

고에너지를 이용한 폭발 현상 모델링

이경철* · 여재익*

ABSTRACT

In this paper, we describe the modeling of ablation based laser applications for innovative use in the military. In the laser ignition system, a metal confinement is ablated with the high intensity pulsed energy, triggering a thermal ignition of the confined high explosives. The constitutive equations for the laser source, deformation of metals, and explosion of energetic materials are described.

Key Words: ablation, laser ignition, high-explosive

1. 서 론

현재 유럽이나 미국과 같은 선진국들은 향후 무기 체계의 개발을 위해 우수한 물리 화학적 특성을 지닌 고에너지 물질의 개발과 더불어 고에너지 물질의 변화 현상과 유변 특성에 대한 이해가 중요하다고 여기고 있다. 이에 에너지물질의 변환 현상과 유변 특성은 필수적으로 고온 비평형 유동, 반응성 유동, 플라즈마 유동 및 이들 유동과 관련되는 에너지 변환 현상을 수반하며, 이를 이해하고 해석 할 수 있는 선행 기술이 필요하다. 이러한 해석기술은 고온 유동 에너지 변환 현상을 응용하는 고에너지 레이저 무기와 같은 신개념 무기체계의 개발을 위해 구체적인 현상의 모델 실험 및 물성실험과 상호 연계되어 그 실용성을 발휘 할 수 있다.

이러한 고에너지 물질로 꼽히고 있는 것이 고출력 레이저이며, 이를 이용한 다양한 연구가 진행 중에 있다. 그 중 고출력 레이저를 금속의 표면에 집중하여 제거하는 기술은 오랜 기간 동안 각광 받아왔으며, 현재 미세 가공과 같은 산업

분야에서 사용 되고 있다. 이 현상을 해석하고 활용하려는 연구는 최근 활발하게 이루어지고 있다.

고출력 에너지를 이용한 금속 제거 현상을 laser ablation 이라고 하는데, 본 연구에서는 이 laser ablation을 기본으로 하는 군사 분야에서 요구하는 미사일 요격 시스템을 위한 laser ablation을 바탕으로 하는 폭약의 점화 현상의 모델링을 laser ablation모델링과 high explosive 점화 모델링으로 나누어 소개 할 것이다.

2. Laser ablation 모델링

2.1 Laser ablation 소개

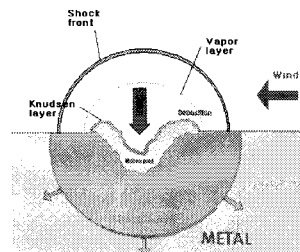


그림 1. 고에너지 레이저를 이용한 메탈 제거 과정

Laser ablation은 10^9W/cm^2 이상의nanosecond

* 서울대학교 기계항공공학부
연락처자 이경철, E-mail: lkc@snu.ac.kr

보다 짧은 pulse의 레이저를 어떤 물체의 표면에 focusing하여 조사하면 물체 표면에서 폭발이 발생하면서, shock wave와 플라즈마 현상이 발생하는 것을 말한다. 그림1은 ablation과정으로 표면의 온도는 순식간에 선형적으로 증가하고, 이온도는 기화 온도에 빠르게 도달하게 된다. 이후 표면에서는 물체의 빠른 상변화가 일어나 기화하게 되면서 매우 높은 압력이 형성되고 폭발이 일어나게 되는 것이다. 이로 인해 물체는 일부 질량을 손실하게 되고 손실된 질량만큼 빈공간을 가지게 된다.

본 연구에서는 이를 모델링하기 위해서 ablation material로서는 알루미늄을 사용하였다. 이 ablation을 모델링하기 위해서는 금속의 상변화에 따른 고체, 액체 그리고 기체에 알맞은 상태방정식과 해석 방법이 필요하다. 하지만이 laser ablation의 경우 기화된 알루미늄 가스만이 질량의 손실에 해당 하고, 지속된 레이저의 조사는 결국 기화를 야기하게 됨으로 기체와 고체의 상 만을 고려한 기체와 고체의 지배방정식을 각각 필요하게 된다.

2.2 금속 기체의 지배방정식

본 연구에서는 고체와 기체의 거동을 모사하기 위한 각각의 지배방정식이 필요하다. 그림2는 기체 거동 문제를 도식화한 그림으로서 laser ablation에 의한 금속 기체의 거동을 모사하기 위한 선행 연구는 이미 공개된바 있다.

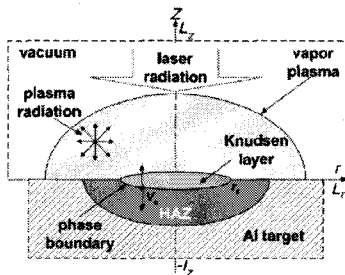


그림 2. 기체 거동 문제를 도식화 한 그림 [1]

J.R. Ho 와 C.P. Grigoropoulo는 그들의 논문에서 알루미늄에 pulsed laser를 조사했을 때 생성되는 기체와 열전달을 거동을 기술한바 있다

[2]. 이에 따르면, 기화된 금속은 액화된 금속 표면에서 떨어져 나오고 이는 압축성, 비점성 이상 기체와 같이 모델링 되었다. 이를 계산하기 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F(Q)}{\partial r} + \frac{\partial G(Q)}{\partial z} = S(Q) \quad (1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_r \\ \rho v_z \\ \rho E \end{pmatrix}, F(Q) = \begin{pmatrix} \rho v_r \\ \rho v_r^2 + p \\ \rho v_r v_z \\ v_r(\rho E + p) \end{pmatrix}, G(Q) = \begin{pmatrix} \rho v_z \\ \rho v_r v_z \\ \rho v_z^2 + p \\ v_z(\rho E + p) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$S(Q) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_{pl} I_c \exp(-k_{pl}|z|) + \nabla \cdot (-q_r) \end{pmatrix} \quad (3)$$

위의 식에서 I_c 는 금속 표면에 focusing 되는 레이저의 복사 강도이며, k_{pl} 는 플라즈마가 흡수하는 빛의 흡수율이다. q_r 는 복사에 의한 heat flux vector이다. 단위 질량당 총 에너지는 다음과 같고,

$$E = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (4)$$

이상기체의 EOS는 다음과 같다.

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (5)$$

여기서 $\gamma = C_p / C_v$ 이며 radiation source term $\nabla \cdot (-q_r)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\nabla \cdot q_r = k_a(4\pi I_b - G) \quad (6)$$

위 (6)번 식에서 G , k_a 와 I_b 는 Planck absorption coefficient로서 reference[2]에 기술되어 있다.

2.3 금속 고체의 지배방정식

금속의 고체 부분을 해석하기 위해서는 고체 부분에서의 온도를 알아야 할 필요가 있다. 이를 계산하기 위해서 heat conduction equation을 이용한다.

$$\rho_{Al} C_p \left(\frac{\partial T_{Al}}{\partial t} + V_{ev} \frac{\partial T_{Al}}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K \frac{\partial T_{Al}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T_{Al}}{\partial z} \right) \quad (7)$$

위의 식에서 T_{Al} 은 알루미늄의 온도이고, V_{ev} 는 기화 속도, K 는 열전도 계수이다.

금속 고체 부분의 변형 계산 또한 (1)번 식을 이용하여 계산한다. 하지만 기체와는 다른 고체의 해석이므로 응력 해석 term을 추가한 식이 필요하다.[3]

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_r \\ \rho v_z \\ \rho E \\ \rho s_r \\ \rho s_z \\ \rho s_{rz} \\ \rho \bar{\epsilon}^p \end{pmatrix}, F(Q) = \begin{pmatrix} \rho v_r \\ \rho v_r^2 + p \\ \rho v_r v_z \\ v_r(\rho E + p) \\ \rho v_r s_r \\ \rho v_r s_z \\ \rho v_r s_{rz} \\ \rho v_r \bar{\epsilon}^p \end{pmatrix}, G(Q) = \begin{pmatrix} \rho v_z \\ \rho v_r v_z \\ \rho v_z^2 + p \\ v_z(\rho E + p) \\ \rho v_z s_r \\ \rho v_z s_z \\ \rho v_z s_{rz} \\ \rho v_z \bar{\epsilon}^p \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$S(Q) = \begin{pmatrix} \frac{\rho v_r}{r} \\ \frac{\partial s_r}{\partial r} + \frac{\partial s_z}{\partial z} + \frac{s_r}{r} \\ \frac{\partial s_z}{\partial r} + \frac{\partial s_r}{\partial z} + \frac{s_z}{z} \\ \frac{\partial}{\partial r}(v_r s_r + v_z s_z) + \frac{\partial}{\partial z}(v_r s_z + v_z s_r) - \frac{\rho v_r}{r} + \frac{(s_r v_r + s_z v_z)}{r} \\ \rho \left(2\mu \left(D_r - \frac{3}{2} \frac{s_r}{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}^p \right) + \Omega_m \rho_m s_r - s_m \rho_m \right) \\ \rho \left(2\mu \left(D_z - \frac{3}{2} \frac{s_z}{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}^p \right) + \Omega_m \rho_m s_z - s_m \rho_m \right) \\ \rho \left(2\mu \left(D_{rz} - \frac{3}{2} \frac{s_{rz}}{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}^p \right) + \Omega_m \rho_m s_{rz} - s_m \rho_m \right) \\ \rho \left(\frac{1}{1 + \frac{H}{3\mu}} \frac{(s_r D_r + s_z D_z + 2s_{rz} D_{rz})}{\sigma} \right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

위 식에서 단위질량당 총 에너지는 식 (4)와 같다. 여기에서 금속의 압력을 계산하는데 사용되는 상태 방정식은 Mie-Grüneisen EOS가 사용된다.

$$p = \Gamma \frac{e}{V} + f(V) \quad (10)$$

위의 식에서 필요한상수의 정의는 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{\rho}, \Gamma = \frac{\Gamma_0 \rho_0}{\rho} \quad (11)$$

$$f(V) = \begin{cases} \frac{\rho_0 c_0^2 \phi}{(1-s\phi)^2} \left[1 - \frac{\Gamma}{2V} (V_0 - V) \right] & \text{if } V \leq V_0, \\ c_0^2 \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{V_0} \right) & \text{if } V > V_0, \end{cases} \quad (12)$$

$$\phi = 1 - (V/V_0) \quad (13)$$

$$c^2 = \Gamma e + f'(V) + \Gamma \frac{p}{\rho} \quad (14)$$

24 Numerical method

기본적으로 Euler equation을 풀기 위하여 ENO Scheme을 사용한다. 또한, material interface tracking 시 Level set method를 사용할 예정이다. 그리고 multi-material interface부근의 경계 조건은 Ghost Fluid Method를 사용하여 처리한다. 알루미늄의 기체와 고체의 영역을 구분하기 위해서Cauchy-stress를 이용한다. 고체가 액체 혹은 기체로 상이 변하면 stress의 영향은 없어지게 된다. 따라서 알루미늄의 boiling 온도 1780K를 기준으로 다음 식을 이용하여 기체와 고체를 구분 할 수 있다.

$$\sigma = (A + B(\bar{\epsilon}^p)^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right) (1 - \theta^m) \quad (15)$$

여기서 A, B, C, D, m, n, $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 는 모델 상수이며 $\theta = (T - T_0)/(T_b - T_0)$ 이라 같이 정의 된다. T_b 는 boiling 온도이고 T_0 는 상온을 나타낸다.

3. 폭약 점화 모델링

Laser ablation에 의해 금속은 제거되기 시작하고 금속의 내부에서 열전도가 이루어진다. 이 과정에서 폭약을 감싸고 있는 금속이 변형되면서 폭약과 접촉을 하게 되어 열전도에 의하여 폭약이 점화 되거나 혹은 고에너지 레이저에 의해 금속이 모두 기화하여 drilling 되어 레이저와 접촉하면서 레이저는 열원으로 작용하여 폭약의 점화가 이루어진다. 다음 그림3은 이러한 과정을 잘 보여주고 있다.

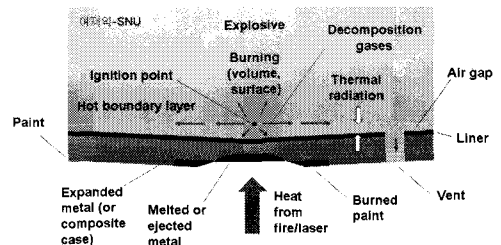


그림 3. Laser-ablation based 폭약 점화 과정

본 연구에서는 high explosive로서 PETN계열을 사용 할 것이다. 이를 해석하는 것은 기존의 mass, momentum, energy의 Euler equation에 점화 확인을 위한 chemical reaction term을 다음과 같이 하나 추가한다[3].

$$Q = (\rho\lambda), F(Q) = (\rho v_r), \quad (16)$$

$$G(Q) = (\rho v_z \lambda), S = (\rho\Omega) \quad (17)$$

여기서 reaction progress variable λ 는 다음과 같다.

$$\dot{\lambda} = \Omega \quad (18)$$

$$\Omega = H(p^*)A(1-\lambda)^{1/2} \quad (19)$$

H, A는 모델링 상수 이다. 또한 여기서 상용되는 이상기체 EOS는 다음과 같다.

$$p = (1-\gamma)(e + \rho Q_c \lambda) \quad (20)$$

4. 결 론

본 연구에서는 이와 같은 이론적 배경을 가지고 모델링을 진행 중에 있다. 이를 위한 선행 연구로서 30 J/pulse의 레이저를 0.1mm 두께의 알루미늄 foil에 조사하여 PETN을 점화 시키는 예측 모델을 Autodyn tool을 이용하여 제시하였다. 첨부된 그림 4는 30 J/pulse의 레이저의 single pulse를 0.1mm 두께의 알루미늄 foil에 조사 한 후 2마이크로 두께가 기화 된다는 가정에서 나타난 예측 결과 이다. 이런 결과를 참고하여 본 연구를 진행 한다. Laser ablation 과 laser ignition 모델을 통하여 다양한 material의 ablation 현상과 폭약뿐만이 아닌 propellant나 각종 fuel 등에서도 발생하는 점화 현상도 예측 할 수 있다.

Acknowledgment

This work was supported by the Korea Research Foundation Grant funded by the Korea Government (KRF-2006-015-D00038), the Agency for Defense & Development (HM-22)

and the Brain Korea 21 project through the Institute of Advanced Aerospace Technology at Seoul National University.

References

1. V. I. Mazhukin and V. V. Nossov, Modeling of plasma-controlled evaporation and surface condensation of Al induced by 1.06 and 0.248μm laser radiations, Journal of Applied Physics, 2007.
2. J. R. Ho and C. P. Grigoropoulos, Gas dynamics and radiation heat transfer in the vapor plume produced by pulsed laser irradiation of aluminum, Journal of Applied Physics, 1996.
3. L. B. Tran and H. S. Udaykumar, A particle-level set-based sharp interface Cartesian grid method of impact, penetration and void collapse, Journal of Computational Physics 2003.
4. J. J. Yoh and D. S. Stewart, High-resolution, numerical modeling of energetic and inert materials at large deformation rates, LLNL Technical Report, UCRL-JC-151176, 2002.

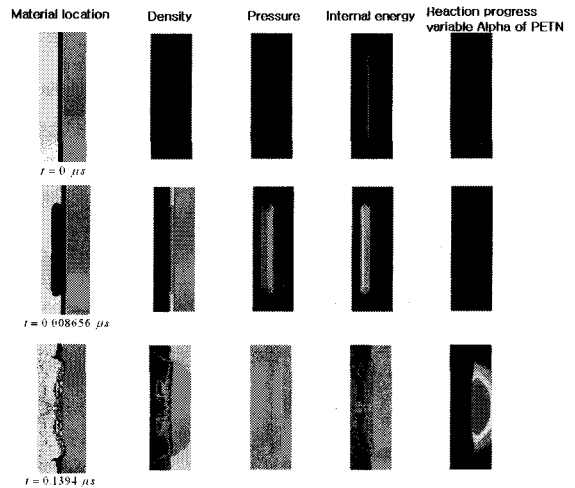


그림 4. 레이저 조사 후 폭약 점화 예측 모델