

# 알루미늄 함유량 변화에 따른 알루미늄 입자가 함유된 HMX 성능에 관한 수치 연구

김우현\* · 광민철\* · 여재익\*†

## Numerical investigation on the performance of the aluminized HMX with varying aluminum concentration

Wuhyun Kim\* · Min-cheol Gwak\* · Jai-ick. Yoh\*\*†

### ABSTRACT

The performance characteristics of aluminized high explosive are considered by varying the aluminum(Al) concentration in a two-phase model. Since the time scales of the characteristic combustion process of high explosives and Al particles differ, the process of energy release behind the leading detonation wave front occurs over an extended period of time. Two cardinal observations are reported: a decrease in detonation velocity with an increase in Al concentration and a double front detonation (DFD) feature when anaerobic Al reaction occurs behind the front. In the current study, a series of confined rate sticks are considered for characterizing the performance of aluminized HMX with a maximum Al concentration of 50%. The simulated results are compared with the experimental data for 5%-25% concentrations.

### 초 록

본 연구에서는 Al 입자가 함유된 고폭약의 성능 특성을 2 상 모델(two-phase model)을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. Al 입자의 점화와 연소시간은 고폭약에 비해 상대적으로 긴 시간이 요구되기 때문에, Al 입자연소에 의한 에너지 발산은 고폭약의 데토네이션 후방에서 이루어진다. Al 입자를 함유하는 고폭약은 Al 함유량이 증가함에 따라 데토네이션 속도의 감소와 고폭약 데토네이션 후방에서 Al 입자 연소가 일어나며 이중 데토네이션이 관찰되는 특징이 있다. 본 연구에서는 Al 입자가 함유된 HMX의 데토네이션 특성을 재현하기 위해 최대 Al 함유량 50%를 갖는 confined rate stick이 고려되었으며, 수치해석 결과는 5-25% 함유량에 대한 실험결과와 비교되었다.

Key Words: Aluminized High Explosive(알루미늄 입자가 포함된 고폭약), Doble-Front Detonation (이중 데토네이션)

\* 서울대학교 기계우주항공공학과

† 연락처, [jjyoh@snu.ac.kr](mailto:jjyoh@snu.ac.kr)

TEL : (02) 880-2841

## 1. 서 론

본 연구에서는 고폍약의 데토네이션에 의한 고온 및 고압 조건에서 알루미늄(Al) 입자의 후 연소를 다룬다. 가연성 또는 반응성 기체 및 고폍약 내에서의 Al 입자의 연소에 관한 광범위한 연구가 보고되어있다. 특히, 기체 유동에서 Al 입자의 거동에 대한 수치 해석을 위하여 2상 모델 (Two-phase model)이 개발되었다 [1]. 본 연구에서, 이전에 가연성 기체의 데토네이션 내에서 Al 입자의 연소를 위해 개발된 two-phase model을 Al 입자가 포함된 HMX의 현상을 묘사하기 위하여 재구성하였다. 수치 해석의 결과는 이중 데토네이션 (double-front detonation)현상과 데토네이션 속도를 관찰하였으며, 데토네이션 전파 속도의 결과는 실험 결과와 비교되었다.

## 2. 수치적 모델

본 연구에서는 공간 차분과 시간 차분을 위해 3차 Convex ENO 기법과 3차 Runge-Kutta (RK) 기법을 각각 사용하였다.

### 2.1 지배방정식

Two-phase model은 Eulerian multiphase 보존 법칙을 기반으로 Eqs. 1-6과 같이 지배 방정식을 구성하였다. 여기서,  $\rho_{Al}$  ( $=2.7 \text{ g/cm}^3$ )는 고체상의 Al의 밀도이며,  $d_p$ 는 초기 입자의 직경이다. 직교 좌표계를 사용할 경우에는  $\phi = 0$ 이며, 원통 좌표계를 사용할 경우에는  $\phi = 1$ 이다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = RHS \quad (1)$$

$$S = [ \rho, \rho v_1, \rho v_2, \rho E_{HMX}, \rho \lambda, \sigma, \sigma u_1, \sigma u_2, \sigma E_{Al} ]^T \quad (2)$$

$$F = \left[ \begin{array}{c} \rho v_1, \rho v_1^2 + P, \rho v_1 v_2, v_1 (\rho E_{HMX} + P), \rho \lambda v_1 \\ \sigma u_1, \sigma u_1^2, \sigma u_1 u_2, u_1 \sigma E_{Al} \end{array} \right]^T \quad (3)$$

$$G = \left[ \begin{array}{c} \rho v_2, \rho v_1 v_2, \rho v_2^2 + P, v_2 (\rho E_{HMX} + P), \rho \lambda v_2 \\ \sigma u_2, \sigma u_1 u_2, \sigma u_2^2, u_2 \sigma E_{Al} \end{array} \right]^T \quad (4)$$

$$RHS = \left[ \begin{array}{c} \dot{\sigma}, \dot{\sigma} u_1 - \dot{f}_1, \dot{\sigma} u_2 - \dot{f}_2 \\ -Q_H + \dot{\sigma}(E_{Al} + \Delta H) - \dot{f} \cdot \vec{u}, \rho w_{HMX} \\ -\dot{\sigma}, -\dot{\sigma} u_1 + \dot{f}_1, -\dot{\sigma} u_2 + \dot{f}_2 \\ Q_H - \dot{\sigma} E_{Al} + \dot{f} \cdot \vec{u} \end{array} \right]^T + R \quad (5)$$

$$R = -\frac{\phi}{x} \left[ \begin{array}{c} \rho v_1, \rho v_1, \rho v_1 v_2, v_1 (\rho E_{HMX} + P), \rho \lambda v_1 \\ \sigma u_1, \sigma u_1^2, \sigma u_1 u_2, u_1 \sigma E_{Al} \end{array} \right]^T \quad (6)$$

여기서  $\rho, v, E_{HMX}, \lambda, \sigma, E_{Al}$ 는 희석된 HMX 밀도, 연소물의 속도, 연소물의 총 에너지, 고폍약 연소물의 질량분율, 희석된 Al 입자 밀도, Al 입자 속도, Al 입자의 총 에너지를 나타낸다. 그리고, 각 입자의 연소 시간은 Al 입자에 대한 산화물 양을 고려한 경험적 법칙을 따른다[2].

$$\dot{\sigma} = \frac{3\sigma}{t_b} (1 + 0.276 \sqrt{Re}) ; T_{Al} \geq T_{ign} \quad (7)$$

$$/else \dot{\sigma} = 0$$

$$t_b = K d_p^2 / \psi^{0.9} \quad (8)$$

$$\dot{f} = \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_s} \frac{\sigma}{d_p} C_D (v - u) \|v - u\| \quad (9)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4.4}{\sqrt{Re}} + 0.42 \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho d_p \|v - u\|}{\mu} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_H = \frac{6\sigma Nu k_g (T_{HMX} - T_{Al})}{\rho_{Al} d_p^2} \quad (12)$$

$$Nu = 2 + 0.459 Re^{0.55} Pr^{0.33} \quad (13)$$

$\psi$ 는 Al을 산화시킬 수 있는 기체 성분의 부피 비,  $C_D$ 는 Al 입자의 항력 계수,  $T_{Al}$ 은 고체상 Al 온도,  $T_{HMX}$ 는 HMX 온도이다

### 2.1 고폍약 반응 모델과 상태방정식(EOS)

본 연구에서 고려하는 고폍약 HMX, PBX 9501 (95% HMX/ 5% Estane, BDNPA/F)의 반응 모델과 상태방정식(EOS)은 I&G model과 JWL EOS를 사용하였다 [3].

### 3. 결과 및 논의

#### 2.1 고폭약 반응 모델과 상태방정식(EOS)

본 연구에서는 실험 조건과 동일한  $\phi 40 \times 45$  (mm) Confined rate stick of Aluminized HMX 에 대하여 수치 해석을 수행하였다[4]. Confiner 의 재료는 구리이며 두께는 2 mm이다. 폭약 내 의 Al 입자크기는  $7\mu\text{m}$ 이며, 함유량은 0-50%를 고려하였다. 계산공간은 Fig 1와 같이 초기에 세 구성요소로서 분할되었으며, 안쪽부터 고폭약, 구리 그리고 void이다. 계산 공간 내에서 구성 요소 간의 경계는 level set method를 사용하여 분할된다. 또한 경계면 근처의 경계 조건은 ghost fluid method (GFM)에 의해 결정된다[5].

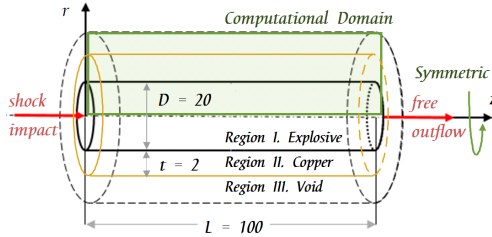


Fig. 1 Computational domain of two dimensional cylindrical copper confined rate stick

수치 해석결과를 통해 Al 입자의 연소시간 Eq. 8에서  $K = 1.894 \times 10^6 \text{s/m}^2$ 가 본 문제의 DFD 형상을 모사하기에 적절하였다. Al 입자 함유량이 증가함에 따라서 데토네이션 속도 및 von Neumann spike 압력 변화는 Fig 2을 통하여 확인할 수 있다. 각 압력선도는 동일 시간,  $6\mu\text{s}$ 에서 측정되었으며, 데토네이션 전파 속도는 Al 입자가 함유되지 않은 폭약에 비해 Al 함유량이 5%, 15% 그리고 25%로 증가할수록,  $8873\text{m/s}$ 에서  $8774\text{m/s}$ ,  $8631\text{m/s}$  그리고  $8533\text{m/s}$ 로 감소하였다. von Neumann spike 압력은 Al 함유량이 증가함에 따라서 38.6 GPa에서 각각 37.26, 36.2 그리고 31.85 GPa로 감소했다. 또한, DFD 형상은 5%의 저 농도에서는 나타나지 않지만, Al 함유량을 15%로 증가 시키면 DFD 구조가 희미하게 나타난다. 또한, Al 함유량이 25%로 증가하게 되면, DFD는 2nd peak 압력의 증가

의 결과로서 더욱 명확하게 나타난다.

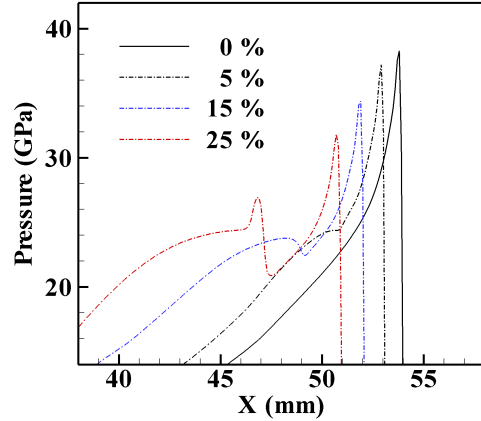


Fig. 2 Comparison of detonation profiles of aluminized HMX with different Al concentration (0, 5, 15, and 25%) and constant particle size  $7\mu\text{m}$  taken at  $6.0\mu\text{s}$ .

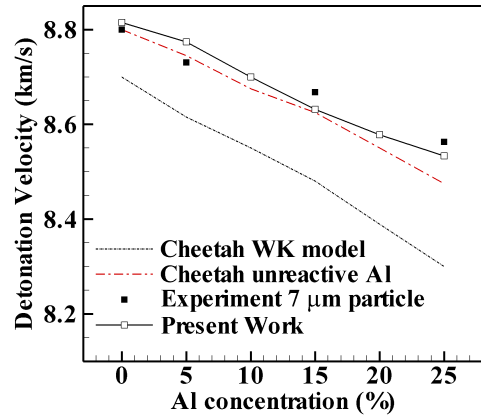


Fig. 3 Detonation velocity versus Al concentration in aluminized HMX from 2 mm confined copper, 20 mm diameter rate stick experiments [4], present simulation, and Cheetah equilibrium calculations

실험 결과 [4]와 aluminized HMX의 데토네이션 전파속도 변화에 대한 수치 결과의 비교는 Fig. 3.에 나타나져 있으며, Cheetah 코드 결과와도 비교되었다. 실험은 3개의 Al 함유량 (5, 15, 25%)로 수행되었으며, 본 수치 모델과 Cheetah 계산은 10%와 20%의 2가지 Al 함유량을 추가하여 5가지 함유량에 대하여 수행되었다.

Al 함유량이 증가함에 따라 데토네이션 속도가 감소하는 요인에는 크게 두 가지가 있다. 첫째, Al 함유량이 증가함에 따라 전체 폭발물에서 HMX 폭발물의 질량이 감소되어 기본 폭발물의 폭발 에너지가 감소한다. 둘째로, HMX 고폭약의 데토네이션 운동량과 에너지는 Al 입자와의 상호작용으로 인해 손실된다. 이 두 가지 요소는 현재 모델에서 고려되며, 예측된 데토네이션 속도는 Al 함유량에 따라 감소하고 실험 측정과의 오차는 0.4 % 이내를 갖는다. Cheetah code를 통한 비 반응성 Al 입자의 열 화학적 평형 계산은 약 1 %의 오차를 나타내지만 HMX 폭발 표면 뒤의 입자의 반응과 후 연소는 시뮬레이션될 수 없었다. 대신 Wood-Kirkwood (WK) 반응 모델은 Cheetah code에서 혼합문제를 다루기 위해 사용되었다 [6]. Cheetah-WK가 점화 지연과 에너지 방출에 대한 정 해석을 제공할 수는 있지만, DFD 구조와 Al 입자와 기본 폭발물간의 운동량과 에너지의 교환을 정량화하는 데는 부족하다.

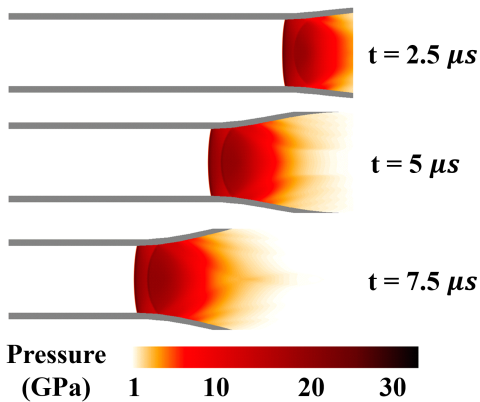


Fig. 4. Pressure contours of 25 % aluminized HMX confined rate stick simulation

이차원 원통좌표계에서의 데토네이션 전파 형상은 Fig. 4과 같은 압력장으로 나타낼 수 있으며, 데토네이션 전파 속도, 8533 m/s는 M.F. Gogulya et al[4] 에 의해 수행된 실험값, 8560 m/s를 잘 모사하였다.

Fig. 4는 Al 농도가 0 %에서 25 %로 증가함에

따라 DFD의 형상이 분명해짐을 보여준다. DFD 구조의 존재 또는 부재는 문헌에 보고된 이전의 실험으로부터 다루어지지 않았다. 이러한 이유로 동일한 형상에 대하여 실험적 최대 Al 함유량을 초과하는 rate stick에 대하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 5는 Al 함유량이 35%에서 50%로 증가한 경우의 데토네이션 압력 선도를 보여준다.

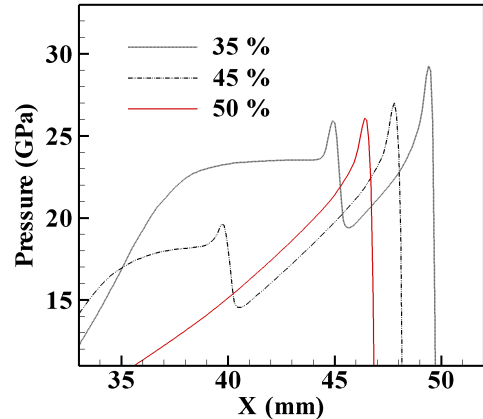


Fig. 5. Comparison of detonation profiles of heavily aluminized HMX with different concentration of Al (35, 45, and 50 %) at 6  $\mu$ s

Fig. 2에서의 결과와 달리, Fig. 5에서는 Al 함유량이 35%에서 45%로 증가함에 따라 두 번째 peak 압력이 감소함을 보여준다. 또한, Al 함유량이 50%에 도달하면 DFD 구조가 사라지고 데토네이션 속도가 낮은 하나의 데토네이션 충격과 압력형상을 갖는다. Al 함유량의 증가하에 따라서 HMX의 전체 체적 분율이 감소하며, 그 결과로 HMX의 반응물의 전체 에너지는 감소한다. 따라서, rate stick 내의 Al 입자를 점화시키기에 충분한 에너지가 존재하지 않는다. Eq. 12에서, HMX의 생성물의 불충분한 에너지는 Al 입자를 가열하기에 불충분한 에너지 교환율을 초래한다. 따라서, 50% Al 함유량이 나타내는 과도하게 Al 입자를 함유한 폭발물의 경우, Al 입자가 해당 발화온도에 도달하지 못하고 Al 입자의 연소가 불가능해진다. 이러한 비효율을 피하기 위해 일반적으로 사용되는 Al 입자가 포함된 고폭발물의 최대 Al 함유량은 35%이다 [7].

#### 4. 결론

기존의 AI 입자가 함유된 고폭약에 대한 연구는 단일 함유량에 대하여 반응식을 모델링 하였으며, 이 방식은 AI 함유량에 따라서 각기 새롭게 모델링되어야 했다. 하지만, Two-phase model을 적용함으로써 이러한 번거로운 반응모델링의 제한을 없앨 수 있으며, 하나의 순수 고폭약 반응모델을 이용하여 다양한 AI 함유량에 따른 고폭약의 모델링을 할 수 있다. 또한 이를 바탕으로 이중 데토네이션 형상과 같은 데토네이션 성능을 정량적으로 계산할 수 있다. 이는, 고폭약 제작 전에 AI 입자의 함유량과 직경에 따른 고폭약의 성능(폭속/압력/온도 등)을 사전에 예측함으로써 추후 고폭약 제작 관련 연구에 활용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

#### 참 고 문 헌

1. Veyssiere, B., Khasainov, B.A., "A model for steady, plane, double-front detonations (DFD) in gaseous explosive mixtures with aluminum particles in suspension," *Combustion and Flame*, Vol.85, No. 1, 1991, pp.241-253
2. Price, E. W., "Combustion of metalized propellants," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1984, Vol.90, p.479-513
3. Tarver, C. M., "Ignition and Growth Reactive Flow Modeling of Recent HMX/TATB Detonation Experiments," *19th Biennial APS Conference on Shock Compression of Condensed Matter*, Tampa, FL, United States, 2015
4. Gogulya, M., Makhov, M., Dolgoborodov, A., Brazhnikov, M., Arkhipov, V., Shchetinin, V., "Mechanical Sensitivity and Detonation Parameters of Aluminized Explosives," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol.40, No. 4, 2004, pp.445-457
5. Kim, K., Yoh, J. J., "A particle level-set based Eulerian method for multi-material detonation simulation of high explosive and metal confinements," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34, No. 2, pp.2025-2033
6. Fried, L E., "CHEETAH: A Next Generation Thermochemical Code," Lawrence Livermore National Laboratory, 1994
7. Trzcinski, W. A., "Thermobaric and Enhanced Blast Explosives - Properties and Methods," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol.40, 2015, pp.632-644