한다.

$$T_{e,l}(z, r = r_s) = 300 \text{ K} \quad (5)$$

$$\left. \frac{dT_{e,l}}{dr} \right|_{z,r=0} = \left. \frac{dT_{e,l}}{dz} \right|_{z=0,r} = \left. \frac{dT_{e,l}}{dz} \right|_{z=d,r} = 0 \quad (6)$$

시간에 대한 반복계산을 통해 전자와 포논 온도들의 해를 구했고 수렴조건은 온도들의 상대적 변화율이 10^{-4} 보다 작고 에너지 방정식의 잔차(residual)들이 10^{-4} 보다 작은 경우를 적용하였다. 그림 1은 본 연구에서 수행한 시뮬레이션의 개략도이며, 레이저의 파장(wavelength)은 1053 nm이고, 펄스 지속시간은 140 fs이다. 금 박막의 두께는 200 nm이고 반경은 80 μm 이다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 시간과 공간에 따른 1 차원과 2 차원 이온도 모델의 전자와 포논의 온도 변화를 보여주는 그림이다. 펄스 지속시간이 140 fs이고 레이저 플루언스는 1.0 J/cm^2 가 고려된다. 두께가 200 nm이고 반경이 80 μm 인 금 박막의 2 차원 이온도 모델의 해석 결과와 본 연구자의 기존 1 차원 해석 결과를 비교한다[16]. 2 차원의 해석 결과는 z 와 r 의 좌표가 0(zero)일 때 표면에서의 전자와 포논의 온도 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 고려된 2 차원 이온도 모델은 1차원 이온도 모델과 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 2 (a)에서 펄초 레이저가 금 박막에 조사되는 동안의 전자와 포논의 에너지 이완 시간이 펄스 지속시간보다 길기 때문에 전자와 포논간의 에너지 비평형 상태가 나타나는 것을 확인할 수 있고, 전자와 포논이 에너지 평형 상태를 이를 때까지 걸리는 시간은 대략 40 ps 정도이다. 그림 2 (b)는 시간이 1.0 피코초이고 반경이 0(zero)일 때, z 방향으로 전자와 포논의 공간적인 온도 분포를 의미한다. 펄초 레이저의 영향으로 박막의 상부 표면에서는 전자의 온도가 급격하게 상승하는 반면, 낮은 전자 열전도도 때문에 하부 표면에서의 온도가 상부만큼 상승하지 않는 것을 알 수 있다. 표면 근처에서 전자와 포논의 에너지 교환이 발생하며, 하부로 갈수록 에너지의 전달이 일어나지 않고 포논의 온도가 거의 상온 상태로 유지되고 있다.

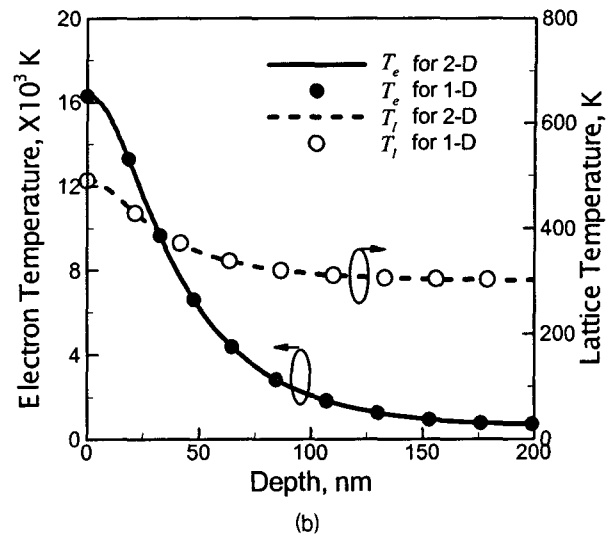
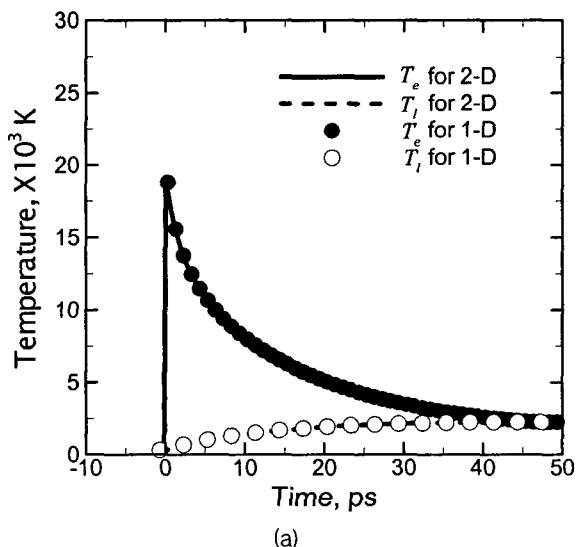


그림 2 1 차원과 2 차원 이온도 모델의 시간과 공간의 변화에 따른 전자와 포논의 온도: (a) 전자와 포논 온도의 시간에 따른 변화 비교; (b) 시간이 1.0 ps이고 반경이 0(zero)일 때의 깊이 방향(z -direction)으로의 전자와 포논의 온도 비교.

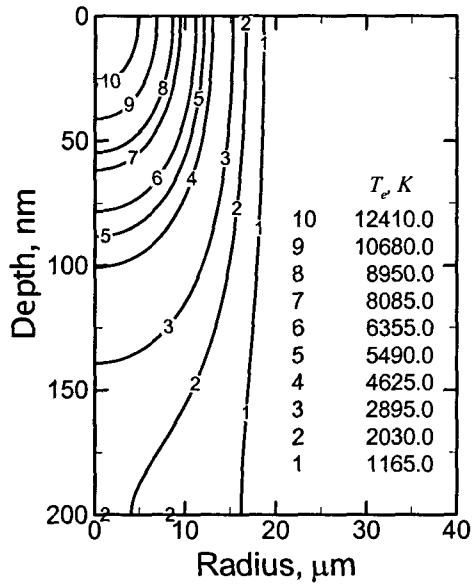
Fig. 2 The temporal and spatial responses of electron and phonon temperatures by using the one-dimensional TTM and two-dimensional TTM: (a) the electron and phonon temperatures with respect to time at the top surface; (b) comparison of electron and phonon temperatures at $r=0$ and $t=1.0$ ps at different depths.

그림 3과 그림 4는 2 차원 이온도 모델을 이용하여 레이저 플루언스가 1.5 J/cm^2 일 때의 시간에 따른 전자와 포논 온도의 분포를 보여준다. 금 박막의 두께를 200 nm, 반경을 80 μm 으로 고정하고, z 축 방향으로 레이저를 조사할 때를 고려하였다. 전자의 온도가 최대가 될 때의 시간과 그 이후 전자-전자와 전자-포논간의 에너지 교환에 의해 비평형 상태가 이완되는 과정동안, 최종적으로 전자와 포논이 열적 평형 상태에 도달하였을 때의 전자와 포논의 온도 분포를 비교한다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 레이저가 조사되는 초반에 펄초 레이저의 복사에너지가 국부적으로 집중되어 상대적으로 열용량이 작은 전자의 온도를 급격하게 상승시킬 수 있고 따라서 급격하게 상승한 상부 표면의 전자들은 주위의 전자들과 에너지 이완을 통해 주변의 전자의 온도를 상승시킨다. 전자의 온도가 최대인 시간을 지남에 따라 초반에 급격하게 상승한 전자들은 가지고 있는 에너지를 포논에 전달하게 되고 전자의 온도는 점차 감소한다. 전자로부터 에너지를 받은 포논은 대략 6.0 ps 정도에서 금 박막의 용융점보다 커지게 되고 어블레이션이 발생한다고 그림 4를 통해서 확인할 수 있다. 본 연구에서 적용한 모델은 레이저가 조사되는 동안의 발생하는 상폭발(phase explosion)이나 재료의 항복응력(yield stress) 초과에 의한 재료 파괴 현상을 고려하지 않았기 때문에 정확한 어블레이션을 예측하는데 한계가 있다. 그러나 본 연구에서는 2 차원 모델을 이용하여 공간상의 에너지 전달 과정을 보여줌으로써 크레이터 형상을 예측할 수 있다.

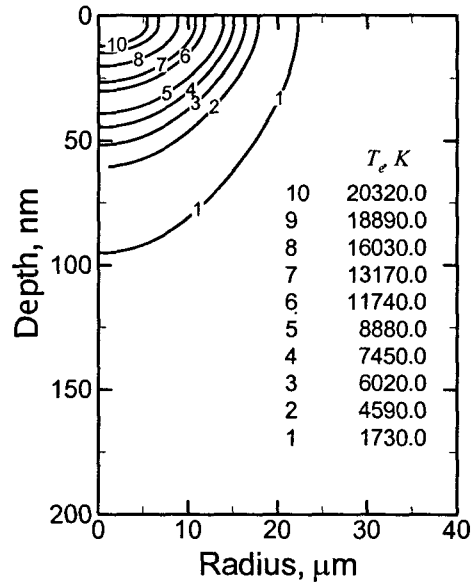
그림 5는 레이저 플루언스에 따른 전자와 포논간의 에너지 비평형 상태의 차이를 나타낸다. 입사되는 레이저 플루언스의 강도가 증가할수록 국부적으로 레이저의 에너지가 집중되어 재료내의 에너지 흡수량이 증가하므로 전자온도를 증가시키고 더 높은 에너지를 가진 전자 때문에 전자와 포논간의 에너지 비평형을 유지하는 시간은 증가한다. 또한, 레이저의 플루언스가 증가함으로써 포논에 비해서 상대적으로 열용량이 작은 전자가 포논에 비해서 상대적으로 온도가 더 크게 증가함으로써 전자와 포논간의 비평형 정도도 더 크게 나타난다. 그림 5에서처럼, 플루언스가 다른 3가지 케

이스에 대해서 가장 낮은 0.5 J/cm²일 때 평형상태온도까지 도달하는데 걸리는 시간은 35 ps, 1.5 J/cm²일 때는 54 ps, 가장 높은 4.0 J/cm²일 때는 76 ps로 나타난다.

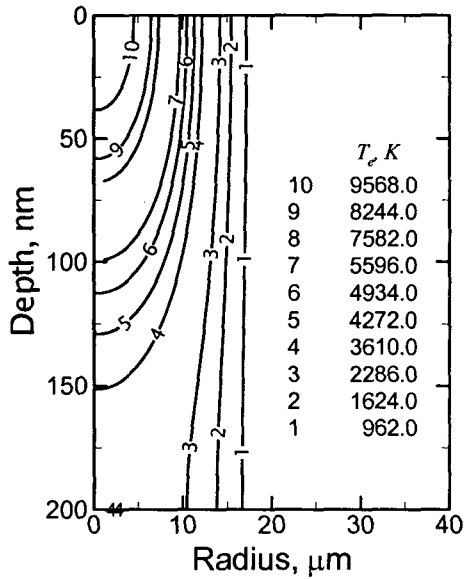
레이저 플루언스가 변함에 따라 금 박막이 용융점에 도달하는 시간을 그림 6에서 보여준다. 레이저 플루언스를 0.5 J/cm² 부터 4.0 J/cm²까지 변화시키면서 금 박막이 용융점 (1337 K)까지 도달하는데 걸리는 시간을 예측한다. 플루언스가 증가할수록 어블레이션이 일어나는데 걸리는 시간이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 레이저 복사 에너지량이 증가할수록 전자에 흡수되는 에너지의 양이 많아지고, 높



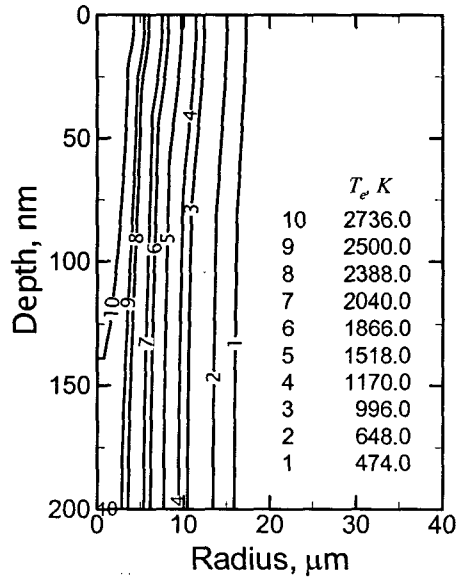
(a) $t=0.16$ ps



(b) $t=5.16$ ps



(c) $t=10.16$ ps



(d) $t=55.16$ ps

그림 3 레이저 플루언스가 1.5 J/cm²일 때의 시간에 따른 전자의 온도 분포.

Fig. 3 The spatial distributions of electron temperatures at different times when $J=1.5$ J/cm².

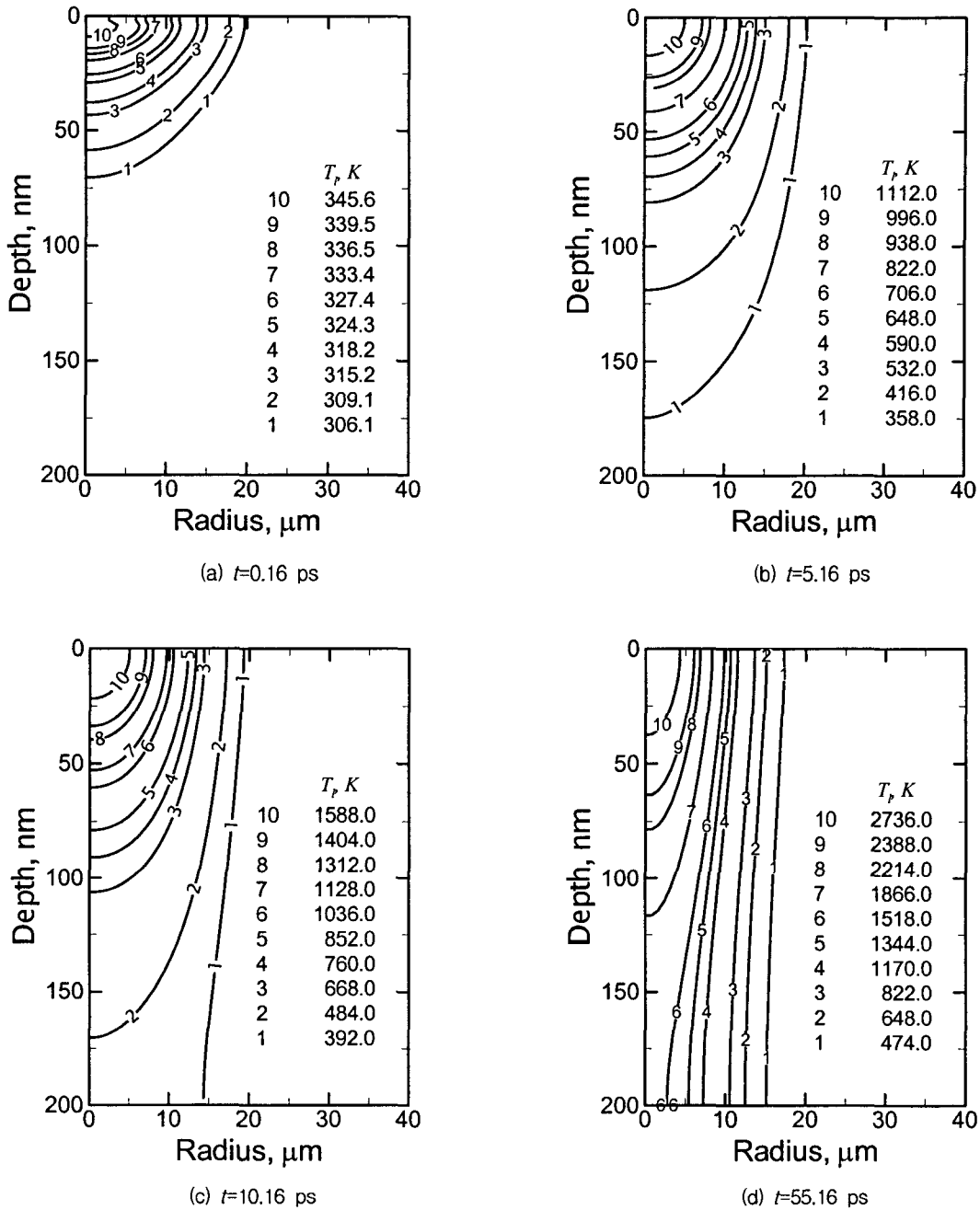


그림 4 레이저 플루언스가 1.5 J/cm^2 일 때의 시간에 따른 포논의 온도 분포.
 Fig. 4 The spatial distributions of phonon temperatures at different times when $J=1.5 \text{ J/cm}^2$.

은 에너지를 가진 더운 전자(hot electron)는 포논과 에너지 이완을 빠르게 함으로써 포논의 온도를 더 빠르게 증가시키는 것이다. 그러나 한계 플루언스에 도달하면 더 이상 어블레이션 시간은 증가하지 않는다.

그림 7은 금 박막에 펨토초 레이저를 조사하는 동안의 레이저 플루언스에 따른 어블레이션 깊이와 크레이터 형상의 변화를 보여준다. 레이저 플루언스가 0.8 J/cm^2 부터 4.0 J/cm^2 까지의 변화를 고려하고, 펄스지속시간은 140 fs 로 고정하였으며 박막 두께와 반경은 200 nm 와 $80 \mu\text{m}$ 이다. 레이저 플루언스가 1.5 J/cm^2 가 되었을 때, 200 nm 의 금 박막이

관통되는 것을 확인할 수 있다. 레이저 플루언스가 증가할수록 r 방향으로의 에너지 전달량이 증가하여 금 박막의 어블레이션 되는 반경을 증가시킨다. 펨토초 레이저는 재료를 가공하는데 좋은 가로-세로비(aspect ratio)를 얻을 수 있어서 정밀한 가공을 하는데 장점이 있다. 또한, 본 연구에서는 2차원 이온도 모델을 이용하여 펨토초 레이저가 조사되는 동안 금 박막의 어블레이션 크레이터 형상의 변화를 예측하였다. 그림 8은 레이저 플루언스가 2.0 J/cm^2 일 때 시간에 따른 금 박막의 포논 온도의 분포를 보여준다. 약 5.0 ps 에서 금 박막의 어블레이션이 발생하며 지속적으로 전자와 포논

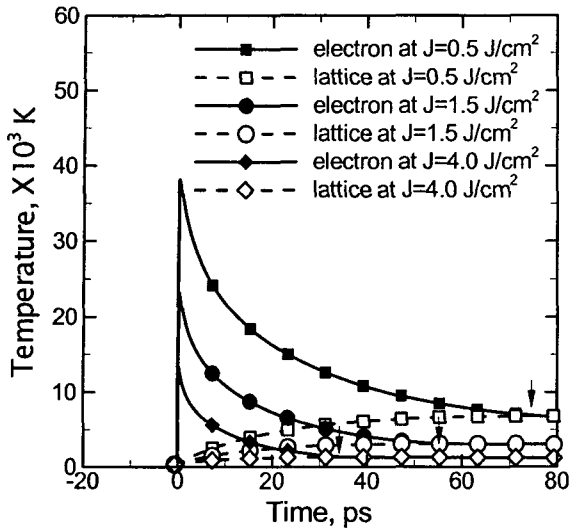


그림 5 레이저 플루언스에 대한 시간에 따른 금 박막 표면에서의 전자와 포논 온도의 비평형 상태 비교.
 Fig. 5 Comparison of nonequilibrium state between electrons and phonons at the top surface with respect to different laser fluences.

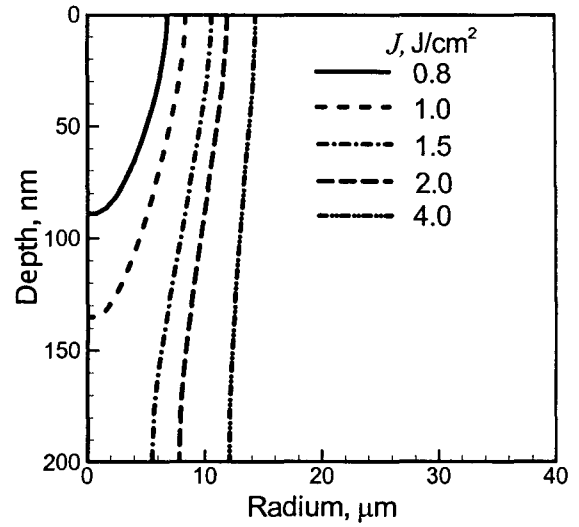


그림 7 조사되는 레이저 플루언스에 따른 고정된 시간에서의 금 박막의 크레이터 형상 비교.
 Fig. 7 Comparison of crater shapes for different laser fluences in gold thin film irradiated by femtosecond laser.

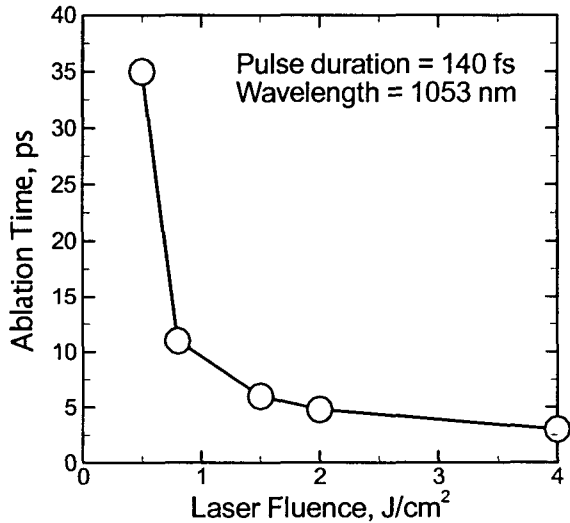


그림 6 레이저 플루언스에 따른 금 박막의 용융점 이상까지 상승하는데 걸리는 시간.
 Fig. 6 Influence of laser fluence on ablation times of gold thin film.

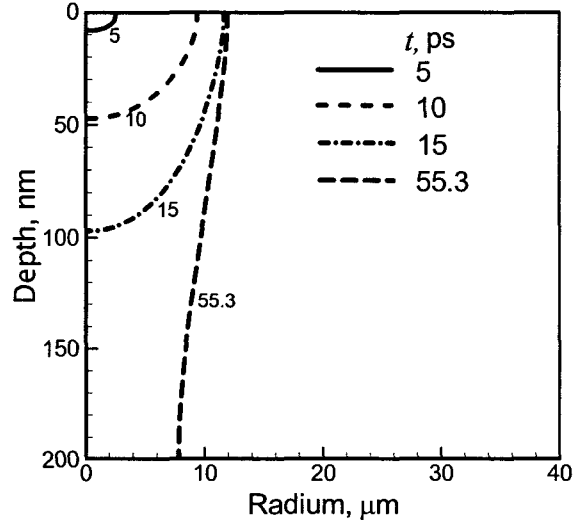


그림 8 레이저 플루언스가 2.0 J/cm²일 때의 시간 경과에 따른 크레이터 형상의 변화.
 Fig. 8 The variations of crater shapes with respect to time at $J=2.0 \text{ J/cm}^2$.

간의 에너지 이완 과정을 통해서 에너지가 전달된다. 따라서 시간이 지남에 따라 크레이터 형상이 점점 더 크게 나타난다. 본 연구에서 이용한 2 차원 이온도 모델을 통해 시간이 지남에 따라 어블레이션이 진행되는 방향과 크레이터 형상을 알 수 있으므로 실험 결과와 직접적인 비교를 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 펨토초 레이저에 의해 가열 된 금 박막내의 전자와 포논간의 비평형 열전달 현상과 용융점을 기준으로 레이저 플루언스에 따른 크레이터 형상의 변화를 예측해 보았다. 또한, 1 차원 이온도 모델과 2 차원 이온도 모델을 상호 비교를 통해서 본 연구에서 이용된 2차원 이온도 모델의 타당성을 검증하였다. 2 차원 이온도 모델에서 금 박막 내의 전자와 포논의 에너지 이완시간의 차이 때문에 비평형 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 레이저 플루언스가

증가함에 따라 비교적 낮은 열용량을 가지는 전자가 포논에 비해 더 빨리 온도가 증가하기 때문에 전자와 포논간의 비평형 정도가 더 커진다. 금 박막의 용융점까지 도달하는 시간이 레이저 플루언스가 증가함에 따라 급격하게 빨라진다. 레이저 플루언스가 한계 플루언스보다 커지면 어블레이션 시간은 거의 변하지 않는다. 그리고 펄스 레이저에 의한 금 박막의 내의 에너지 전달은 r 방향보다 z 방향으로 더 잘 전달되는 특징을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에 적용한 모델은 상폭발 현상, 극초단 펄스레이저에 의한 재료 내부에 발생하는 열탄성의 크기가 항복강도를 넘어서는 파쇄현상, 재료 내부의 팽창, 용융물의 유동, 그리고 재료의 물성들의 변화를 고려하지 않고 있다. 본 연구에서 고려되지 못한 사항들을 보완하기 위해서 지속적인 연구를 진행할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-041-D00103)

참고 문헌

[1] C.L. Tien, A. Majumdar, and F.M. Geer: "Micro-scale Energy Transport," Taylor & Francis, USA, 1998.
 [2] T.Q. Qiu, and C.L. Tien, "Short-Pulse Laser Heating on Metals," Int. J. Heat Mass Transfer, 35, pp. 719-726, 1992.
 [3] M. Lapczynya, K.P. Chen, P.R. Herman, H.W. Tan, and R.S. Marjoribanks, "Ultra High Repetition Rate (133MHz) Laser Ablation of Aluminum with 1:2-ps Pulses," Appl. Phys. A. 69[Suppl.], pp. S883-S886, 1999.
 [4] S.H. Lee, J.S. Lee, S. Park, and Y.K. Choi, "Numerical Analysis on Heat Transfer Characteristics in Silicon Heated by Picosecond-to-Femtosecond Ultra-Short Pulse Laser," 대한기계학회논문집 B권, 제 26권 제 10호, pp. 1427-1435, 2002.
 [5] D.Y. Tzou, "Macro-to-Microscale Heat Transfer," Taylor & Francis, USA, 1997.
 [6] R.W. Schoenlein, W.Z. Lin, J.G. Fujimoto, and G.L. Eesley, "Femtosecond Studies of Nonequilibrium Electronic Processes in Metals," Phys. Rev. Lett., 58, pp. 1680-1683, 1987.
 [7] I.H. Chowdhury, and X. Xu, "Heat Transfer in Femtosecond Laser Processing of Metal," Numerical Heat Transfer Part A, 44, pp. 219-232, 2003.
 [8] T.Q. Qiu, and C.L. Tien, "Short-Pulse Laser Heating on Metals," Int. J. Heat Mass Transfer, 35, pp. 719-726, 1992.
 [9] T.Q. Qiu, and C.L. Tien, "Heat Transfer Mechanisms during Short-Pulse Laser Heating of Metals," ASME J. Heat Transfer, 115, pp. 835-841, 1993.

[10] T.Q. Qiu, T. Juhasz, C. Suarez, W.E. Bron., and C.L. Tien, "Femtosecond Laser Heating of Multi-Layer Metals-II Experiments," Int. J. Heat Mass Transfer, 37, pp. 2799-2808, 1994.
 [11] L. Jiang, and H.L. Tsai, "Improved Two-Temperature Model and Its Application in Ultrashort Laser Heating of Metal Films," J. Heat Transfer, 127, pp. 1167-1173, 2005.
 [12] S.D. Brorson, A. Kazeroonian, J.S. Moodera, D.W. Face, T.K. Cheng, E.P. Ippen, M.S. Dresselhaus, and G. Dresselhaus, "Femtosecond Room-Temperature Measurement of the Electron-Phonon Coupling Constant λ in Metallic Superconductors," Phys. Rev. Lett. 64, pp. 2173-2175, 1990.
 [13] H. Wang, W. Dai, and R. Melnik, "A Finite Difference Method for Studying Thermal Deformation in a Double-Layered Thin Film Exposed to Ultrashort Pulsed Lasers," Int. J. Thermal Sciences, article in press, 2006.
 [14] N.W. Ashcroft, and N.D. Mermin, "Solid State Physics," Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1976.
 [15] C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics," John Wiley & Sons, New York, 1986.
 [16] H.S. Sim, H.R. Gwon, Y.S. Cho, J.M. Kim, and S.H. Lee, "Numerical Investigation on Ultrashort Pulse Laser Irradiations with Thin Metal Film Structures Considering Quantum Effects," Proceedings of ICCMSE 2006, 7, pp. 503-506, 2006.

저 자 소 개



심형섭 (沈炯燮)

1980년 5월 3일생, 2006년 중앙대학교 기계공학부 졸업, 2006년~현재 동 대학원 기계공학부 대학원 석사과정.
 Tel : 02-823-5332
 Fax : 02-814-9476
 E-mail : deaman14@hanmail.net



이성혁 (李晟赫)

1971년 2월 1일생, 1993년 중앙대학교 기계공학부 졸업, 1999년 동대학원 기계공학 졸업(공학박사), 2004년~현재 중앙대학교 기계공학부 조교수.
 Tel : 02-820-5254
 Fax : 02-814-9476
 E-mail : shlee89@cau.ac.kr