



## 폐 추진제 소각을 위한 유동층 반응기 설계 및 CFD 공정 모사

이지현 · 이인규 · 김현수\*\* · 박정수\*\* · 오민\* · †문일

연세대학교 화공생명공학과, \*한밭대학교 화학생명공학과. \*\*국방과학연구소  
(2017년 11월 13일 접수, 2018년 4월 19일, 2018년 4월 20일 채택)

## Design and Simulation of Fluidized Bed System for Waste Propellant Treatment by Computational Fluid Dynamics

Jiheon Lee · Inkyu Lee · Hyunsoo Kim\* · Jungsoo Park\* · Min Oh\*\* · †Il Moon

*Dept. of Chemical&Biomolecular Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea*

*\*Agency of Defense Development,*

*\*\*Dept. of Chemical Engineering, Hanbat University, Daejeon, Korea*

*(Received November 15, 2017; Revised February 20, 2018; Accepted February 21, 2018)*

### 요약

최근 환경문제로 인해 폭발성 폐기물을 안전하게 소각 처리하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유동층 소각로를 이용한 처리 공정은 기존 방법보다 연소 가스 배출량이 현저하게 낮으며, 운전의 효율 또한 높다. 본 연구에서는, 폐 추진제 중 가장 많은 양이 폐기되고 있는 Double-based Propellant를 유동층 소각로에서 소각하는 공정을 전산유체역학 프로그램으로 모사하였다. Cylindrical Bed 내부에서 일어나는 7개의 연소 반응이 안전하게 모사되는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 실제 공정 설계를 진행하면, 앞으로 폭발성 폐기물 처리 공정 연구에 새로운 연구 방향을 제시할 것이라 사료된다.

**Abstract** - Recently, many studies have focused on the explosive waste treatment in terms of the safety and environmental pollution. A combustion process using fluidized bed incinerator has several profits : continuous process, low pollutive gases such as NOx, and high process efficiency.

This study focused on the design of the propellant combustion reactor by using computational fluid dynamics(CFD) simulation technique. As a result, the reactions are successfully simulated in cylindrical incinerator, and . The study will influence to the research about treatment of explosive wastes.

**Key words** : double-based propellant, fluidized bed, combustion, computational fluid dynamics

### 1. 서론

폐 탄약 및 추진제 등 폭발성 폐기물의 처리 방법은 소각을 하거나, 야외에서 기폭 시키는 방법들이 이용되어 왔다. 하지만 이는 연소 가스로 인한 환경 문제와 처리 시설의 안전 문제 등 여러 문제점을 안고 있다. 우리나라는 연간 약 3,000 톤의 폭발성 폐기물이 발생하고, 마땅한 처리 시설의 미비로 9,700 톤 규모의 폐 추진제가 미처리 상태로 적

재 중이다.

기존에 로터리 킬른을 이용한 소각 공정 연구를 진행했으나, 안전성에 대한 문제가 해결되지 않아 유동층 소각로를 이용한 소각 공정을 제시하게 되었다. 유동층 소각로를 이용한 처리 공정은 기존의 방법보다 완전 연소 비율이 높아 연소 가스 배출량이 현저하게 낮으며, 유동층의 특성상 운전의 효율성 또한 높다. 또한 반응기 내부 충전 입자와의 혼합 효과를 이용하여 연소 시 발생하는 열에너지를 효율적으로 분산시켜 고열이나 과압이 발생할 가능성을 줄여준다. 이에 유동층 반응기의 냉간 모델 실험 연구를 통해 소각로 내부에서 최적의 유동 현상

†Corresponding author:ilmoon@yonsei.ac.kr



Fig. 1. Rotary kiln



Fig. 2. Fluidized bed incinerator

과 혼합 효과를 기대할 수 있는 조건을 결정하였다. 이를 바탕으로 폐 추진제를 소각로 내부에서 연소시키는 공정을 설계하였고, 전산유체역학 프로그램인 Barracuda를 이용하여 입자의 거동과 반응기 내부 온도 변화, 기체 성분 변화를 EMMS approach를 이용하여 모사하고 분석하였다.

## II. 모사 방법 및 조건

### 2.1 유동층 소각로 설계

본 연구에서 모사하는 유동층 소각로는 최적의 유동화 조건을 결정하는 선행 연구를 바탕으로 선정되었다.[1]

Fig. 3에 나타난 유동층 소각로는 높이 2.0 m, 직경 0.5 m의 원통형으로 설계하였고, 소각로 아래에서 0.5 m/s의 속도로 440 K의 뜨거운 공기를 주입하여 유동

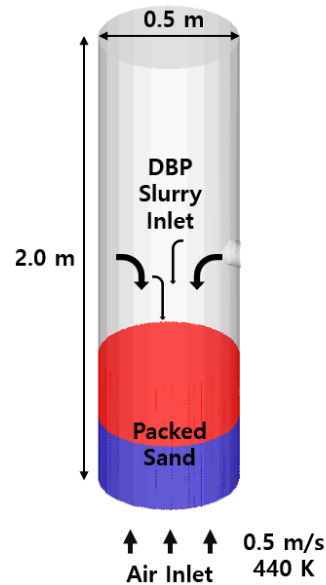


Fig. 3. Schemes of fluidized bed incinerator

화가 일어나도록 한다. 내부에는 직경 260  $\mu\text{m}$ 의 모래 입자를 소각로 높이의 30% 만큼 충전시켜 두었다. 유동화가 정상상태에 도달한 이후, 높이 1.1 m의 측면에서 슬러리 입자를 주입하여 연소시킨다. 슬러리는 공정 및 반응의 안정성을 위해 물과 Double based propellant(이하 DBP)를 1:1의 비율로 혼합한 입자로, 그 크기는 직경 3 mm이다. DBP는 Nitrocellulose 52%, Nitroglycerin 48%로 이루어져 있는 혼합물이다.[8]

### 2.2 Double-based propellant 연소 반응

DBP는 완전 분해되기까지 총 7개의 반응 메커니즘을 가진다. 열이 가해지면서 물이 증발하면 DBP가 발화되기 위한 조건이 갖추어지고, 표면에서부터 degradation이 일어나면서 gas가 발생하고 연쇄적으로 연소가 일어나게 된다. Condensed phase에서 일어나는 2개의 반응은 각각 DBP의 degradation 반응과 기체 발생 반응이다.[9] Gas phase에서는  $\text{NO}_2$ 에 대한 두 개의 이차 반응, NO-Carbon에 대한 반응, 그리고 알데하이드와 NO에 대한 세 개의 이차 반응이 연쇄적으로 일어난다.

Reaction 2와 Reaction 3는 같은 반응이지만, 각각 Condensed phase, Gas phase에서 일어나는 다른 반응이다. Condensed phase에서 일어나는 DBP 분해 반응의 반응열은 약 1,100 cal/g이다.[8] 각각의 반응식에 대한 반응 속도식은 선행되어 온 실험

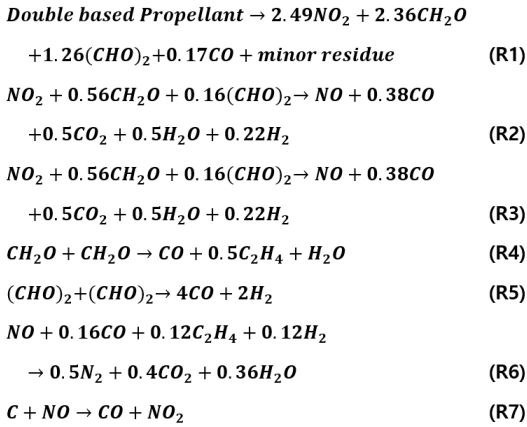


Fig. 4. Double based Propellant Reactions

으로부터 도출되었다.[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] 단위는 kg/m<sup>3</sup>s 로 모두 같다.

Fig. 5 는 Fig. 4 에 나타난 반응식 각각의 반응속도를 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5의 열화학적 변수들은 Fig. 6에 나타내었다. 모든 값들은 선행 연구에서 계산되거나 측정된 값을 사용하여 반응 속도를 계산하였다.[8]

### 2.3 유동화 조건

안전한 연소 조건을 만들기 위해 DBP를 주입하기 전에 반응기 내부는 유동 현상이 발생하는 정상 상태에 도달해야 한다. 선행 연구를 통해 15초가 지나면 모래 입자의 혼합이 모두 이루어지고 유동 현상이 활발하게 일어나는 것을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있었다.[1]

## III. 모사 결과 및 분석

### 3.1 입자 유동 분석

Fig. 8 은 슬러리가 주입되었을 때 반응기 내부의 모습을 모사한 것이다. 슬러리가 주입된 후 낙하하면서 물이 증발하게 되고, 그 크기가 점점 줄어든다. 이후 모래 입자 사이에 들어가 반응이 순간적으로 일어나게 된다. 이는 모래 입자가 슬러리 주변으로 퍼져 나가는 것을 보고 확인할 수 있다. 이로써 모래 입자가 연소에 의한 기체 발생 충격을 흡수하여 반응기 내벽을 보호하는 것을 확인하였다. 그리고 입자가 사라지는 시간은 처음 주입된 후 0.28초인데, 이는 매우 짧은 시간이다. 따라서 DBP 분해 반응은 매우 빠른 반응임을 알 수 있다.

$$R_1 = B_c \exp \left[ -\frac{E_c}{R_u T} \right] \rho_c \quad (\text{Eq. 1})$$

$$R_2 = B_{NO_2} p^{0.39} \exp \left[ -\frac{E_{NO_2}}{R_u T} \right] \rho_g Y_{NO_2} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$R_3 = A_{NO_2} p^{0.39} \exp \left[ -\frac{E_{NO_2}}{R_u T} \right] \rho_g Y_{NO_2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R_4 = A_{CH_2O} \exp \left[ -\frac{E_{CH_2O}}{R_u T} \right] \rho_g^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$R_5 = A_{(CHO)_2} \exp \left[ -\frac{E_{(CHO)_2}}{R_u T} \right] \rho_g^2 Y_{(CHO)_2}^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$R_6 = A_{NO} \exp \left[ -\frac{E_{NO}}{R_u T} \right] \rho_g^2 Y_{NO}^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$R_7 = A_{carb} p W \exp \left[ -\frac{E_{carb}}{R_u T} \right] \rho_g Y_{carb} Y_{NO} \quad (\text{Eq. 7})$$

Fig. 5. Reaction rates of double based propellant

Parameter	Value
$E_c$	167.4, kJ/mole
$E_{NO_2}$	20.9, kJ/mole
$E_{CH_2O}$	104.7, kJ/mole
$E_{(CHO)_2}$	83.7, kJ/mole
$E_{NO}$	209.3, kJ/mole
$B_c$	$1.0 \times 10^{17}$ , 1/s
$B_{NO_2}$	$1.3 \times 10^6$ , 1/s
$A_{NO_2}$	$1.0 \times 10^5$ , m <sup>3</sup> /kg·s
$A_{CH_2O}$	$5.0 \times 10^8$ , m <sup>3</sup> /kg·s
$A_{(CHO)_2}$	$5.0 \times 10^8$ , m <sup>3</sup> /kg·s
$A_{NO}$	$5.0 \times 10^8$ , 1/s
$Q_c$	-135, kcal/kg
$Q_{NO_2}$	1040, kcal/kg
$Q_{CH_2O}$	389, kcal/kg
$Q_{(CHO)_2}$	-539, kcal/kg
$Q_{NO}$	1900, kcal/kg
$\rho_c$	1620, kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	0.35, kcal/kg·K
$C_c$	0.40, kcal/kg·K

Fig. 6. Thermochemical parameters of double based propellant.

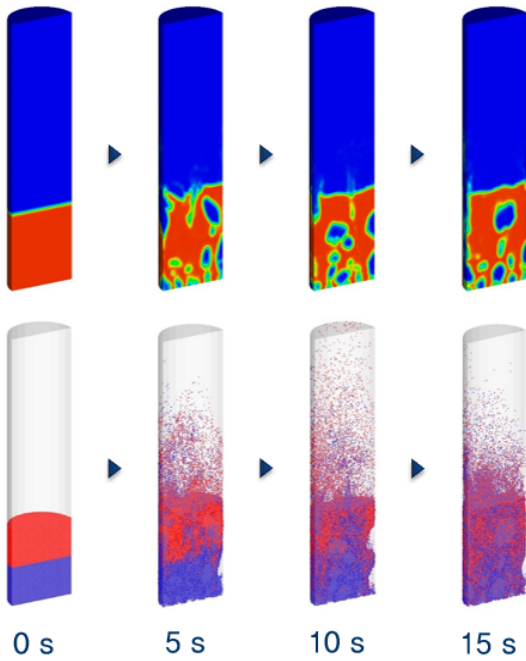


Fig. 7. Fluidization and Mixing effect of fluidized bed incinerator

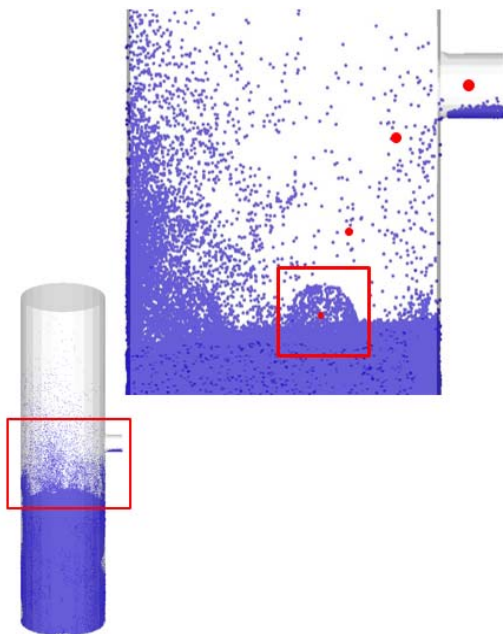


Fig. 8. Schemes of slurry injection

### 3.2 반응기 내부 온도 변화 분석

Fig. 9에서 슬러리 입자가 사라지는 순간인 15.28 초부터 반응기 내부에 온도 변화가 관찰되었고, 온도 변화는 불규칙한 구 형태의 cold spot으로 나타났다. 이는, 연소 공정은 발열 반응이지만 Feed에 포함되어 있는 물의 증발이 흡열 반응을 일으켜, hot spot이 아닌 cold spot이 생성되는 것으로 분석되었다.

Cold spot의 온도는 약 432K 이었고, 이후 다시 가열되면서 기체가 소각로 위로 빠져나간다. 기체가 발생하여 소각로 위로 빠져나가는데 약 0.7초의 시간이 소요된다. Superficial velocity에 따라 cold spot의 온도 변화는 나타나지 않았다. 모든 case에서 432K의 일정한 cold spot이 나타났다.

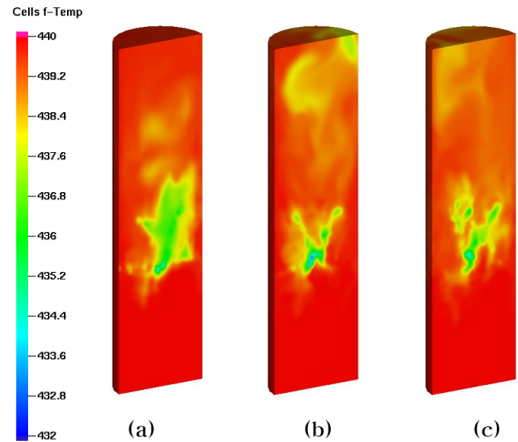


Fig. 9. Temperature profile at 30s. (a) 0.3m/s, (b) 0.4m/s, (c) 0.5m/s of superficial velocity of inlet air

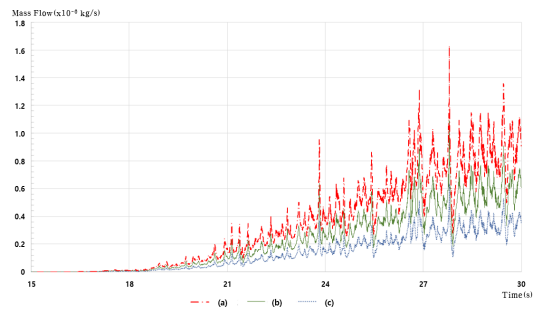


Fig. 10. Flow rates of NO by time. (a)0.3m/s, (b)0.4m/s, (c)0.5m/s of superficial velocity of inlet air

### 3.3 반응기 상부 기체 성분 분석

반응이 일어나는 시점에 Air flow가 급격하게 요동치는 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 이는 반응이 급격하게 일어나고 많은 양의 기체가 짧은 시간에 발생하면서 상부로 air가 불규칙하게 밀려 나가기 때문이다.

성분 분석 결과, cold spot이 사라지는 시간대에 생성된 화학종들이 반응기 상부로 빠져나가기 시작한다. 실제로 완전 연소가 일어난다면 소각로 상부에서는  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  만 관찰되어야 한다. 하지만  $NO_x$ , aldehyde 등 불완전 연소 산물이 관찰되는 것으로 보아 완전 연소가 일어나기 전에 기체가 밀려 올라가는 것을 알 수 있다.

또한, superficial velocity가 증가할수록 배출되는 기체의 양이 적어지는데, 이는 반응물이 내부에 머무르는 시간이 줄어들어 반응이 완전하게 일어나지 않기 때문이다.

## VI. 결 론

본 연구는 유동층 소각로 내부에서 폐 추진제가 폭발하지 않고 연소하는 운전 조건을 CFD를 이용하여 계산하고 나타내었다. 생성되는 Cold spot의 최저 온도는 약 432K 이고, 이는 반응기나 충전 입자의 물성 변화에 영향을 주지 않는 범위 내 온도이다. 운전 조건 설계에 큰 영향을 주는 변수로는, Feed의 비율(물:DBP), superficial velocity, sand particle의 크기 등이 있음을 알 수 있었고, 이에 대한 최적화가 추가로 수행될 필요가 있다. 모사 결과 반응 후에 생성되는 기체 중 일부는 완전하게 연소되지 않고 소각로 상부로 빠져나가는데, 이는 추가적인 후단 분리 정제 공정을 설계함으로써 처리할 수 있다.

또한 모사한 유동층 소각로 모델을 실제 공정 규모에 맞게 설계하면, 연간 2,100 톤 규모의 폐 추진제를 처리할 수 있다. 이와 같은 연구는, 국내에 누적되어 있는 폐 추진제 처리에 크게 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 차세대에너지물질특화센터(CEMRC)와 국방과학연구소(ADD)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

## 사용기호

A : gas phase rate coefficient  
 B : condensed phase rate coefficient  
 C : heat capacity  
 E : standard enthalpy of formation  
 Q : heat of combustion

## 그리스 문자

$\rho$  : density [ $kg/m^3$ ]

## 참고문헌

- [1] 이지현, 조성현, et al. "폭발성 폐기물 소각 공정 내 유동층 반응기 소각로의 Cold Model Simulation을 통한 최적 운전 조건 계산," Theories and Applications of Chemical Engineering, 22 (1), p.727, April 2016.
- [2] T.S. Roh, Tseng, Yang. "Effects of Acoustic Oscillations on Flame Dynamics of Homogeneous Propellants in Rocket Motors," Journal of Propulsion and Power Vol. 11, No. 4, July 1995.
- [3] Song, Y. H., Beer, J. M., and Sarofim, A. F., "Reduction of Nitric Oxide by Coal Char at Temperatures of 1250-1750K," Combustion Science and Technology. Vol. 25, pp.237-240, 1981.
- [4] Lengelle, G., Bizot, A., Duterque, J., and Trubert, J. F., "Steady-State Burning of Homogeneous Propellants," Fundamentals of Solid-Propellant Combustion, edited by K. K. Kuo and M. Summerfield, Vol. 90, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, New York, pp.361-407, 1984.
- [5] Bizot, A., and Beckstead, M. W., "A model for Double-Base Propellant Combustion," Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Symposium on Combustion, The combustion Inst., Pittsburgh, PA, pp. 1827-1834, 1988.
- [6] Faddoul, F., Most, J. M., and Joulain, P., "Combustion Kinetic of a Homogeneous Double Base Propellant," Dynamics of Deflagrations and Reactive System-Flames, edited by A. L. Kuhl, Vol. 131, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington, DC, pp. 275-296, 1989.

- [7] Lengelle, G., Duterque, J., Godon, J. C., and Trubert, J. F., "Solid Propellant Steady Combustion: Physical Aspects," AGARD Lecture Series 180, 1991.
- [8] Kubota, N., "Determination of Plateau Burning Effect of Catalyzed Double-Base Propellant," Proceedings of the 17<sup>th</sup> Symposium on Combustion,, The Combustion Inst., Pittsburgh, PA, pp. 1435-1441, 1979
- [9] Aoki, I., and Kubota, N., "Combustion Wave Structures of High and Low-Energy Double-Base Propellants," AIAA Journal, Vol. 20, pp.100-105, 1982