

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2023.27.3.023>

고출력 레이저빔에 의한 금속의 열전달 및 고폭 화약의 폭굉 현상과 대기 외란 정도에 따른 레이저빔 세기 변화에 대한 수치 해석

박기성^a · 남재현^a · 황순휘^b · 양환석^b · 현 철^c · 여재익^{a,*}

Numerical Analysis of Heat Transfer Effect in Metal and Detonation of High Explosive Via the High Power Laser Irradiation as Well as Changes in Intensity of Laser Beam According to the Atmospheric Disturbances

Kisung Park^a · Jaehyun Nam^a · Soonhwi Hwang^b ·
Hwanseok Yang^b · Chul Hyun^c · Jai-ick Yoh^{a,*}^aDepartment of Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea^bLaser R&D Laboratory, LIG Nex1, Korea^cDepartment of System Engineering, LIG Nex1, Korea*Corresponding author. E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

ABSTRACT

This study investigates the detonation of high explosives (RDX) initiated by high power continuous laser irradiation. The laser beam is irradiated on the metal (SUS304) surface that is placed next to the RDX. The opto-thermal energy transfer through the metal gives rise to the reaction of RDX. The numerical simulation is performed using an Eulerian based multi-material hydrodynamic code that uses hybrid level-set algorithm to track the material interface between metal and RDX. The atmospheric disturbances during beam irradiation is modeled into a transient boundary condition imposed on the surface of metal. To understand the atmospheric effect, the temperature distribution on the metal surface and the rate of reaction of RDX are analyzed for both with and without atmospheric disturbances. The results elucidate that time to detonation is delayed with atmospheric effect included, and such the non-uniform low-temperature distribution is observed inside the reaction zone.

초 록

본 연구에서는 고출력 레이저 빔에 의한 금속에서의 열전달과 고폭 화약의 폭굉 현상을 검증된 솔버를 사용해 해석하였고, 해당 모델은 대기 외란 특성을 고려할 수 있도록 설계되었다. 연속형 고출

Received 12 December 2022 / Revised 1 June 2023 / Accepted 7 June 2023

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

력 레이저 빔을 조사하여 금속에서의 열전달과, 금속 후면부에 접해있는 고폭 화약이 전달된 열에 의해 점화되는 현상을 분석하였다. 본 연구에 사용된 금속은 SUS304이고 고폭 화약은 RDX이며, 레이저 특성을 동일하게 설정하여, 대기 외란을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때 SUS304에서의 온도 분포와 RDX의 반응 시작 시간을 비교분석하였다. 그 결과, 대기 외란을 적용하였을 때가 그렇지 않았을 때보다 폭발 시작 시간이 지연되며, 낮고 불균일한 열전달 온도 분포가 발생함을 보여주었다.

Key Words: High Power Laser(고출력 레이저), Heat Transfer(열전달), Detonation(폭굉), Atmospheric Disturbances Modeling(대기 외란 모델링)

1. 서 론

레이저는 복사 유도 방출에 의한 광증폭의 줄임말로 빛의 증폭 현상을 가리키는 말이다. 일상적으로는 이를 이용해 만들어진, 강하고 퍼지지 않으며 멀리 전달되는 단색광 레이저빔을 간단히 레이저라고 부른다. 원자가 에너지를 받으면 전자들이 들뜨게 되고 에너지가 높아지면서 빛을 방출한다. 이 때 원자가 방출하는 빛과 동일한 파장의 빛이 충돌하면 파장과 위상, 진행 방향이 동일한 빛을 방출하는 유도 방출 현상이 발생한다. 레이저는 이러한 유도 방출의 원리를 이용하여 빛을 증폭시킨다. 고출력 레이저는 강력한 레이저빔을 조사하는 장치로 레이저의 광속전파를 이용하기 때문에 고속 대응이 가능하고, 전기를 사용하기 때문에 지속조사가 가능하다는 장점이 있다.

고출력 레이저는 절단, 용접, 가공 등 산업 분야에서 이미 광범위하게 사용되고 있고, 국방 분야에서는 지향성 에너지 무기의 핵심 기술로 미국, 일본, 독일, 중국 등 주요 국방 선진국에서는 많은 투자와 연구 개발이 이루어지고 있다. 또한, 국내에서도 지난 10여 년간 많은 연구 개발이 진행되고 있으며 향후 발전 가능성이 매우 크다. 국내에서는 고출력 레이저를 연속 조사하여 그 강도에 따라 금속 시편의 크기와 두께 변화에 대한 분석 및 레이저 조사 시 금속 표면의 코팅유무에 따른 손상도를 분석한 연구[1]와 고출력 레이저에 의한 고에너지 물질의 점화 현상에 대한 연구[2] 등이 보고된 바 있으며, 해외에서는 고출력 레이저의 대기에서의 광학 전파를

시뮬레이션하기 위한 코드 개발[3]과 항공기에 탑재된 미사일 방어용 시스템인 ABL(Airborne Laser)에 대한 연구[4] 등이 보고된 바 있다.

그러나, 고출력 레이저를 이용한 폭발물에서의 열전달 및 폭굉 현상에 대기 환경을 적용하여 해석한 사례가 없어 실상황에 사용하기 위한 레이저 장비를 설계하고자 할 때 한계가 있다. 그러므로 대기 외란을 모델링하여 적용한 레이저 빔의 효과도를 분석할 수 있는 전산 해석 코드의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 열전달 해석과 RDX 폭발 해석을 위해 Hydrocode 솔버를 사용하였다. 해당 솔버는 GUI, 병렬처리 기법, 정밀수치 기법을 기반으로 하여 고압의 유체를 해석하며 높은 정확도 및 빠른 해석 속도를 보장한다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용한 Hydrocode 솔버를 검증 및 적용한 사례로 금속으로 된 원기둥 통 안에 고폭 화약을 넣고 밖에서 열을 가하면 금속의 열전달에 의해 내부의 폭약이 폭발하는 실험 및 시뮬레이션을 진행한 연구[5], 열전달 유체에 노출된 열에너지 저장 복합 재료가 고폭 화약과 같은 강력한 열화학 반응을 보임을 실험 및 시뮬레이션한 연구[6], 고폭 화약의 폭굉을 해석하기 위한 지배방정식 및 물질 간의 경계면을 해석하기 위한 수치 기법의 연구[7], 추진 시스템의 화학적 반응을 위해 알루미늄 처리된 RDX의 폭굉 시뮬레이션 연구[8] 등이 이루어진 바 있다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 검증된 솔버를 사용하여 동일한 출력의 연속형 레이저를 조사하였을 때 대기 외란의 유무에 따른 금속(SUS304)에서의 열전달 및 RDX의 폭굉을 시뮬

레이션 하고자 하였다. 또한, 실전에 적용할 수 있는 레이저 장비 연구를 위해 대기 환경에서 발생할 수 있는 대기 외란과 Thermal blooming을 고려한[9] 모델을 적용하였다. Thermal blooming이란 고출력 레이저빔에서 볼 수 있는 대기 효과로, 전파 매체와 레이저 방사선의 비선형 상호작용의 결과이며 전파 매체(공기)가 방사선의 일부를 흡수하여 가열되어 굴절률이 있는 열 렌즈를 형성하게 되는 현상을 일컫는다.

2. 본 론

2.1 Problem description

파장 1.064 μm , 직경 5 mm인 레이저빔을 가로 0.037 m, 세로 0.037 m, 두께 0.01 m의 SUS304 Steel에 출력 3.5 kW의 세기로 연속 조사하였을 때, 대기 외란 적용 여부에 따른 SUS304에서의 열전달과 이로 인한 가로 0.037 m, 세로 0.037 m, 두께 0.1 m의 고품 화약의 폭굉에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 사용한 고품 화약은 RDX이다. 시뮬레이션에 사용된 SUS304와 RDX의 도메인은 Fig. 1과 같다. 대기 외란은 조사 거리 5 km에서 흡수 계수 5×10^{-6} /m, 산란 계수 5×10^{-5} /m, 공기 투과율 0.82, 굴절률 구조 계수 $0.391 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 바람 속도 5 m/s의 평균 대기 조건[9]을 적용하였다. 이와 같은 대기 외란 조건은 표적에서의 레이저빔의 초점을 분산시킴으로써 고출력 레이저 시스템의 효율성을 저하시킬 수 있다. 대기 중의 수증기와 바람 뿐 아니라 온도와 굴절률의 변동은 레이저빔의 왜곡에 큰 영향을 미친다. 이러한 레이저빔의 왜곡을 예측하기 위해 대기 외란 조건을 통합 모델링하여 표적에서의 초기 레이저빔 조건

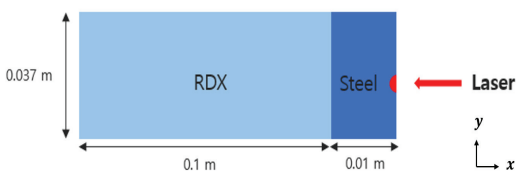


Fig. 1 Simulation domain.

에 적용하였으며 이를 바탕으로 대기 외란에 의한 레이저빔의 왜곡 및 SUS304에서의 열전달 온도 분포, RDX의 폭발 시작 시간에 대한 결과도 도출되었다. 추가적으로 다른 조건은 동일하게 두고 산란 계수가 1×10^{-6} /m, 1×10^{-5} /m, 1×10^{-4} /m일 때의 시뮬레이션 결과를 통해 굴절률 구조 계수의 변화에 따른 RDX에서의 폭발 시작 시간에 대한 분석 또한 진행하였다.

2.2 Mathematical modeling

SUS304의 열전달을 해석하기 위해 Eq. 1과 같은 열 확산 방정식[2]을 사용한다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - r_\alpha Q \quad (1)$$

$$r_\alpha = \frac{d\alpha}{dt} = A_\omega f(\alpha) \exp\left(\frac{-E_\alpha}{RT}\right)$$

여기서 ρ 는 밀도(kg/m^3)이고 C 는 비열(J/kgK)이며, k 는 열전도도(W/mK)이다. T 는 온도(K)이고 r_α 는 반응 속도($\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)이며, Q 는 반응열(J/kg)이다. 전체 연소 과정을 해석하기 위해 Eq. 2와 같은 Euler 지배방정식을 사용한다[7].

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial y} = \vec{S}(\vec{U})$$

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ \rho E \\ p\lambda \end{pmatrix}, \vec{E} = \begin{pmatrix} \rho u_x \\ \rho u_x^2 + p \\ \rho u_x u_y \\ u_x(\rho E + p) \\ \rho u_x \lambda \end{pmatrix}, \vec{F} = \begin{pmatrix} \rho u_y \\ \rho u_y u_x \\ \rho u_y^2 + p \\ u_y(\rho E + p) \\ \rho u_y \lambda \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho Q \dot{w} \\ \rho w \end{pmatrix}$$

여기서 ρ 는 RDX의 밀도이고 u_x, u_y 는 속도(m/s)이며, E 는 전체 에너지(J)이다. λ 는 one-step reaction progress이고 p 는 정수압(Pa)이며, Q 는 반응열이다. w 는 반응 속도이다.

SUS304의 압력과 음속을 결정하기 위한 상태방정

식은 Eq. 3의 Mie-Gruneisen EOS를 사용하고 RDX의 압력과 음속을 결정하기 위한 상태방정식은 Eq. 4의 JWL(Jones-Wilkins-Lee) EOS를 사용한다[7].

$$P_{partide,unreacted} = \quad (3)$$

$$\Gamma_0 e_0 + \begin{cases} \rho_0 c_0^2 \mu [1 + (1 - \frac{\Gamma_0}{2})\mu] / [1 - (s_0 - 1)\mu]^2 & \text{if } \mu > 0 \\ c_0^2 \rho_0 \mu & \text{if } \mu < 0 \end{cases}$$

$$c_{partide,unreacted}^2 = \rho_0 \Gamma_0 \frac{p - p_0}{\rho^2} + \begin{cases} \frac{\rho_0^2 c_0^2 [\rho + s_0(\rho - \rho_0)]}{[\rho - s_0(\rho - \rho_0)]^3} - \Gamma_0 \frac{\rho_0^2 c_0^2 (\rho - \rho_0)}{[\rho - s_0(\rho - \rho_0)]^3} & \text{if } \rho \geq \rho_0 \\ c_0^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{explosive,unreacted} = \quad (4)$$

$$Ae^{-R_1(\rho_0/\rho)} + Be^{-R_2(\rho_0/\rho)} + \frac{C}{(\rho_0/\rho)^{\omega+1}}$$

$$c_{explosive,partide,reacted}^2 = \frac{\rho_0}{\rho^2} [AR_1 e^{-R_1(\rho_0/\rho)} + BR_2 e^{-R_2(\rho_0/\rho)} - C \frac{1+\omega}{(\rho_0/\rho)^{2+\omega}}]$$

Eq. 3, Eq. 4에서 p 는 압력이고 e_0 는 내부에너지이며, ρ 는 밀도이다. $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 이고 c 는 음속이며, s 는 Hugoniot slope 계수이다.

RDX의 화학 반응을 해석하기 위해 Eq. 5와 같은 아레니우스 식을 적용한다.

$$k(T) = Ze^{-E_a/RT} \quad (5)$$

여기서 k 는 속도상수이고 Z 는 빈도인자이며, E_a 는 활성화 에너지(J/mol)이다. R 은 기체상수(J/Kmol)이고 T 는 온도이다.

대기 외란을 모델링하기 위해 Eq. 6, Eq. 7과 같은 전파식을 사용한다[9].

$$I_{target}(y,x) = \left| \frac{W_d}{W(x)} e^{-r^2/W(x)^2} \right|^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi_{bloom}(x,y,z) &= k_0 \int_0^z \Delta n(x,y,z) dz, \\ \Delta n(x,y,z) &= -\frac{\mu}{\nu} \int_{-\infty}^x I(\xi,y,z) d\xi, \\ \mu &= \frac{n_d(\alpha_a + \alpha_s)}{C_p \rho_0 T_0} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 I_{target} 은 타겟에서의 레이저 세기(W)이고 W_d 는 초기 빔폭(m)이며, $W(x)$ 는 x 값의 증가에 따른 빔폭의 변화이다. Δn 은 굴절률의 변화이고 ϕ_{bloom} 은 Thermal blooming에 의한 레이저 빔의 위상이다.

2.3 Numerical Analysis Method

2.3.1 레벨셋 및 고스트 유체 기법

SUS304와 RDX 간 경계면을 추적하기 위하여 레벨셋 기법[7]을 적용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + u_y \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

거리함수 ϕ 가 0이 되는 지점을 경계면으로, $\phi < 0$ 일 때를 물질의 안쪽 영역으로, $\phi > 0$ 일 때를 바깥쪽 영역으로 나타낸다. Eq. 8은 공간상으로는 WENO 기법으로 적분되며, 시간상으로는 3차 Runge-Kutta 기법으로 적분된다. 거리함수를 계산하는 과정에서 물질의 물성치가 급격히 변화하는 지점이 생기면 그 경계면에서 왜곡 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 주기적인 거리함수 초기화를 진행한다. 거리함수를 통해 경계면을 정확하게 찾으려면 물질과 물질 또는 물질과 빈공간에 대한 적절한 경계조건을 적용해야 한다.

물질과 물질의 경계면에서는 경계층을 중심으로 수직 방향의 속도, 온도, 응력성분과 정지 마찰력이 같다. 하지만 접선 방향의 속도는 불연속적으로 변하기 때문에 이러한 물리적인 사항을 기반으로 하여 경계조건을 고려하면, 속도는 Eq. 9와 같이 구할 수 있고,

$$u_p = v_n n_x + v_t n_y, v_p = v_n n_y - v_t n_x \quad (9)$$

응력은 Eq. 10과 같이 구할 수 있으며,

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= n_{x,A}^2 \sigma_{nn} + n_{y,A}^2 \sigma_{tt} - 2n_{x,A} n_{y,A} \sigma_{nt} \\ \sigma_{yy} &= n_{y,A}^2 \sigma_{nn} + n_{x,A}^2 \sigma_{tt} - 2n_{x,A} n_{y,A} \sigma_{nt} \\ \sigma_{tt} &= n_{x,A} n_{y,A} (\sigma_{nn} - \sigma_{tt}) + (n_{x,A}^2 - n_{y,A}^2) \sigma_{nt}\end{aligned}\quad (10)$$

압력은 상태 방정식을 통해서 구할 수 있다. 내부에너지는 인접한 물질들의 물성치 값을 외삽하여 구할 수 있다.

물질과 빈공간의 경계면에서는 응력이 0이 된다. 따라서 Eq. 11과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{n} \cdot (-pI + s_{ij}) = 0 \quad (11)$$

이 식을 이용하여 경계면에서의 응력 성분을 구하면 Eq. 12와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx,p} &= n_x^2 \sigma_{nn,p} - 2n_x n_y \sigma_{nt,p} + n_y^2 \sigma_{tt,p} \\ \sigma_{yy,p} &= n_y^2 \sigma_{nn,p} + 2n_x n_y \sigma_{nt,p} + n_x^2 \sigma_{tt,p} \\ \sigma_{xy,p} &= n_x n_y (\sigma_{nn,p} - \sigma_{tt,p}) + (n_x^2 - n_y^2) \sigma_{nt,p}\end{aligned}\quad (12)$$

나머지 변수들은 외삽하여 구할 수 있다.

2.3.2 병렬 처리 기법

폭굉파의 전파해석에 대한 수치해석 코드의 병렬화는 영역분할 기법을 이용해 수행한다. 영역분할 기법은 전체 영역을 여러 개의 세부 영역으로 분할하여 분할된 영역들을 각각의 프로세서들이 계산하는 방식이다. 세부 영역들의 경계면에서 데이터 교환은 message-passing을 이용한다. message-passing 방식은 병렬화에 있어 코드 작성과 해당 프로세서의 지정 등에 어려움이 있으나, 병렬화 성능이 높은 장점이 있다. 병렬화 작업에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 message-passing 라이브러리인 MPI를 이용하여 병렬화를 수행하였다. 분할된 세부 영역은 물리적인 경계면과 세부 영역 간의 가상 경계면이 존재하게 된다. 물리적인 경계면에서는 물리적 적합성을 따져 적절한 경계값을 부여하며, 영역

분할로 인한 가상 경계면에서는 다른 세부 영역 간의 통신을 통한 데이터 교환으로 경계값을 부여한다. 또한, 가상 경계면에서 고차 공간 정확도를 요구하는 경우에는 1개의 내부 영역과 1개의 가상 격자 경계면을 겹치게 하는 중첩 격자 계를 형성해야 한다. 유동 해석 코드의 병렬화는 기본적인 순차코드를 기반으로 한다. 순차코드에 병렬화가 필요한 서브루틴을 병렬화 기법을 통하여 구축하게 된다. 본 연구에서는 순차코드를 기반으로 한 2D, 3D Euler 코드의 병렬화 알고리즘을 기반으로 병렬화를 수행하였다. 해당 알고리즘은 Main processor가 연산을 하는 부분과 All processor가 연산을 하는 부분으로 나눌 수 있다. 병렬화가 필요한 서브루틴의 경우 MPI의 기본 통신문인 MPI_Send와 MPI_Recv 명령문으로 데이터 교환이 이루어진다. 기존의 순차코드에서는 Cell-Vertex 격자 기법을 이용하여 코드를 구성하였다. Cell-vertex 격자 기법의 경우 기존의 격자점을 Cell 중심으로 보고 계산을 수행하는 방식이다. Cell-Vertex 격자 기법을 이용한 코드의 병렬화는 영역 분할에 의한 세부 영역 생성이 모호해짐으로써 고차의 공간 정확도를 유지하기가 어려우며, 물리적인 경계조건을 적용하기가 까다로워진다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 세부 영역 생성에 있어 이웃한 세부 영역 간의 격자를 중첩시키면서 가상의 셀을 추가하여 고차 정확도를 유지하였다. 영역 분할로 인하여 발생한 세부 영역 경계의 경우, 순차코드에서는 내부 계산 영역에 해당하는 부분이며, 고차의 공간 정확도를 유지하는 영역이다. 하지만 영역 분할로 인하여 세부 영역 경계면에서는 고차의 공간 정확도를 유지할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 세부 영역 경계와 하나의 가상 영역을 두어 2차원의 경우 2개의 1차원 배열에 해당하는 원시변수를 병렬화하기 위한 세부 영역의 경계조건으로 교환하게 된다. 경계 조건의 교환에 사용되는 원시변수는 밀도, 속도, 에너지, 반응률이다. 전체 영역에 있어 유동의 변화량도 매 반복마다 교환하게 된다.

3. 해석 결과

3.1 대기 외란 미 적용시

고출력 레이저빔을 3.5 kW로 연속 조사 시 대기 외란을 적용하지 않은 모델과 적용한 모델에 대한 SUS304에서의 열전달 및 RDX의 폭발 시작 시간에 대해 각각 분석하였다.

다음의 Fig. 2는 대기 외란을 적용하지 않았을 때 SUS304 후면부(Fig. 1에서 RDX와 Steel이 접하는 부분)에서의 온도 분포를 나타낸 그래프이고, Fig. 3은 시뮬레이션 상의 온도 분포를 나타낸다. RDX의 발열 분해 반응 온도가 496.35 K이기 때문에 SUS304의 후면부 온도가 RDX의 발열 분해 반응 온도보다 높아지는 레이저 조사 후 약 13.5초에 후면부 RDX가 점화되어 폭발하는 것을 확인할 수 있다. RDX의 폭발로 인해 RDX와 접해있는 SUS304 후면부의 온도가 2500 K 이상 올라가는 것도 확인할 수 있다. 또한, 대기 외란을 적용하지 않았기 때문에 레이저빔에 의한 SUS304에서의 열전달이 균일한 원형을 이루며 최대온도 약 2500 K까지 오른 채 진행된다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 화학적 상변화 이전에는 0의 값을 가지고 상변화 이후에는 1의 값을 가지는 Species값의 변화를 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 약 13.5초부터 RDX 부분의 Species값이 0에서 1로 바뀌기 시작하는 것을 확인할 수 있고 이를 통해 13.5초에 RDX의 폭발 반응이 시작됨을 검증할 수 있다.

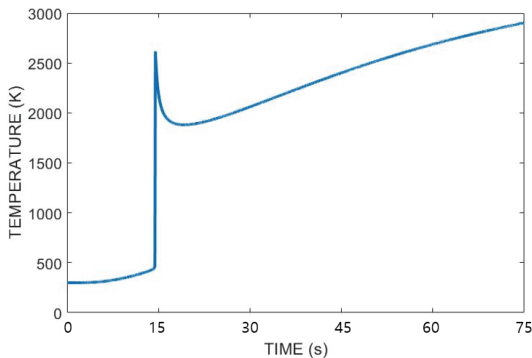


Fig. 2 Temperature distribution in the rear part of SUS304 without atmospheric disturbances.

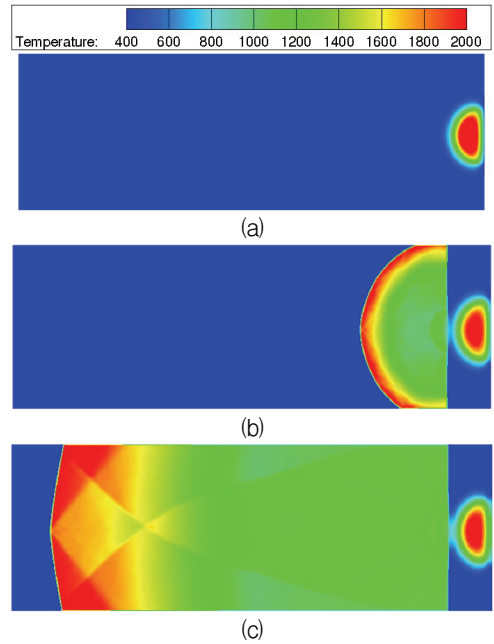


Fig. 3 Temperature simulation results without atmospheric disturbances at (a) $t=12.75$, (b) 13.500002 , (c) 13.50001 .

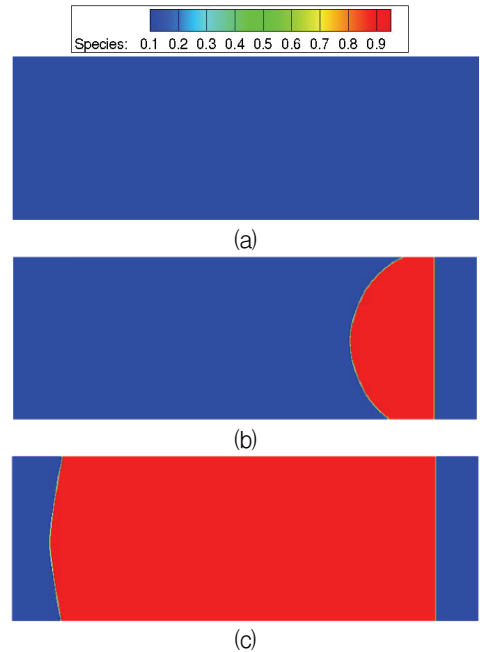


Fig. 4 Species simulation results without atmospheric disturbances at (a) $t=12.75$, (b) 13.500002 , (c) 13.50001 .

3.2 대기 외란 적용시

다음의 Fig. 5은 평균 대기 외란 조건(조사 거리 5 km에서 흡수 계수 $5 \times 10^{-6}/m$, 산란 계수 $5 \times 10^{-5}/m$, 공기 투과율 0.82, 굴절률 구조 계수 $0.391 \times 10^{-14} m^{-2/3}$, 바람 속도 5 m/s)을 적용하였을 때 SUS304 후면부(RDX 전면부)에서의 온도 분포를 나타내는 그래프이고, Fig. 6는 시뮬레이션 상의 온도 분포를 나타낸다. 대기 외란의 간섭을 받아 SUS304의 열전달이 대기 외란을 적용하지 않았을 때보다 느리게 일어난다는 것을 확인할 수 있고 약 107.25초에 후면부 RDX가 점화되어 폭발하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 대기 외란을 적용하였기 때문에 레이저빔에 의한 SUS304에서의 열전달이 불균일한 분포를 이루며 최대온도 약 1200 K까지 오른 채 진행된다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2와 Fig. 5의 RDX 폭발 이후 온도 분포 양상의 차이는 폭발 이후에도 연속 조사되는 타겟에서의 레이저 세기 차이 때문이다. Species값의 변화는 대기 외란 미 적용 시뮬레이션 결과와 같은 양상을 보이므로 생략하도록 한다. Figs. 7, 8은 대기 외란을 적용하였을 때 온도의 불균일한 분포를 확인하기 위해 레이저 조사 초기에 대기 외란의 유무에 따른 SUS304 측면부 및 전면부 단면의 온도 분포를 해석한 결과이다. 대기 외란을 적용하였을 때 레이저를 연속 조사하면, 불균일하던 온도 분포가 점차 균일한 형태를 띠기 때문에 초기의 온도 분포를 확인하여야 대기 외란을 적용하지 않았을

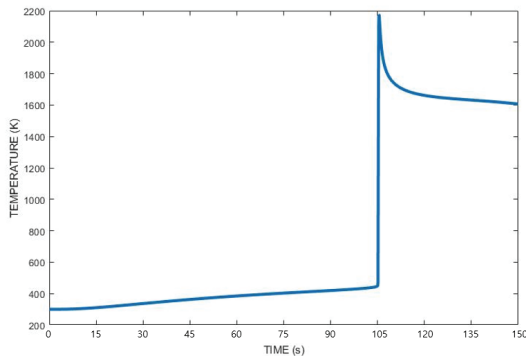


Fig. 5 Temperature distribution in the rear part of SUS304 with atmospheric disturbances.

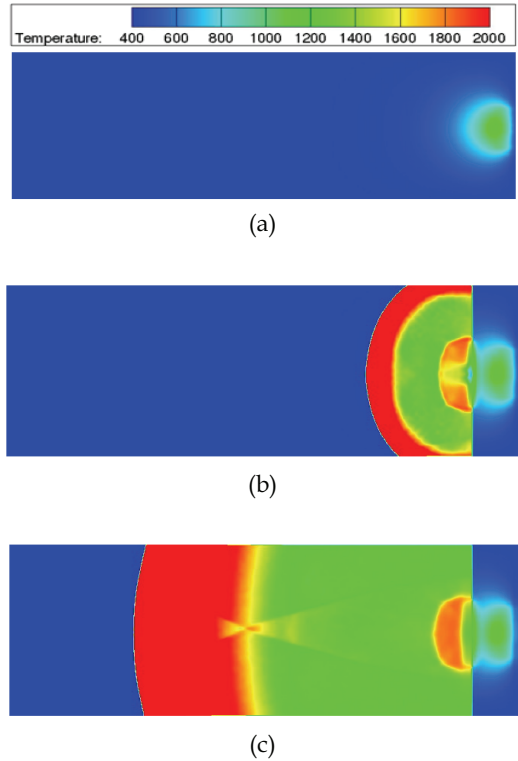


Fig. 6 Temperature simulation results with atmospheric disturbances at (a) $t=106.5$, (b) 107.25002, (c) 107.2501.

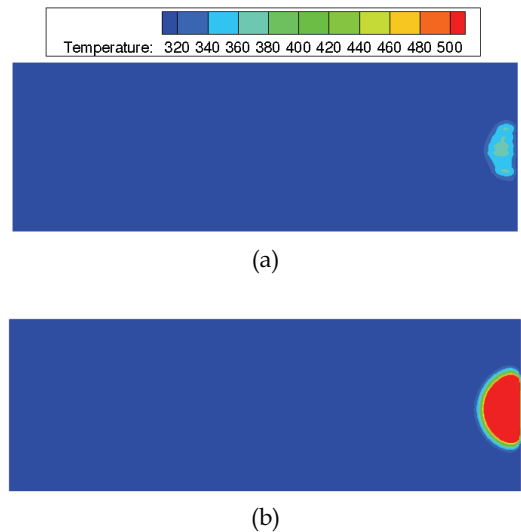
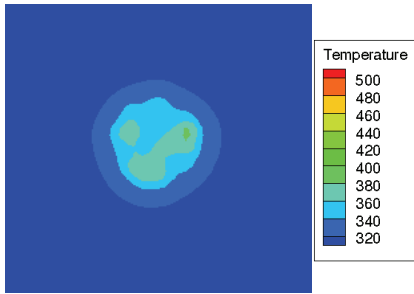
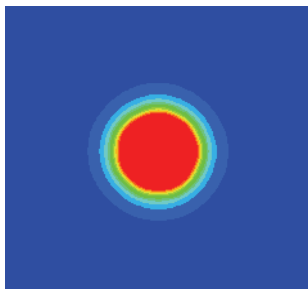


Fig. 7 Temperature distribution of the side with (a) and without (b) atmospheric disturbances at $t=1.5$ s.



(a)



(b)

Fig. 8 Temperature distribution of the front with (a) and without (b) atmospheric disturbances at t=1.5.

때와 적용하였을 때의 온도 분포 경향 차이를 명확히 확인할 수 있다. 대기 외란을 적용하지 않았을 때는 온도 분포가 선명한 원의 형태로 고르게 분포하는 반면, 대기 외란을 적용하였을 때는 대기에서의 빛의 흡수, 산란, 투과, 굴절, 바람 등에 의해 레이저빔의 왜곡이 생겨[9] 굴곡지고 불균일한 온도 분포가 형성됨을 확인할 수 있다.

3.3 산란 계수 변화에 따른 결과

평균 대기 조건(조사 거리 5 km에서 흡수 계수 $5 \times 10^{-6}/m$, 공기 투과율 0.82, 굴절률 구조 계수 $0.391 \times 10^{-14} m^{-2/3}$, 바람 속도 5 m/s)을 유지한 채 대기 외란 중 레이저빔의 세기에 가장 큰 영향을 미치는 산란 계수만 $5 \times 10^{-6}/m$, $5 \times 10^{-5}/m$, $5 \times 10^{-4}/m$ 로 변화시키면서 ($5 \times 10^{-5}/m$ 가 평균 대기조건) 시뮬레이션을 진행하였고, 이에 따른 RDX의 폭발 시작 시간에 대하여 분석하였다. 다른 대기 외란 조건은 동일하게 적용

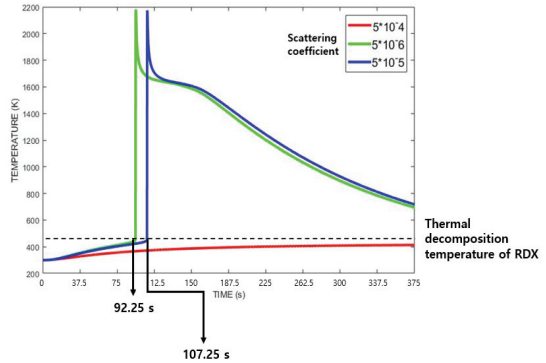


Fig. 9 Temperature distribution according to the change in the scattering coefficient.

하였다. Fig. 9는 산란 계수에 따른 RDX 폭발 시작 시간을 나타내주는 그래프이다. 산란 계수가 증가할수록 대기의 산란도가 증가해 타겟에 도달하는 레이저빔의 세기가 감소하게 된다. Fig. 9에서 산란 계수가 $5 \times 10^{-5}/m$ 일 때에는 평균 대기 조건이므로 3.1.2에서 시뮬레이션한 결과인 107.25초에 RDX가 폭발함을 확인할 수 있다. 산란 계수가 평균 대기 조건보다 0.1배인 $5 \times 10^{-6}/m$ 일 때에는 평균 대기 조건보다 레이저빔의 세기가 약 1.25배[10,11]로 높아져 RDX의 폭발 시작 시간이 약 92.25초로 평균 대기 조건에서의 폭발 시작 시간보다 15초 빠르게 폭발함을 확인할 수 있다. 산란 계수가 평균 대기 조건보다 10배인 $5 \times 10^{-4}/m$ 일 때에는 레이저의 세기가 약 0.11배[10, 11]로 낮아져 레이저를 375초 동안 연속 조사하였을 때에도 RDX의 발열 분해 반응 온도에 도달하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 대기 산란도의 증감에 따라 타겟에서의 레이저 세기가 변화하게 되고, 이에 따른 SUS304에서의 열전달 온도의 증감으로 인해 RDX의 폭발 유무 및 폭발 시작 시간이 결정된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고출력 레이저빔의 연속 조사와 대기 외란의 유무에 의한 금속의 열전달과

고폭 화약의 폭발 현상을 분석하였다. 먼저 대기 외란을 적용하지 않았을 경우 레이저의 출력량 만큼 표적 금속에서 균일한 분포의 열전달이 일어나게 되고, 금속의 후면부까지 열이 전달되어 고품 화약의 발열 분해 반응 온도까지 도달하게 되면 고품 화약의 폭발 현상이 발생하게 된다. SUS304에서는 레이저빔의 중심을 기준으로 균일한 원형의 열전달이 발생하였고 레이저를 조사한 지 약 13.5초 후에 후면부 온도가 RDX의 발열 분해 반응 온도까지 올라가게 되어 RDX의 폭발 현상을 확인할 수 있었다. RDX의 폭발 여부는 Species값의 변화로도 확인할 수 있었다. 다음으로 평균 대기 조건의 대기 외란을 적용하였을 경우 흡수계수에 따른 공기중에서의 레이저빔의 열 흡수와 바람, 굴절률 구조 계수, 공기 투과율과 산란 계수에 따른 공기 분자, 에어로졸 등에 의한 굴절 및 산란 등에 의해 대기 외란을 적용하지 않았을 경우보다 타겟에서의 레이저 세기가 약 2배 이상 줄어들고 열전달 온도 분포가 불균일해 금속에서의 열전달이 대기 외란을 적용하지 않았을 때보다 현저히 느려지는 현상을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 레이저를 조사한 지 약 107.25초 후에 후면부 온도가 RDX의 발열 분해 반응 온도까지 올라가게 되어 RDX가 폭발함을 확인할 수 있었고, 이는 대기 외란을 적용하지 않았을 때보다 약 8배 가량 폭발 시작이 느려짐을 보여주었다. 마지막으로 레이저빔의 표적 도달 범위 및 세기에 가장 큰 영향을 미치는 산란 계수[12]에 따른 RDX의 폭발 시작 시간을 비교하였다. 산란 계수 값은 평균 대기 조건과, 그보다 0.1배, 10배의 값을 각각 적용하여 시뮬레이션 하였다. 평균 대기 조건에서는 RDX의 폭발 시작 시간이 앞서 언급한 것처럼 107.25초였고 평균 대기 조건보다 0.1배의 산란 계수 값을 사용하였을 때에는 폭발 시작 시간이 92.25초로 15초 단축됨을 확인할 수 있었다. 평균 대기 조건보다 10배의 산란 계수 값을 사용하였을 때에는 375초 동안 레이저를 연속 조사하여도 RDX의 폭발 반응이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 대기 중의 분자, 에어로졸, 에어로졸의 열 등에 의한 산란 효

과가 레이저빔에 의한 고품 화약의 폭발 시작 시간의 변화를 야기하거나 폭발 여부 자체를 결정할 수 있는 중요한 요소가 됨을 확인할 수 있었다.

세계적으로 고출력 레이저에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다는 점에서 본 결과는 큰 의미가 있다고 할 수 있으며 특히 군사적으로 레이저를 이용한 표적 무능화 또는 미사일 요격 등의 장비에 적용 가능할 것으로 생각된다.

References

1. Baek, W.K., Lee, K.C., Kim, Y.H., Yoh, J.I., Sin, W.S., Koh, K.U. and Kim, H.Y., "The study of interaction between high energy laser and metallic materials," *Spring and Autumn Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Jeju, Korea, pp. 2164-2169, Nov. 2010.
2. Lee, K.C., Kim, K.H. and Yoh, J.I., "Modeling of high energy laser heating and ignition of high explosives," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 1-8, 2008.
3. Chris R. Fussman, "High energy laser propagation in various atmospheric conditions utilizing a new, accelerated scaling code," Master of science, Applied Physics, Naval Postgraduate School, Monterey, California, U.S.A., 2014.
4. Jan Stupl, and Götz Neuneck, "Assessment of long range laser weapon engagements: the case of the airborne laser," *Science & Global Security*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-60, 2010.
5. Kim, Y.C., Park, Y.S. and Yoh, J.I., "Slow and rapid thermal decomposition characteristics of enhanced blast explosives for burning in fuel-rich, oxygen-rich conditions," *Thermochimica Acta*, Vol. 678,

- 178300, 2019.
6. Oh, J.Y., Jung, H.W. and Yoh, J.I., "Observation of gunpowder-like thermochemical responses of a thermal energy storage system based on $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{Graphite}$ exposed to a heat transfer fluid," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 207, 118215, 2022.
 7. Kim, B.H., Choi, S.H. and Yoh, J.I., "Modeling the shock-induced multiple reactions in a random bed of metallic granules in an energetic material," *Combustion and Flame*, Vol. 210, pp. 54-70, 2019.
 8. Yoh, J.I., Kim, Y.C., Kim, B.H., Kim, M.S., Lee, K.C., Park, J.S., Yang, S.H. and Park, H.L., "Characterization of aluminized RDX for chemical propulsion," *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci*, Vol. 16, No. 3, pp. 418-424, 2015.
 9. Ahn, K.H., Lee, S.H., Park, I.K. and Yang, H.S., "Numerical simulation of high energy laser propagation through the atmosphere and phase correction based on adaptive optics," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 79, pp. 918-929, 2021.
 10. Thomas Fahey, Maidul Islam, Alessandro Gardi and Roberto Sabatini, "Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications," *Atmosphere*, Vol. 12, 918, 2021.
 11. Daniel A. Lack, Edward R. Lovejoy, Tahllee Baynard, Anders Pettersson and A. R. Ravishankara, "Aerosol absorption measurement using photoacoustic spectroscopy: sensitivity, calibration, and uncertainty developments," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 40, pp. 697-708, 2006.
 12. Daniel A. Lack, Edward R. Lovejoy, Tahlee Baynard, Anders Pettersson and A. R. Ravishankara, "Aerosol Absorption Measurement using Photoacoustic Spectroscopy: Sensitivity, Calibration, and Uncertainty Developments," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 40, No. 9, pp. 697-708, 2006.