

고에너지물질의 레이저 점화 연구

이경철 · 김기홍 · Ardian Gojani · 이현희 · 최지혜 · 여재익*

초 록

레이저를 steel 표면에 조사하면, steel은 레이저의 복사 에너지를 흡수하여 급격히 가열되어 온도가 증가한다. 이때 steel에서는 phase explosion이 발생하고 shock wave와 플라즈마가 생성된다. 본 연구에서는 이 steel의 후면에 고폭화약을 접해 놓고 레이저 가열에 의한 화약의 점화 현상을 살펴보았다. 이를 위해 heat diffusion equation과 chemical heat release를 사용하였고, 고에너지 물질의 열분해 반응을 위해 3 step global kinetics를 사용하였다. 또한, 계산된 결과는 실험 결과와의 비교를 통해 검증되었다.

Key Words: Laser heating (레이저 가열), ignition(점화), energetic materials(고에너지 물질).

1. 서 론

레이저를 어떤 물체에 조사 할 때 발생하는 물리 현상 중 가장 기본이 되는 물리 현상이 ablation 이다. Laser ablation은 레이저를 어떤 물체의 표면에 focusing하여 조사하면 표면의 온도는 순식간에 선형적으로 증가하고, 기화 온도에 빠르게 도달하게 된다. 이후 표면에서는 물체의 빠른 상변화가 일어나 기화하게 되면서 매우 높은 압력이 형성되고 폭발이 일어나며 shock wave와 플라즈마가 발생한다. 이로 인해 물체는 일부 질량을 손실하게 되고 손실된 질량만큼 빈 공간을 가지게 된다.[1-3]

이 ablation 과정에서 heat transfer는 매우 중요한 요소 중에 하나이다. 본 연구에서는 레이저에 의한 금속에서의 열전달 과정과 금속 후면에 위치한 고에너지 물질의 점화 현상을 예측 했다.

2. Problem description

본 연구에서 가로 50.8 mm, 세로 127 mm, 두께가 1.5 mm 인 steel 시편에 레이저를 조사하였다. 사용된 펄스 레이저의 출력 에너지는 500 J/pulse이고, pulse duration은 0.5 ms 이다. Focusing 된 부위의 spot size는 5 cm²이므로 laser fluence는 100 J/cm² 이다. 레이저의 frequency는 20 Hz이다. 또한, 열전달에 의한 점화현상을 보기 위해 RDX 폭약을 사용하였다. Figure 1 는 모델링에 사용된 문제의 계략도 이다.

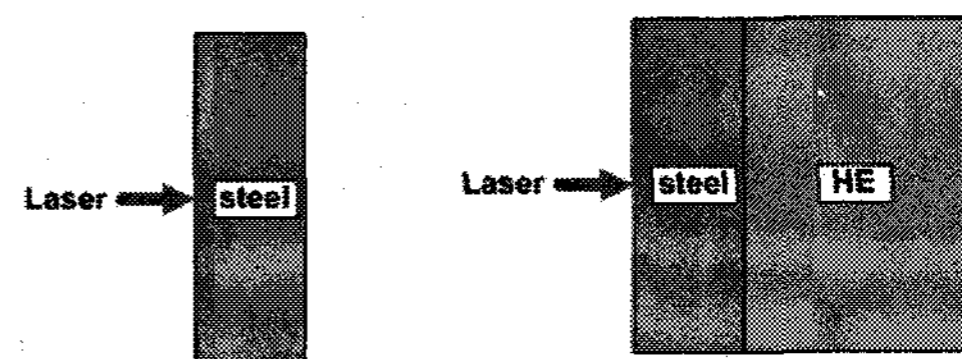


Fig. 1 Problem set-up for 2-cases: (a) Steel only, (b) Steel with RDX in contact.

* 서울 대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

3. Mathematical formulations

Steel과 폭약의 열전달을 해석하고자 본 연구에서는 식(1)에서 보는 바와 같이 1-D heat diffusion equation과 chemical heat release [4]를 이용한다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \sum_{k=1}^{N=3} r_k q_k \quad (1)$$

여기서 ρ 는 steel과 폭약의 밀도이고, C_p 는 specific heat이다. k 는 thermal conductivity이고, T 는 steel과 폭약에서의 온도를 나타낸다. 여기서 $\sum_{k=1}^{N=3} r_k q_k$ 는 폭약의 chemical heat release를 나타내는데, 이는 폭약에서 온도를 계산 할 때만 사용된다. r_k 는 reaction rate이고 q_k 는 heat of reaction이다. 또한, 폭약의 chemical reaction을 보기 위하여 species equation을 사용한다.

$$\rho \frac{dY_i}{dt} = w_i \quad (2)$$

여기서 Y_i 는 mass fraction이고, w_i 는 species production rate이다. 3 step global chemical kinetics가 사용되었다. 3 step chemical reaction에는 4개의 species(A, B, C, D)가 존재한다. A는 반응 전 고체이고, B는 solid intermediate이다. C는 gas intermediate이며, D는 product gas이다. 각 step에서 reaction rate를 구할 수 있는데, 이는 다음과 같다.

$$A \rightarrow B, \quad r_1 = Z_1 \exp(-E_1 / RT) \rho_A \quad (3)$$

$$B \rightarrow C, \quad r_2 = Z_2 \exp(-E_2 / RT) \rho_B \quad (4)$$

$$C \rightarrow D, \quad r_3 = Z_3 \exp(-E_3 / RT) \rho_C^2 \quad (5)$$

여기서 reaction rate r_1, r_2, r_3 의 합은 1이다. 이 reaction rate를 이용하여 각 species의 mass fraction과 species product rate를 구할 수 있다.

$$\frac{dY_1}{dt} = -r_1 = w_1 \quad (6)$$

$$\frac{dY_2}{dt} = r_1 - r_2 = w_2 \quad (7)$$

$$\frac{dY_3}{dt} = r_2 - r_3 = w_3 \quad (8)$$

$$\frac{dY_4}{dt} = r_3 = w_4 \quad (9)$$

여기서 계산된 mass fraction중 species D의 mass fraction(Y_4)를 통해서 RDX의 점화 및 열분해 여부를 확인 할 수 있다.

4. Boundary condition and coefficients

본 연구에서는 ref. [5]를 바탕으로 한 laser thermal boundary condition이 사용되었다. Figure 2는 steel의 전면부에서 사용된 thermal boundary condition을 보여주고 있다.

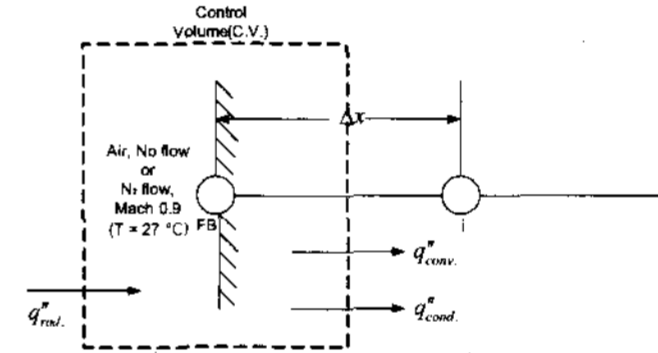


Fig. 2 The thermal boundary condition of front face of a steel coupon.

Steel의 전면부에서 steel을 기준으로 half control volume을 지정한다. Steel은 레이저의 복사 에너지를 흡수하여 가열되기 시작하고, 그 heat은 steel 내부를 따라 전달되어 steel 후면에 도달하게 된다. Steel 표면에는 공기나 혹은 Mach 0.9의 N₂ 유동이 존재하여 대류 한다. 이러한 조건으로부터 control volume에서의 복사, 전도, 대류의 heat flux 평형 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha G_{laser} - h(T_{FB} - T_{air}) - k \frac{(T_{FB} - T_i)}{\Delta x} = 0 \quad (10)$$

α 는 steel의 복사 에너지 absorptivity이고, G_{laser} 는 레이저의 1 펄스당 조사되는 에너지이다. h 는 convection coefficient이며, k 는 steel의 thermal conductivity이다. T_{FB} , T_{air} , 와 T_i 는 steel의 Front boundary점과 공기 그리고 격자 i 점에서의 steel 온도 이다.

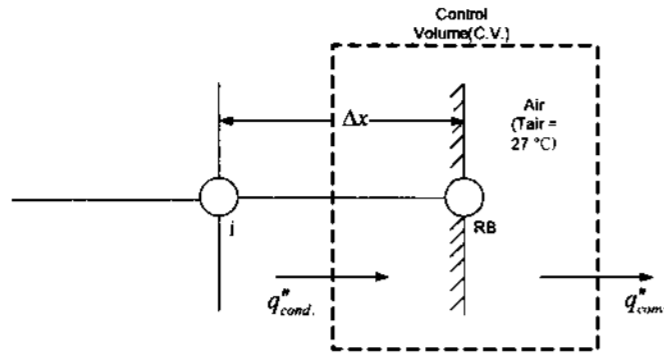


Fig. 3 The thermal boundary condition of back face of a steel coupon.

Figure 3는 steel의 후면부에서의 boundary condition을 나타내고 있다. 첫번째 case의 경우는 후면에 유동이 없는 공기가 존재하여 steel의 전도와 대류 현상만을 고려하게 된다. 이 전도, 대류의 heat flux 평형식은 다음과 같다.

$$k \frac{(T_j - T_{RB})}{\Delta x} - h(T_{RB} - T_{air}) = 0 \quad (11)$$

그러나, 두번째 case의 경우에는 공기대신 RDX 폭약이 steel의 후면과 접촉해 있다. 본 연구에서 no flow, air condition의 경우 $h=500 \text{ W/m}^2$, N_2 flow, Mach 0.9 인 경우 $h=2600 \text{ W/m}^2$ 로 모델치로 사용되었다. 이는 실제 현상에서 steel 내부에서 3차원으로 열이 전달되어 확산 되어 cooling이 일어나는 현상을 감안한 모델치이다. 또한 specific heat(C_p), conductivity(k), 그리고 absorptivity(a)는 temperature dependent coefficients로서 figure 4에서 보이는 바와 같이 사용되었다. 이 중 absorptivity(a)는 그림 (c)와 같이 모델 되었다.

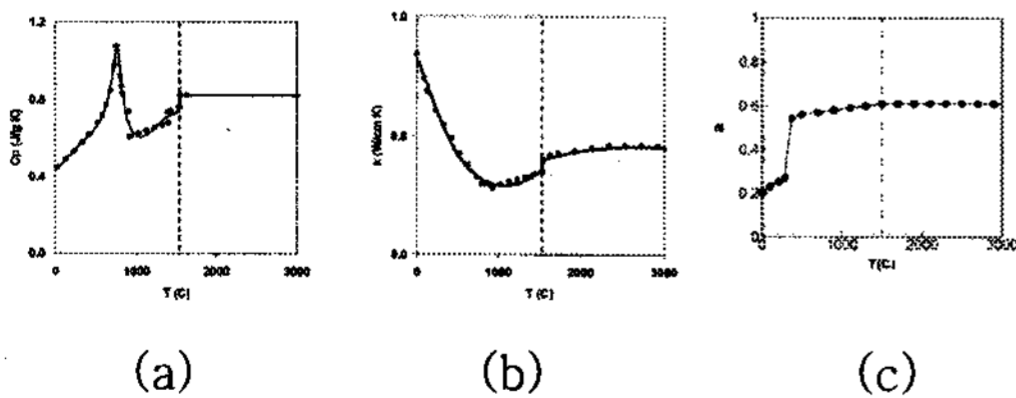


Fig. 4 Thermal dependent coefficients : (a) specific heat, (b) conductivity, (c) absorptivity.

5. Result

Figure 5는 steel coupon만 놓고(1-case) 5 pulse의 레이저를 조사하였을 때의 steel front

face의 temperature profile을 나타낸다.

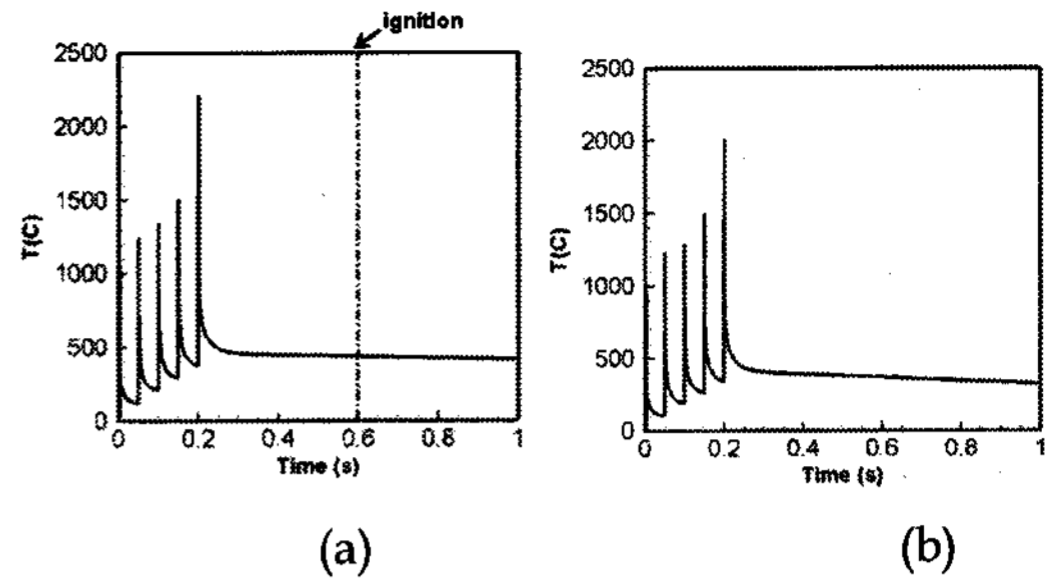


Fig. 5 Calculated temperature profile of a steel coupon. (front face) : (a) air, no flow (b) N_2 flow, Mach 0.9

온도는 레이저 조사량에 따라 급격히 증가함을 볼 수 있다. 여기서는 5 pulse만을 조사 했으므로 5개의 peak를 볼 수 있고, N_2 flow의 조건에서 cooling이 더 효과적으로 이루어 졌음을 볼 수 있다. 이렇게 이루어진 전면부의 열이 후면부로 전달되어 figure 6에서와 같은 temperature profile을 얻었다.

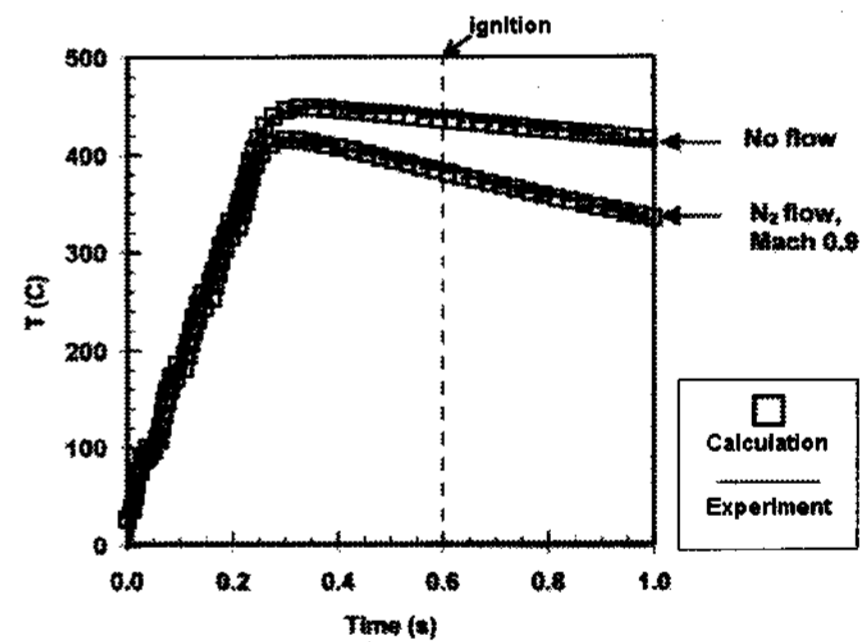


Fig. 6 Calculated temperature profile of a laser-heated steel coupon. (Experimental data from Boley, LLNL report 2003)

본 계산 모델의 타당성을 위해 ref. [6]의 실험 데이터와의 비교를 수행한 결과 fig. 6에서와 같이 일치함을 보였다.

계산된 air, no flow의 온도결과를 이용하여 steel의 후면에 RDX라는 폭약을 접촉시켜 놓고 점화와 폭발이 일어나는 예측 모델 결과를 도출하였다. Figure 7은 laser 조사로 인한 steel의 가열과 RDX의 점화시의 온도를 계산한 결과(2-case)이다.

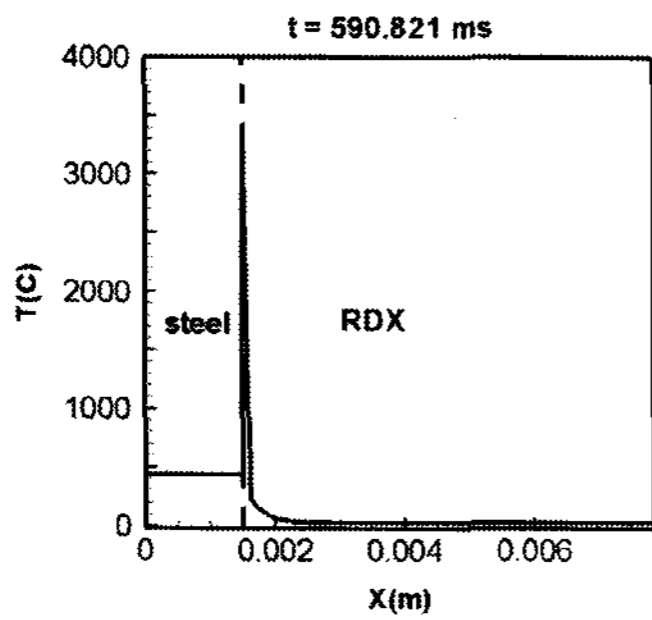


Fig. 7 Calculated temperature of steel with RDX.

결과에서 보듯이 RDX는 0.6 s 이내에 점화되고 폭발함을 알 수 있다. 이 계산에서는 air, no flow의 온도결과를 이용하였기 때문에 fig. 5와 fig. 6에 점화 시간을 표기하였다. 이러한 결과를 뒷받침하기 위해 chemical reaction 계산에서 최종 product(D)의 mass fraction profile을 산출하였다. Figure 8은 최종 product(D)의 mass fraction을 계산한 결과이다.

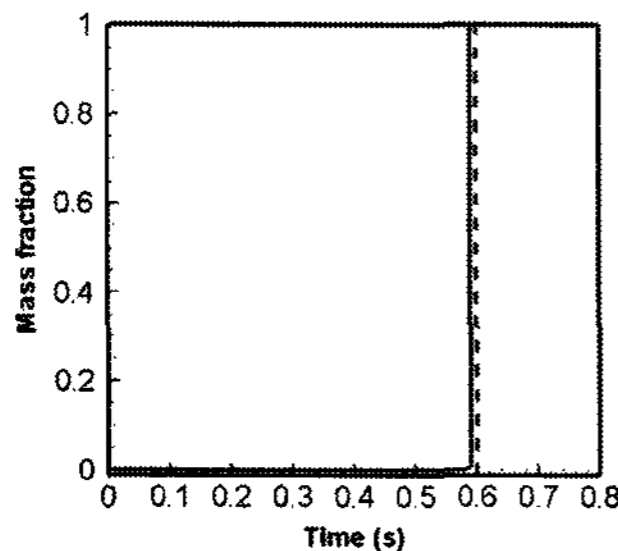


Fig. 8 Calculated mass fraction of final product.

점화 시간에서 mass fraction은 1에 도달함을 볼 수 있는데, 이는 점화 부위의 RDX가 완전히 연소되었음을 의미한다.

6. Conclusion

본 연구에서는 레이저에 의한 steel의 가열과 폭약의 점화 현상에 대한 1차원 heat transfer 모델을 제시하였다. 1 dimension heat diffusion equation과 chemical heat release가 steel과 폭약(RDX)의 열전달을 계산하기 위해 사용되었다. 또한 3 step thermal decomposition reaction이 폭약의 열분해-폭발 현상을 보기 위해 사용되었

으며, thermal boundary condition을 제시하였다. Steel의 온도 계산 결과는 실험 데이터와 일치했고, 폭약의 점화 condition 예측 결과를 도출했다. 이러한 모델은 laser-kill 과 laser propulsion 연구에 적용 될 수 있다.

Acknowledgment

This work was supported by the Korea Research Foundation Grant funded by the Korea Government (KRF-2006-311-D00038), the Agency for Defense & Development (HM-20, 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 0.248 μ m laser radiations, *Journal of Applied Physics*, 101, pp. 024922-024922-15, 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*, 79, pp. 7205-7215, 1996.
3. K. C. Lee, K. H. Kim, J. J. Yoh, and C. M. Tarver, Modeling of high energy laser ignition of energetic materials, submitted to *Applied Physics Letters*, 2007.
4. J. J. Yoh and K. H. Kim, Shock compression of condensed matter using Eulerian multi-material method: Applications, submitted to *Journal of Applied Physics*, 2007.
5. Suhas V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Taylor&Francis, 1980.
6. C. D. Boley, A. M. Rubenchik, Modeling of high-energy pulsed laser interactions with coupons, LLNL Technical Report, 2003.