

◆특집◆ 첨단레이저 응용 미세가공기술

펨토초 레이저 재료가공 공정의 이론적 해석

김동식*, 오부국**

Numerical Analysis of Femtosecond Laser Material Processing

Dong Sik Kim* and Bu Kuk Oh**

Key Words : Femtosecond laser (펨토초 레이저), Phase explosion (상폭발), Ablation (어블레이션), Numerical analysis (수치해석), Spallation (파쇄), Electrostatic removal (정전기적 제거)

1. 서론

펨토초(fs) 펄스폭을 갖는 레이저의 발전/증폭 기술의 상용화와 급격한 발전은 레이저 미세가공 기술에 있어서 새로운 장을 열었고, 근래 이에 관한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다. 이는 현재 상용화된 재료가공 공정에 많이 이용되는 나노초(ns) 펄스와 달리 피코초(ps) 이하의 지속시간을 갖는 펨토초 펄스가 근본적으로 다른 특징을 지니고 있기 때문이다. 먼저, 펨토초 펄스의 경우 열확산 길이가 나노초에 비해서 매우 작고 플라즈마나 유동장의 형성 이전에 어블레이션(ablation)이 일어나므로 열영향부 생성과 유체역학적 효과로 인한 가공정밀도 저하를 크게 줄일 수 있다. 또한 펨토초 단위의 극히 짧은 펄스는 집속면의 출력밀도를 10^{15} W/cm^2 수준까지 올릴 수 있도록 해 준다. 이러한 높은 조사도는 여러가지 측면에서 레이저-물질 사이의 상호작용을 본질적으로 변화시키고 새로운 현상들을 유발한다. 예를 들면 다광자흡수(multiphoton absorption) 기작에 의해서 광투과성 재

료가 절연파괴되는 현상을 이용하면 투명한 재질의 시편을 가공할 수 있고, 회절한계(diffraction limit)을 넘어서 보다 정밀하게 재료를 가공할 수도 있다. 이처럼 펨토초 레이저의 특성은 다양한 가공기술분야에서 새로운 기회를 제공하고 있음에 따라 펨토초 펄스와 물질 사이의 상호작용 해석에 있어서도 이전과는 본질적으로 다른 접근법을 요구한다. 특히 Fig.1 에 도시된 것처럼 펨토초 레이저와 재료의 상호작용에서, 입사된 레이저 에너지는 초기에 전자를 여기시키는데 이용되고 그 후 펄스폭보다 훨씬 긴 시간에 걸쳐서 고온의 전자 에너지가 고체 격자(lattice)로 이완된다. 따라서 고체 내에 존재하는 전자와 이온간 에너지의 비평형 상태를 반드시 고려하여 해석을 수행해야 하며 다양한 흡수 기작을 고려한 재료의 어블레이션 모델의 개발도 필수적이다. 이 글에서는 금속재료를 중심으로 펨토초 레이저 가공 공정의 해석을 위한 이론 모델 및 최근의 연구동향을 분석 정리하고, 펨토초 어블레이션 현상을 이론적으로 모사하기 위해 현재 진행 중인 수치해석 연구의 결과를 간략히 소개한다.

2. 펄스레이저-재료 상호작용의 이론적 해석

레이저 재료가공 공정의 해석은 레이저 빔을 흡수하는 재료와 레이저로부터 방출되는 전자기파 사이의 물리, 화학적 상호작용에 대한 이해를 바

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

Tel. 054-279-2179, Fax. 054-279-3199

Email dskim87@postech.ac.kr

레이저 가공과 미세열전달 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

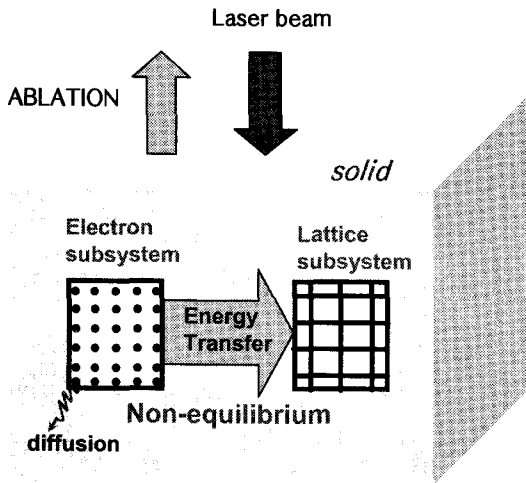


Fig. 1 Energy transfer in solid heated by a femtosecond laser pulse

탕으로 한다. 레이저-재료 상호작용 시 발생하는 현상은 (1) 가열, 열변형, 용융, 기화와 같은 열적 인 효과(photothermal effect), (2) 재료 내부의 응력 발생과 같은 광기계적 효과(photomechanical effect), (3) 광화학적 효과(photochemical effect) 등으로 크게 분류할 수 있으며^{1,3}, 재료의 열적, 기계적, 화학적 반응의 강도가 재료를 구성하는 원자간 결합력을 초과하게 되면 어블레이션 현상이 일어난다. 한편, 어블레이션이 일어날 때 가공재료 주변에는 유동장을 플룸(plume)으로 인한 유동장이 형성되며 가공물이나 분위가 해리(dissociation)되어 플라즈마가 생성되기도 한다³. 이러한 레이저-재료 상호작용은 매우 복잡한 형태로 발생되는데 일차적으로는 단위면적당 레이저빔의 출력(irradiance 또는 power density)과 레이저빔 조사 시간(pulse width)에 따라 그 특성이 결정된다. 물론, 동일한 레이저 조사 조건에서도 재료의 광학적/열적/기계적 성질에 따라 상이한 반응이 발생할 수 있고 나노초 이하의 단펄스 가공에서는 재료의 취성(brittleness), 연성(ductility) 여부가 어블레이션의 물리적 양상을 결정하는 데 매우 중요한 것으로 알려져 있다.

레이저 가공 시, 레이저 빔의 침투 깊이는 $1/\gamma = \lambda/4\pi\kappa$ (γ : 흡수율, κ : 흡광계수, λ : 파장)으로 주어지는 반면 열확산에 의한 열영향부(heat affected zone)의 길이는 $\sim(4\alpha\tau)^{1/2}$ (α : 열확산도, τ :

레이저 조사시간)로 주어진다. 따라서 펨토초 레이저 가공에서와 같이 펄스폭이 짧아 열확산의 영향을 무시할 수 있는 경우, 펄스당 어블레이션 깊이 (d)는 레이저 플루언스(laser fluence F)와 어블레이션이 한계 플루언스 (F_{th})의 비와 광 침투깊이의 함수로 주어지고 간단한 유도 과정을 통해 어블레이션 깊이가 식(1)과 같이 상대 플루언스의 대수값에 비례함을 보일 수 있다⁴.

$$d = \gamma^{-1} \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right) \quad (1)$$

식(1)은 열적 기작에 의한 재료의 제거율을 근사적으로 예측하는데 이용될 수 있으나 미세가공 공정의 개발을 위해 표면형상 등 보다 구체적인 어블레이션 현상을 정확히 모사하는 데에는 한계가 있다. 앞서 언급한 것처럼 펨토초 가공을 정확히 모사하기 위해서는 비평형 에너지 전달과정이 중요한데 위의 식은 그러한 현상들을 엄밀하게 고려하지 않은 모델이기 때문이다. 펨토초 레이저와 재료의 상호작용은 재료의 종류 또는 전자구조에 따라서 금속, 반도체, 절연체로 구분 지어 설명할 수 있으나 일반적으로 재료 내부에 존재하는 전자/격자와의 상호작용에 따라 결정된다.

금속의 경우, 입사되는 펨토초 펄스는 우선 전자에 의해서 흡수/여기 되어 전자의 온도를 수십 eV 까지 증가시키고 그 후 고온의 전자는 포논(phonon)과의 충돌을 거치면서 평형상태에 이른다. 이러한 복잡한 과정을 거치면서 표면으로부터 전자의 방출, 용융, 기화(vaporization), 상폭발(phase explosion), 파쇄(spallation), 정전기 어블레이션(electrostatic ablation)등의 현상이 발생되고 재료가 모재에서 제거된다. 그러나 반도체, 절연체와 같은 띠틈(bandgap)이 존재하는 재료의 경우, Fig.2 에 나타난 것처럼 펨토초 레이저의 출력밀도가 매우 높기 때문에 다광자흡수에 의해서 자유전자가 발생하게 된다⁵. 레이저에 의한 재료의 이온화 현상은 펄스가 끝나기 전에 발생하므로 펨토초 가공에서는 플라즈마 차폐가 없으며 자유전자는 입사되는 레이저 에너지를 그대로 흡수하여 고온 상태가 된다. 또한 고온의 자유전자의 강한 운동 에너지는 주변 원자와의 충돌을 거치면서 또 다른 자유 전자들을 생성하게 되어 전자사태 이온화(electron

avalanche ionization)가 발생한다⁶. 띠틈간격이 존재하는 재료의 경우, 전자의 에너지가 증가하여 표면으로부터 방출되면 Coulomb 효과에 의한 어블레이션이 일어나기도 한다.

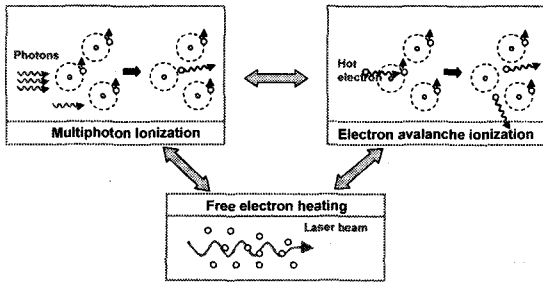


Fig. 2 Ionization models of solid. The free electron generation and the free electron heating mechanism are given

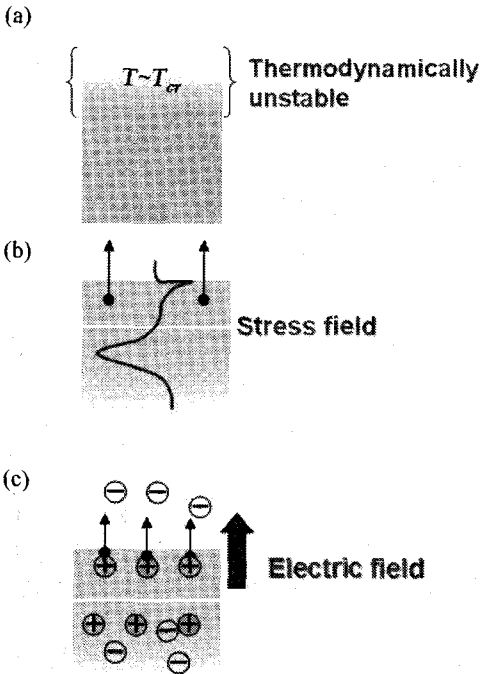


Fig. 3 Diagrams for the various ablation mechanisms; (a) phase explosion (b) spallation (c) electrostatic ablation

3. 펄스초 어블레이션의 물리적 기작

3.1 어블레이션 기작

펄스초 레이저 조사로 인한 재료 제거 기작은 금속, 반도체, 절연체 등 물질의 종류에 따라 다르게 나타난다. 이는 각 재료의 전자구조의 차이로 인해 레이저와의 상호작용이 달라지기 때문이다. 펄스초 레이저 조사로 인한 어블레이션 기작은 (1) 기화, (2) 상폭발, (3) 정전기 어블레이션, (4) 파쇄 등으로 나눌 수 있다. Fig.3 은 각 어블레이션 기작에 대한 개념도를 보여준다.

3.1.1 기화(vaporization)

재료가 레이저로 인해 가열되면 용융과 기화 현상이 발생한다. 이러한 열적 기화는 나노초 이상의 펄스폭을 갖는 레이저에 의한 어블레이션을 설명하는 주요한 기작으로 받아들여지고 있고 Hertz Knudsen 방정식과 같은 이론적 모델로 나타낼 수 있다⁷. 일반적으로 물질이 기화될 때 용융물의 온도가 포화온도를 넘어서면 본격적인 물질의 이탈이 시작된다. 하지만 펄스초 펄스에 의한 어블레이션의 경우 Hertz-Knudsen 방정식에 의한 증발 깊이는 1 monolayer 에도 미치지 못할 만큼 느린 과정이다⁸. 따라서 펄스초 어블레이션의 경우 일반적으로 기화는 어블레이션 기작으로 고려하지 않는다. 또한 전자-이온 평형에 의해 이온의 온도가 순간적으로 급격히 상승하므로 비평형 과정을 통해 폭발적인 기화(explosive vaporization)가 일어나는 것으로 알려져 있다. 이러한 폭발적 기화는 준평형 상태의 불안정한 액체가 임계점 근처에 급격히 기상으로 변화하는 기화 현상의 일종이다. 폭발적 기화를 상폭발(phase explosion)이라고도 부르며 이에 대해서는 다음 절에 설명하였다.

3.1.2 상폭발(phase explosion)

고온의 전자의 온도가 격자로 전달되어 격자의 온도가 열역학적 임계온도(T_{cr})에 접근하면 물질은 과열액체 상태로 들어가게 된다. 상폭발 모델에 의하면 시편의 온도가 열역학적 임계온도에 근접한 spinodal 한계온도에 도달하게 되면 준평형 상태의 매우 불안정한 액체는 급격한 밀도의 변동을 거치게 되면서 내부로부터 생성되는 기포 핵의 수가 기하급수적으로 증가하게 되어 결국 폭발적으로 기화된다⁹. 이 상폭발 모델은 F. Vidal¹⁰, L.V.

Zhigilei¹¹, J.K. Chen¹² 등 많은 연구자들에 의해서 금속의 펄초 초 어블레이션 현을 이론적으로 모사하기 위한 모델로 적용되었다. Chen¹² 은 상폭발 모델을 이용하여 금의 어블레이션 깊이를 플루언스에 따라서 계산하였고 실험값과 계산결과가 비교적 잘 일치함을 보였다. 이러한 상폭발 모델은 높은 플루언스 영역에서는 비교적 정확히 어블레이션을 예측할 수 있으나 어블레이션 한계값 근처의 낮은 플루언스 영역에서는 실제 현상을 정확히 모사할 수 없다. 상폭발 모델의 적용이 가능한 높은 플루언스의 기준값은 재료에 따라 다르므로 일반적으로 정의하기는 힘들다. 기존의 실험결과를 살펴보면 Al, Cu, Au 등 금속에 대해서 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 이상이면 상폭발 모델을 이용하여 어블레이션 현상을 해석할 수 있는 것으로 나타나 있다. 재료의 어블레이션은 기화와 같은 열적인 기작에 의해서만 발생하는 것이 아니라 파쇄, 정전기적 어블레이션(electrostatic ablation) 등의 기작을 통해서도 발생할 수 있음은 물론이다¹².

3.1.3 파쇄(spallation)

파쇄는 광기계적(photomechanical) 효과에 의한 물질의 제거 과정을 지칭한다. 펄초 펄스폭(t_p)을 가지는 레이저 빔을 시편에 조사할 때, 레이저 침투깊이(L_p)를 음속(C_s)으로 나눈 시간($t_s=L_p/C_s$)과 전자-격자 평형시간(t_{e-ph})에 따라 파쇄조건이 결정된다¹³. $\text{Max}\{t_p, t_{e-ph}\} < t_s$ 인 경우, 전자에너지가 급격하게 격자로 전달되는 반면 상대적으로 느리게 열확산이 진행되기 때문에 표면에 고온 압축파가 형성되고 시편 내부로 진행해 나가면서 인장응력이 발생한다. 인장응력이 인장강도를 넘어서게 되면 재료는 시편으로부터 파쇄된다. Fig.4 은 분자동역학(molecular dynamic simulation) 시뮬레이션을 통해 계산된 파쇄 장면이다¹⁴. 일반적으로 어블레이션 한계 플루언스 근처에서는 파쇄현상이 주요한 어블레이션 기작으로 여겨지고 있다¹².

3.1.4 정전기적 어블레이션 (electrostatic ablation)

펄초 펄스와 같은 고강도 빔은 2-광자 또는 3-광자 흡수를 쉽게 유발한다¹⁵. 따라서 펄스가 끝나기 전에 전자의 에너지가 일함수(work function)와 이온화 에너지(ionization potential)의 합을 능가하게 되고 표면으로부터 전자가 방출된다. 이때

방출된 전자와 표면에 존재하는 이온에 의한 전자 밀도 구배는 강한 전기장을 형성시켜 이온의 방출을 돕는다. 이러한 어블레이션 현상은 펄스 초기에 국한되며 그 양 또한 매우 미세하여 재료 가공 현상을 모델링 하는데 있어서 대체로 무시되지만 어블레이션 한계 플루언스를 예측하기 위해서는 고려되어야 한다¹⁶. 특히 금속의 경우 자유전자밀도와 전자의 이동성이 높기 때문에 재료 내부의 전자밀도 구배는 쉽게 사라지게 된다. 따라서 정전기적 어블레이션에 의한 금속의 어블레이션은 무시할 수 있다.

3.2 펄초 레이저 어블레이션을 수치 모사하기 위한 이론 모델

3.2.1 2 온도 모델 (two temperature model)

극초단 레이저에 의해 재료의 온도변화를 예측하기 위한 모델로서는 2 온도 모델이 가장 널리 이용되는데 2 온도 모델에서는 비평형 상태에 있는 전자와 격자(lattice)를 서로 다른 물성을 지닌 기체로 분리하여 고려한다. 특히, 금속에 대해서 Kaganov¹⁷, Anisimov¹⁸, Qiu and Tien¹⁹ 등이 이론적 모델을 확립해 왔으며 아래 식(2)는 금속에 관한 지배방정식이다(T_e, T_l :전자, 격자 온도, C_e, C_l :전자, 격자 비열, k_e :전자 열전도도, S : 에너지생성 항). 반도체 및 절연체에 대해서는 전자밀도에 대한 지배방정식을 추가적으로 고려해 주어야 한다²⁰.

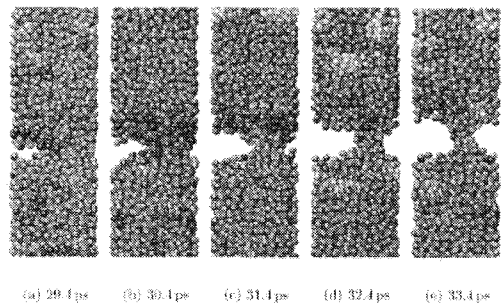


Fig. 4 Spallation phenomena simulated using molecular dynamics for Cu with 500 fs, 170mJ/cm² pulse¹⁴

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot (k_e \nabla T_e) - G(T_e - T_i) + S \quad (2)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = G(T_e - T_i)$$

전자에 대한 식 우변 두 번째 항은 전자와 이온간의 에너지 교환을 의미하며, 전자와 격자의 질량 차이로 인해서 전자-격자 평형도달 시간은 대략 수 ps 에 이르게 된다. 예를 들면, 벌크 Au 에서의 전자와 격자의 평형도달시간은 약 6 ps 이다. 따라서 격자의 열확산은 이 시간 동안 무시할 수 있으므로 격자의 열확산 항은 제외된다. 2 온도 모델을 적용함에 있어서 전자의 온도가 페르미 온도(Fermi Temperature)에 접근할수록 전자의 물성(비열, 열전도도), 전자-격자 에너지 결합상수(G)를 전자/격자 온도의 함수로 고려해야 한다. 전자의 열전도도 및 비열에 대한 관계는 선행 연구를 통해 알려져 있다²¹. 하지만 에너지 결합상수는 전자의 온도가 증가하면서 최대 20%까지 증가함에도 불구하고 이에 대한 구체적인 연구는 아직 미흡한 실정이다⁷. 전자-격자 평형상태에 도달 하게 되면 통상적인 의미에서의 (국소평형상태에서의) 열전달이 일어나므로 일반적인 열확산 방정식을 풀어서 상폭발 및 용융 현상을 묘사할 수 있다²². 레이저 빔 조사 후 전자-격자의 평형 온도가 비등점을 넘어서면 모재는 과열상태에 들어가게 된다. Fig.5 을 보면, 고온, 고압의 물질은 분위기(또는 진공)로 팽창하는데 이 때 시편 내부로 희박파(rarefaction wave)가 전파된다. 이 경우, 분위기로 팽창하는 물질은 기체와 액적의 혼합물 형태로 이뤄지며 이는 분자동역학 모사를 통해 예측할 수 있다.

2 온도 모델을 이용하여 온도상승뿐 아니라 어블레이션 거동을 묘사하기 위해서는 전자와 격자(이온) 내부에 작용하는 힘을 고려한 일반적 형태의 지배방정식을 이용해야 한다^{23,24}. 식(3)은 금속 시편에 대한 전자와 격자의 압력을 고려한 일반적 형태의 지배방정식이다(P_e, P_i, P_c : 전자/격자/탄성 압력, u : 속도, ρ : 밀도). 식(3)은 오일러적 표현법으로 나타내었으며, 많은 기존 연구들은 라그랑지안 표현으로 나타내어 계산을 수행하였다. 하지만 두 표현법은 좌표계의 선정만 다를 뿐 서로 호환이 되며 같은 내용을 포함 하고 있다. 매질의

팽창뿐 아니라 내부의 응력분포까지 예측 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 식(3)에서 전자와 이온의 압력(P)을 정의하기 위해서는 전자와 이온에 대한 상태 방정식이 필요하며 QEOS(Quotidian equation of state)와 같은 관계식을 사용할 수 있다. QEOS 는 R.M. More 등에 의해서 제안되었으며, 주어진 고체의 밀도, 원자번호, 체적탄성률(bulk modulus)를 이용하여 고체와 플라즈마의 상태 방정식을 제공한다²⁵. 한편, HYADES²⁶, MEDUSA²⁷ 등과 같은 기존 1D 유동해석 프로그램을 재구성하여 어블레이션 현상을 모사에 적용한 경우도 있다.

$$C_e \frac{dT_e}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) - G(T_e - T_i) + S - P_e \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = G(T_e - T_i) - (P_i + P_c) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} (P_e + P_i + P_c)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0$$

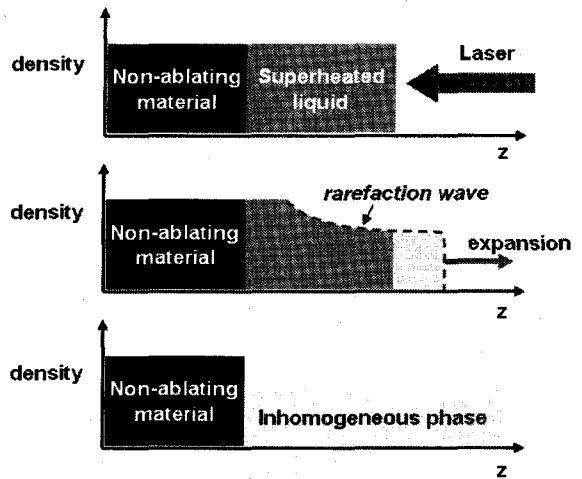


Fig. 5 Behavior of the superheated material due to heating by a fs laser pulse

3.2.2 분자동역학 (Molecular Dynamics) 모사

분자동역학 모사를 이용한 해석 방법은 상폭 발 및 파쇄현상을 비교적 엄밀하게 모사할 수 있는 효과적인 방법이지만 2 온도 모델에 비해서 비교적 많은 계산비용이 든다는 단점을 지닌다. 또한 처리할 수 있는 분자의 수가 계산용량에 의해 제한되므로 실질적인 의미를 지닌 넓은 영역에 대해 계산을 수행하는 것이 많은 경우 불가능하다. C. Shafer 등은 표면 근처의 격자에 대해서는 분자동역학 모사를 적용시키고 나머지 영역은 2 온도 모델을 적용시켜 계산성능을 향상시키기도 하였다¹⁴.

4. 금속의 어블레이션 해석연구 사례

150 fs (780 nm) 펄스초 펄스를 구리 표면에 조사했을 때 상폭발 기작에 의해 발생된 어블레이션율을 수치적으로 예측한 결과를 Fig. 6 에 예시하였다. 그림에서는 일차원 2 온도 모델에 의한 계산 결과를 참고문헌²⁸ 에 보고된 실험값과 비교하였다. 그림은 한계 플루언스를 넘어서는 영역에서는 계산과 실험결과와 잘 일치하지만 한계 플루언스 근처에서는 잘 일치하지 않음을 보여준다. 이는 상폭발 모델이 높은 플루언스에 의한 매우 급격한 온도 변화를 전제로 한 것이기 때문이다. 또한 이러한 해석 결과는 한계값 근처의 낮은 플루언스 영역에서는 파쇄, 정전기 어블레이션 같은 비열적 효과가 상대적으로 중요하다는 사실도 알려준다.

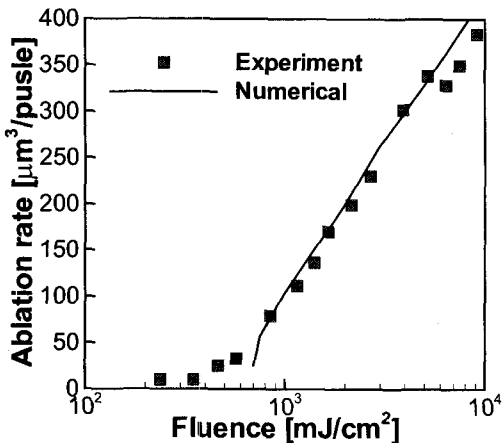


Fig. 6 Ablation rate of Cu in vacuum (50 pulses)

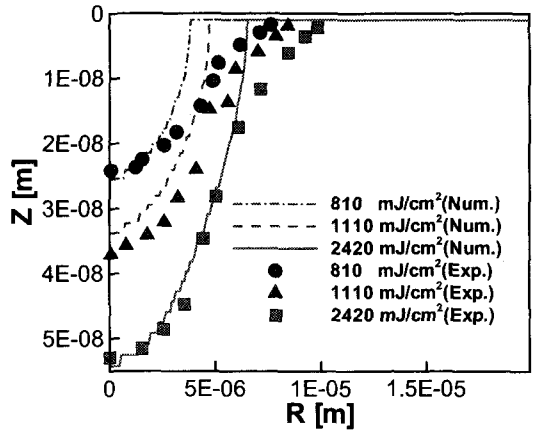


Fig. 7 Measured (symbols) and calculated (lines) crater shapes in Ni by a Gaussian beam

Fig. 7 는 Ni 시편에 가우시안 공간분포를 가지는 펄스(220 fs, 800 nm)를 조사하여 얻어진 가공형상과 수치적으로 예측된 가공형상을 비교하고 있다. 중심부에서 실험과 계산은 잘 일치하지만 바깥쪽으로 갈수록 일치하지 않음을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 높은 플루언스 영역인 빔의 중심부에서 상폭발 모델에 의해 어블레이션이 잘 설명됨을 의미한다. 이러한 경향은 플루언스가 높아질수록 두드러지게 나타났다. 그러나 상대적으로 낮은 플루언스를 갖는 지역에서는 상폭발 모델이 아닌 다른 어블레이션 기작이 필요하게 된다. 최근 파쇄가 한계플루언스 영역에서의 어블레이션을 설명하는 모델로 제안되고 있다^{12,14,23}.

5. 결론

극초단 레이저를 이용한 재료의 초미세 가공 기술은 앞으로 더욱 많은 산업 분야에서 이용될 것이며 이를 위해서 각 공정에 맞는 적절한 이론적 해석 모델을 확립하는 것이 필수적이다. 펄스초 펄스에 의한 금속 어블레이션의 물리적 기작은 상폭발, 파쇄 및 정전기적 어블레이션 등으로 분류할 수 있다. 비교적 높은 플루언스 영역에서는 상폭발에 의한 재료의 제거가 어블레이션의 주요 기작이며, 어블레이션 한계 값 근처에서는 기화뿐 아니라 파쇄 및 정전기적 어블레이션 등 다양한

기구에 의해 어블레이션이 발생할 수 있다. 어블레이션 현상을 수치적으로 모사하기 위해서는 2 온도 모델(two-temperature model), 분자동력학 모델(MD) 등이 주로 사용되고 있다. 높은 플루언스 영역에서 금속의 어블레이션은 상폭발 만을 고려한 이론 모델로써 비교적 정확히 예측할 수 있음이 밝혀졌다. MD 모사 기법은 특별한 제약 없이 넓은 범위에서 펨토초 레이저 어블레이션을 모사하는데 적용될 수 있으나 계산비용이 크다는 단점이 있다. 다양한 선행 연구들에도 불구하고, 극초단 레이저펄스에 의한 재료 가공 공정의 물리적 기작을 정확히 이해하고 이론적 해석모델 및 수치모사 기법을 개발하기 위해서는 아직도 많은 추가적인 노력이 요구된다고 하겠다.

후 기

본 연구는 핵심연구 개발사업(첨단레이저-재료 반응 모사용 전산해석 기법 개발) 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- Peterlongo, A., Miotello, A. and Kelly, R., "Laser-pulse sputtering of aluminum: Vaporization, boiling, superheating, and gas-dynamic effects," *Physical Review E*, Vol. 50, No. 6, pp. 4716 – 4727, 1994.
- Ho, J. R., Grigoropoulos, C. P. and Humphrey, J. A. C., "Gas dynamics and radiation heat transfer in the vapor plume produced by pulsed laser irradiation of aluminum," *Journal of Applied Physics*, Vol. 79, No. 9, pp. 7205 – 7215, 1996.
- Korner, C., Mayerhofer, R., Hartmann, M., Bergmann, H. W., "Physical and material aspects in using visible laser pulses of nanosecond duration for ablation," *Applied Physics A*, Vol. 63, pp. 123 – 131, 1996.
- Nolte, S., Momma, C., Jacobs, H., Tunnermann, A., Chichkov, B. N., Wellegehausen, B. and Welling, H., "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 14, No. 10, pp. 2716 – 2722, 1997.
- Jiang, L. and Tsai, H. L., NSF Workshop on "Unsolved problems and research needs in thermal aspects of material removal processes," June 10-12, Stillwater, OK, p. 1, 2003.
- Gamaly, E. G., Rode, A. V., Tikhonchuk, V. T. and Luther-Davies, B., "Electrostatic mechanism of ablation by femtosecond lasers," *Applied Surface Science*, Vol. 197-198, pp. 699 – 704, 2002.
- Knight, C., "Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure," *AIAA Journal*, Vol. 17, No. 5, pp. 519 – 523, 1979.
- Chowdhury, I. H. and Xu, X., "Heat transfer in femtosecond laser processing of metal," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 44, No. 3, pp. 219 - 232, 2003.
- Miotello, A. and Kelly, R., "Critical assessment of thermal models for laser sputtering at high fluences," *Applied Physics Letters*, Vol. 67, No. 24, pp. 3535 – 3537, 1995.
- Vidal, F., Laville, S., Johnston, T. W., Barthelemy, O., Chaker, M., Drogoff, B., Margot, J. and Sabsabi, M., "Numerical simulations of ultrashort laser pulse ablation and plasma expansion in ambient air," *Spectrochimica Acta Part B*, Vol. 56, pp. 973 – 986, 2001.
- Zhigilei, L. V., "Dynamics of the plume formation and parameters of the ejected clusters in short-pulse laser ablation," *Applied Physics A*, Vol. 76, pp. 339 – 350, 2003.
- Chen, J. K. and Beraun, J., "Modelling of ultrashort laser ablation of gold films in vacuum," *Journal of Optics A: Pure Applied Optics*, Vol. 5, pp. 168 – 173, 2003.
- Zhigilei, L. V. and Garrison, B. J., "Microscopic mechanisms of laser ablation of organic solids in the thermal and stress confinement irradiation regimes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 88, No. 3, pp. 1281 – 1298, 2000.
- Schafer, C., Urbassek, H. M. and Zhigilei, L. V., "Metal ablation by picosecond laser pulses: A hybrid simulation," *Physical Review B*, Vol. 66, pp. 1115404-1 – 1115404-8, 2002.
- Hashida, M., Semerok, A. F., Gobert, O., Petite, G., Izawa, Y. and Wagner, J. F., "Ablation threshold dependence on pulse duration for copper," *Applied Surface Science*, Vol. 197-198, pp. 862 – 867, 2002.

16. Gamaly, E. G., Rode, A. V., Luther-Davies, B. and Tikhonchuk, V. T., "Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics," *Physics of Plasmas*, Vol. 9, No. 3, pp. 949 – 957, 2002.
17. Kaganov, M. I., Lifshitz, I. M. and Tanatarov, L. V., "Relaxation between electrons and the crystalline lattice," *Soviet Physics JETP*, Vol. 5, pp. 173 – 178, 1957.
18. Anisimov, S. I., Kapeliovich, B. L. and Perel'man, T. L., "Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses," *Soviet Physics JETP*, Vol. 39, pp. 375 – 377, 1974.
19. Qiu, T. Q. and Tien, C. L., "Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 835 – 841, 1993.
20. Mao, S. S., Mao, X., Greif, R. and Russo, R. E., "Simulation of infrared picosecond laser-induced electron emission from semiconductors," *Applied Surface Science*, Vol. 127-129 pp. 206 – 211, 1998.
21. Ye, M. and Grigoriopoulos, C. P., "Time-of-flight and emission spectroscopy study of femtosecond laser ablation of titanium," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, pp. 5183 – 5190, 2001.
22. Bulgakova, N. M. and Bourakov, I. M., "Phase explosion under ultrashort pulsed laser ablation: Modeling with analysis of metastable state of melt," *Applied Surface Science*, Vol. 197-198, pp. 41 – 44, 2002.
23. Itina, T. E., Hermann, J., Delaporte, P. and Sentis, M., "Modeling of metal ablation induced by ultrashort laser pulses," *Thin Solid Films*, Vol. 453-454, pp. 513 – 517, 2004.
24. Korte, F., Nolte, S., Chichkov, B. N., Bauer, T., Kamlage, G., Wagner, T., Fallnich, C. and Welling, H., "Far-field and near-field material processing with femtosecond laser pulses," *Applied Physics A*, Vol. 69 suppl. pp. S7 – S11, 1999.
25. More, R. M., Warren, K. H., Young, D. A. and Zimmerman, G. B., "A new quotidian equation of state (QEOS) for hot dense matter," *Physics of Fluids*, Vol. 31, pp. 3059 – 3078, 1988.
26. Larson, J. T., Lane, S. M., "Hyades – a plasma hydrodynamics code for dense plasma studies," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 51, no. 1-2, pp. 179 – 186, 1994.
27. Christiansen, J. P., Ashby, D. E. T. F. and Roberts, K. V., "A one-dimensional laser fusion code," *Computer Physics Communications*, Vol. 7, pp. 271 – 287, 1974.
28. Momma, C., Nolte, S., Chichkov, B. N., Alvensleben, F. V. and Tü nnermann, A., "Precise laser ablation with ultrashort pulses," *Applied Surface Science*, Vol. 109-110, pp. 15 – 19, 1997.