creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

알루미늄 입자 함유량에 따른 폭약의 데토네이션과 폭발 성능에 대한 수치 연구

Numerical Investigation of Detonation and Brisance Performance of Aluminized Explosives According to the Aluminum Content

2018년 2월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 우 현

초 록

본 연구에서는 이종물질 모델을 이용하여 알루미늄(Al) 입자의 질량분율 변화에 따른 Al 입자를 함유하는 폭약의 성능을 다루고 있다. Al 입자와 고폭약은 점화와 연소에 대한 특성 시간 척도가 다르기 때문에, 데토네이션 충격파 후방에서 비교적 긴 시간동안 에너지 방출이 일어난다. 질량, 운동량, 그리고 에너지 보존법칙 하에 Al 입자와 고폭약 산화물과의 상호작용을 다루는 다상 물질이론을 적용한 전산모사를 위하여, 이상모델 (two-phase model)이 적용되었다. 또한 기초폭약으로 HMX가 고려되었다. Al 입자를 함유하는 폭약의 데토네이션 속도와 가속능력을 평가하기 위하여, 두 종류의 confined rate stick test가 고려되었다. Confined rate stick test에 대한 전산모사 결과는 0%-25%의 Al 질량분에 대하여 실험결과와 비교되었다. 전산모사와 실험결과와의 비교에 따르면, Al 입자 함유량이 증가함에 따른 데토네이션 속도의 감소와 최대 가속능력을 위한 최적의 Al 함유량의 존재에 대하여 실험결과를 모사할 수 있었다. 추가적으로, Al 입자 함유량에 따른 폭발 능력을 평가하기 위하여 plate dent test가 고려되었으며, Al 입자 함유량에 따른 가속 능력의 경향성과 같은 결과를 나타내었다.

주요어 : 알루미늄 입자를 함유한 폭약 (aluminized explosives), 전산모사 (Numerical simulation), 이상모델 (Two-phase model)

학번 : 2016-20731

목 차

초 록 ····· i
목 차 ····· ii
표 목차 ····· iv
그림 목차 ····· iv

제 1 장 서론 1

제 2 장 수치적 모델 3
2.1 이상모델의 주요 가정과 수치적 초기 값 설정 ····· 3
2.2 지배방정식 ····· 5
2.2.1. 이상모델 ····· 5
2.2.2. 기초 폭약의 반응모델과 상태방정식 ····· 8

제 3 장 Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션 15
3.1 격자 크기에 따른 해석능력과 검증 ····· 15
3.1.1. 격자 크기에 따른 해석능력 ····· 5
3.1.2. 열역학적 상태량 검증 ····· 8
3.2 Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션 속도 ····· 19
3.2.1. 계산영역 설정 ····· 5
3.2.2. 결과 및 논의 ····· 8

제 4 장 Al 입자를 함유한 HMX의 폭발 성능 3
4.1 Al 입자를 함유한 HMX의 가속능력 ····· 15
4.1.1. 계산영역 설정 ····· 19
4.1.2. 결과 및 논의 ····· 25
4.2 Al 입자를 함유한 HMX의 충격파 성능 ····· 19
4.2.1. 계산영역 설정 ····· 19
4.2.1. 결과 및 논의 ····· 19

제 5 장 결론 34

참고 문헌 ····· 35
Abstract ····· 38

표 목차

표 2.1 95% HMX (0% Al)의 I&G 반응모델 매개변수 ····· 9
표 2.2 95% HMX (0% Al)의 JWL EOS 매개변수 ····· 9
표 3.1 95% HMX (0% Al)의 열역학적 상태량과 반응영역 길이에 대한 실험결과와 수치해석결과와의 비교 ····· 12
표 4.1 95% HMX (0% Al)의 가속능력에 대한 실험결과와 수치해석 결과와의 비교 ····· 21
표 4.2 95% HMX (0% Al)의 dent에 대한 실험결과와 수치해석결과와의 비교 ····· 30

그림 목차

그림 2.1 Al 입자를 함유하는 이종물질 고체폭약 혼합물을 위한 이상 모델의 구조 ····· 3
그림 3.1 95% HMX의 기폭 현상 수치해석을 위한 격자 크기에 따른 해석 능력 시험 ····· 11
그림 3.2 95% HMX의 기폭현상에 따른 수치해석의 열역학적 상태량과 반응영역 길이 ····· 12
그림 3.3 2 차원 원통형 계산영역: 2 mm 두께를 갖는 copper confined rate stick (D = 20 mm, L = 100 mm) ····· 14
그림 3.4 충격에 의한 점화 후 6 μs에서 다양한 Al 질량분율 (0 %, 5 %, 15 %, 및 25 %)을 갖는 Al 입자를 함유하는 HMX의 데토네이션 전파에 대한 수치해석 결과 ····· 15

그림 3.5 충격에 의한 점화 후 Al 입자를 함유하는 HMX의 데토네이션 전파형상: (a) 4 μs, (b) 6 μs, (c) 8 μs ····· 16
그림 3.6 Al 질량분율에 따른 데토네이션 속도의 실험결과와 수치해석 결과와의 비교: 직경 20 mm와 두께 2 mm를 갖는 copper confined rate stick 실험 ····· 17
그림 4.1 2 차원 원통형 계산 영역 : 5 mm 두께를 갖는 steel confined rate stick (D = 20 mm, L = 120 mm) ····· 19
그림 4.2 Confinement shell의 반경방향 팽창 속도 측정 방식 ····· 19
그림 4.3 충격에 의한 점화 후 Al 질량분율 15%를 갖는 HMX에 대한 steel과 폭약에 대한 밀도장과 shadowgraph: (a) 6 μs, (b) 8 μs, (c) 10 μs ····· 20
그림 4.4 Al 질량분율에 따른 가속능력에 대한 실험결과와 수치해석 결과와의 비교: 직경 20 mm와 두께 5 mm를 갖는 steel confined rate stick 실험 ····· 22
그림 4.5 다양한 Al 질량 분율 (0 %, 5 %, 15 % 및 25 %)을 갖는 Al 입자를 함유하는 HMX의 폭발로 인한 시간에 따른 confinement shell의 수치해석 반경방향 팽창속도 ····· 24
그림 4.6 Plate dent test의 실험 설정: D = 41.3 mm, L = 203 mm를 갖는 unconfined rate stick ····· 27
그림 4.7 Plate dent test의 수치해석적 설정: D = 41.3 mm, L = 40 mm를 갖는 unconfined rate stick ····· 27
그림 4.8 충격에 의한 점화 후 4 μs에서 steel plate를 향한 95% HMX (0% Al)에 대한 폭발 전파의 밀도장 ····· 28
그림 4.9 95% HMX (0% Al)의 충격에 의한 점화 후 dent의 진행과 plate내부 반경 방향 deviatoric stress 장 및 압력 등고면: (a) 6 μs, (b) 8 μs, (c) 10 μs, (c) 12 μs ····· 29

그림 4.10 충격에 의한 95% HMX 점화 후 시간에 따른 dent 깊이에 대한 수치해석 결과 ····· 30
그림 4.11 Al 질량분율 5%를 갖는 Al 입자를 함유하는 HMX의 충격에 의한 점화 후 dent의 진행과 plate내부 반경 방향 deviatoric stress 장 및 압력 등고면: (a) 6 μs, (b) 8 μs, (c) 10 μs, (c) 12 μs ····· 31
그림 4.12 다양한 Al 질량분율에 따른 plate dent test에 대한 수치해석 dent 깊이 ····· 31

제 1 장 서론

본 연구에서는 고폭약 HMX의 연소에 의한 고온, 고압환경 내 Al 입자의 후연소를 포함하는 Al 입자를 함유한 폭약을 고려한다. Al 입자는 호기성 반응에서 일반적 폭약보다 5-6배의 발열량을 방출하므로 폭약 제조에 자주 이용된다. 그러므로 폭발현상 내 Al 입자의 연소는 국방관련 분야에서 상당한 관심을 받아오고 있다. 하지만, 폭약 내 Al 입자 함유의 단점 중 하나는 Al 입자가 고 함유된 폭약에서 Al 입자의 불완전 연소이다. 그에 따라서, 폭약 내에서 Al 질량분율에 따른 폭약 성능 또한 실질적으로 고려되어져왔다. 일반적으로, 최대 Al 입자를 함유한 폭약의 폭발 성능은 단지 높은 Al 함유량에서 나타나지 않고, 어느 최적의 Al 입자 함유량에서 나타난다. 이러한 주요 현상은 실험적으로, 가속 능력 (AA: Acceleration ability)과 plate dent test에서 보고되었다. 그림 1.1(a)에서 보이듯, Al 입자를 함유한 폭약 RDX와 HMX의 confined rate stick test 실험결과에서, 최대 AA에 대하여 최적의 Al 함유량 존재한다는 것이 보고되었다. [1, 2]. 이러한 현상은 그림 1.1(b)에서 보이듯, Al 입자를 함유하는 다공성 HMX 기반 폭약의 dent 결과에서도 관찰되었다 [3].

반응성 기체 혹은 폭약의 데토네이션 시스템 내에서 Al 입자 연소현상에 대한 연구는 광범위하게 이루어져왔다. 그 중에서 반응성 기체 내의 Al 입자 연소는 이상모델(two-phase model)을 이용하여 많은 연구가 보고되었다. 이상 모델은 기체 현탁 내의 분포된 Al 입자의 거동과 연소현상을 모사하기 위해 개발되었으며, 질량, 운동량, 그리고 에너지 보존법칙 하에 Al 입자와 고폭약 산화물과의 상호작용을 고려한다 [4]. 초기 Al 입자와 폭약 산화물과의 상호작용 물리량 (질량, 운동량, 에너지)은 현상학적으로서 Khasainov 외 연구자

들에 의해 모델링 되었으며 [5], 대표적인 이상모델의 연구들은 Al 입자 연소모델에 대하여 차이를 갖고 있다. Fedorov [6]는 순수 산소 환경에서 Al 입자의 데토네이션 현상에 대해 Arrhenius 형태의 연소 모델을 사용했다. Kuhl [7]은 경험적 공식에 근거한 Khasainov와 Veyssiere 모델 (KV 모델)을 사용하여 기폭장치에 의해 분포 된 공기 중의 Al 입자의 연소에 관한 연구를 수행했다. 그들의 연소 모델은 온도를 기준으로 점화 시스템을 on/off 스위치로 간주했다. Zhang [8]은 Al 입자의 발화 온도에서 on/off 스위치 없이 Arrhenius 형태 반응 모델과 KV 모델을 결합하여 하이브리드 모델을 제안했다.

본 연구에서는 반응성 기체 현탁에 대한 데토네이션 현상을 모사하기 위해 개발된 이상모델을 Al 입자를 포함하는 HMX의 폭발 성능에 대하여 Al 입자 질량 분율에 따른 영향을 전산모사하기 위해서 재구성되었다. 이전에 수행되었던 존재하는 실험결과와의 비교를 위해서 Al 입자의 질량분율은 0%-25%가 고려되었으며, Al 질량분율에 따른 충격파 성능을 수치 해석적으로 조사하기 위하여 일련의 plate dent test 전산모사가 추가적으로 수행되었다.

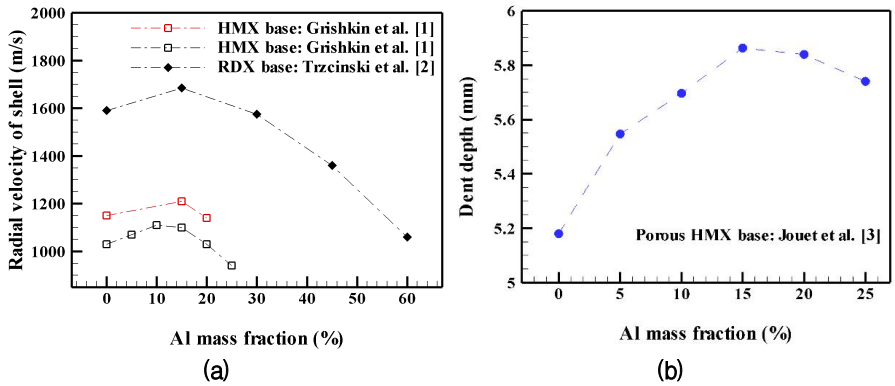


그림 1.1 Al 질량분율에 따른 Al 입자를 함유하는 폭약의 폭발 성능실험적 경향: (a) 기초폭약 HMX 혹은 RDX에 대한 가속능력, (b) 다공성 기초폭약 HMX에 대한 충격파 성능

제 2 장 수치적 모델

2.1 이상모델의 주요 가정과 수치적 초기 값 설정

본 연구에서는 공간 차분과 시간 차분을 위해 3차 Convex ENO 기법과 3차 Runge-Kutta (RK) 기법을 각각 사용하였다 [9]. 그리고 이상모델은 다음과 같은 수치적 가정을 바탕으로 이종 매질 내에서 기체와 고체 입자들을 분리하였다. i) 기체 매질 내 고체 입자들의 부피는 무시한다. ii) 고체 입자간 상호 작용은 무시한다. iii) 기체상과 분포된 고체 입자상 모두 각 공간 내에 연속체로서 취급한다. iv) 분포된 고체 입자들의 공간은 매질의 압력과 음속을 무시한다 [5].

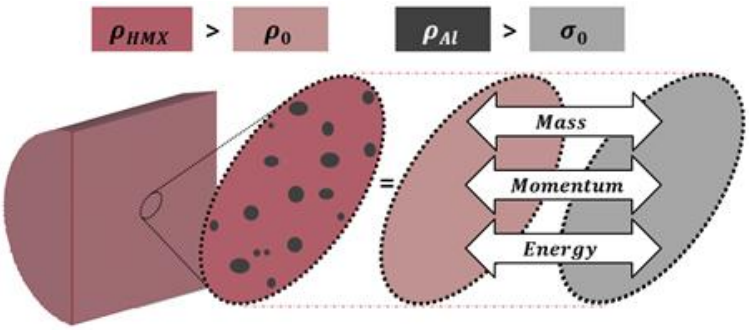


그림 2.1 Al 입자를 함유하는 이종물질 고체폭약 혼합물을 위한 이상 모델의 구조

따라서, 그림 2.1에서 보여 지듯, 이종 물질은 균일한 두 개의 매질로서 처리되고, 각 공간은 연속체 공간으로서 개별적으로 처리된다. 그러나, 기체 현탁 내 분산된 입자의 경우와 달리, 본 혼합물 조성물의 Al 입자 및 HMX은 유사한 밀도 척도를 가지므로 희석된 밀

도의 초기화가 다소 중요하게 된다. 각각의 공간에서 희석된 밀도는 식 2.1-2.2와 같이 질량 보존법칙에 의해 단순한 형태로 계산된다. 식 2.1에서 a, ρ_{HMX}, ρ_{Al}, V_a, ρ_0, *그리고* σ_0는 각각 전체 폭약 내 Al 질량 분율, 순수 HMX의 밀도, 순수 Al 의 밀도, 전체 폭약 내 Al 입자가 차지하는 부피분율, HMX 공간의 희석된 초기 밀도, 그리고 Al 공간의 희석된 초기 밀도를 나타낸다.

$$V_a \rho_{Al} : (V_t - V_a)\rho_{HMX} = a : (1-a) \tag{2.1}$$

$$\rho_0 = (V_t - V_a)\rho_{HMX}/V_t \text{ and } \sigma_0 = V_a \rho_{Al}/V_t \tag{2.2}$$

Al 질량 분율이 증가함에 따라 모델의 가정이 물리적 사실로부터 상당히 벗어날지라도 모델은 Al 입자의 오일러리안 분석을 가능하게하기 때문에 채택되었다.

2.2 지배방정식

2.2.1 이상모델 (Two-phase model)

고폭약 산화물과 Al 입자들의 상호작용 영향을 고려한 질량, 운동량, 그리고 에너지 보존법칙에 따른 이차원에 대한 이상모델의 지배방정식은 식 2.3-2.8과 같이 나타낼 수 있다 [10]. 직교좌표계를 사용할 경우에는 ϕ = 0, 원통좌표계를 사용할 경우에는 ϕ = 0 이다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = RHS \tag{2.3}$$

$$S = \left[\rho,\ \rho v_1,\ \rho v_2,\ \rho E_{HMX},\ \rho\lambda,\ \sigma,\ \sigma u_1,\ \sigma u_2,\ \sigma E_{Al} \right]^{\top} \tag{2.4}$$

$$F = \left[\begin{array}{l} \rho v_1,\ \rho v_1^2 + P,\ \rho v_1 v_2,\ v_1(\rho E_{HMX} + P),\ \rho\lambda v_1, \\ \sigma u_1,\ \sigma u_1^2,\ \sigma u_1 u_2,\ u_1 \sigma E_{Al} \end{array} \right]^{\top} \tag{2.5}$$

$$G = \left[\begin{array}{l} \rho v_2,\ \rho v_1 v_2,\ \rho v_1^2 + P,\ v_2(\rho E_{HMX} + P),\ \rho\lambda v_2 \\ \sigma u_2,\ \sigma u_1 u_2,\ \sigma u_2^2,\ u_2 \sigma E_{Al} \end{array} \right]^{\top} \tag{2.6}$$

$$RHS = \left[\begin{array}{c} \dot{\sigma},\ \dot{\sigma} u_1 - \dot{f}_1,\ \dot{\sigma} u_2 - \dot{f}_2, \\ -Q_H + \dot{\sigma}(E_{Al} + \triangle H) - \dot{f} \bullet \vec{u}, \rho \dot{w}_{HMX} \\ -\dot{\sigma}, -\dot{\sigma} u_1 + \dot{f}_1, -\dot{\sigma} u_2 + \dot{f}_2, \\ Q_H - \dot{\sigma} E_{Al} + \dot{f} \bullet \vec{u} \end{array} \right]^{\top} + R \tag{2.7}$$

$$R = -\frac{\phi}{x} \left[\begin{array}{l} \rho v_1,\ \rho v_1,\ \rho v_1 v_2,\ v_1(\rho E_{HMX} + P),\ \rho\lambda v_1 \\ \sigma u_1,\ \sigma u_1^2,\ \sigma u_1 u_2,\ u_1 \sigma E_{Al} \end{array} \right]^{\top} \tag{2.8}$$

여기서, ρ, v, E_{HMX}, λ, σ, u, E_{Al}, P, T, $\dot{w}_{HMX}$는 희석된 HMX의 밀도 (kg/m^3), HMX 산화물 속도 (m/s), HMX의 비 에너지 (J/kg), 고폭약 산화

물 질량 분율, 희석된 Al 입자의 밀도 (kg/m^3), Al 입자의 속도 (m/s), Al의 비 에너지 (J/kg), 압력 (Pa), 온도 (K), 그리고 고폭약 HMX의 반응율 (s^{-1})을 나타낸다. 그리고 식 2.7와 같이 *RHS* (source term)을 구성하여, 두 상 (기체상과 고체상)사이에서 질량($\dot{\sigma}$), 운동량($\dot{f}$), 에너지($\dot{Q}_H$)가 동일한 양으로 전달되도록 구성하였다. 따라서 전체 시스템의 질량, 운동량, 에너지는 보존된다. Al 입자 연소모델을 제외한, 운동량과 에너지 전달율은 식 2.11, 2.14와 같이 고체입자가 기체상 내에서 받는 항력에 따른 운동량 전달과 고체 입자와 기체와의 온도, 속도에 따른 대류 열전달을 고려하였다.

$$\dot{\sigma} = \frac{3\sigma}{t_b}\left(1+0.276\sqrt{Re}\right)\ ;\ T_m \geq T_{ign}\ /\ else\ \dot{\sigma}=0 \tag{2.9}$$

$$t_b = K d_p^2/\Psi^{0.9} \tag{2.10}$$

$$\dot{f} = \frac{3}{4}\frac{\rho}{\rho_{Al}}\frac{\sigma}{d_p}C_D(v-u)\parallel v-u \parallel \tag{2.11}$$

$$C_D = \frac{24}{Re}+\frac{4.4}{\sqrt{Re}}+0.42 \tag{2.12}$$

$$Re = \frac{\rho d_p \parallel \vec{v}-\vec{u} \parallel}{\mu} \tag{2.13}$$

$$\dot{Q}_H = \frac{6\sigma Nu k_g (T_{HMX}-T_{Al})}{\rho_{Al} {d_p}^2} \tag{2.14}$$

$$Nu = 2+0.459 Re^{0.55}\mathrm{Pr}^{0.33} \tag{2.15}$$

$$\triangle H = (1-a)15690 \qquad \text{(kJ/kg)} \tag{2.16}$$

또한, 식 2.10내의 각 Al 입자의 연소 시간 (t_b)은 Al 입자 산화에 필요한 산화제 양의 부피분율 (Ψ)을 고려한 경험적 법칙 [11]을 따른다. Al 입자의 점화를 위해, HMX의 산화물과 Al 입자의 평균 온도인 필름 온도 (T_m)을 정의하고, 본 연구에서 1600K를 점화 온도 (T_{ign})으로 사용했다. d_p는 초기 Al 입자의 직경(m), C_D는 Al 입자의 항력 계수, T_{HMX}, T_{Al}은 고폭약 HMX의 산화물과 Al 입자의 온도 (K)를 나타낸다. 다양한 Al 질량 분율을 갖는 HMX의 산화물에서 Al의 발열량의 값은 식 2.16을 따르며, 이는 실험 결과들의 곡선 맞춤 (curve fitting)으로부터 유도되었다 [12].

$$T_{Al} = \begin{cases} e_{Al}/c_p & ;\ e_{Al} \le c_p T_m \\ T_m & ;\ c_p T_m < e_{Al} \leqq c_p T_m + L_m \\ (e_{Al} - L_m)/c_p & ;\ c_p T_m + L_m < e_{Al} \leqq c_p T_b + L_m \\ T_b & ;\ c_p T_b + L_m < e_{Al}\ T_b + L_m + L_b \\ (e_{Al} - L_m - L_b)/c_p & ;\ e_{Al} > c_p T_b + L_m + L_b \end{cases} \tag{2.17}$$

L_m : *latent heat of melting*, L_b : *latent heat of boiling*

알루미늄의 온도 계산은 일반 용적 (bulk scale)의 알루미늄의 열역학적 고유성에 기초하여 식 2.17에 의해 결정된다. 그리고, 고폭약 HMX 산화물의 온도계산은 참고문헌 [13]의 방법에 기초하여 계산되었다. 또한, 고폭약 산화물의 열전도계수 (conductivity, k_g), 누셀수 (Nusselt number, Nu), 플란틀 수 (Prantl number, Pr), 점도 (viscosity, μ) 등 필요한 물리량들은 NASA에서 지원하는 소프트웨어: Chemical Equilibrium with Applications(CEA)을 사용하여 데이터를 얻은 후, 곡선 맞춤 (curve fitting)을 통하여 도출하였다 [14].

2.2.2 기초 폭약의 반응모델과 상태방정식

본 연구에서 기초 고폭약에 대한 데토네이션을 모사하기 위해서 반응모델로서 식 2.18과 같이 Ignition and Growth (I&G)반응모델을 사용하였으며, 상태방정식으로는 식 2.19-2.20과 같이 Jones - Wilkins - Lee 상태방정식 (JWL EOS)이 사용되었다 [15]. I&G 반응모델과 JWL EOS의 매개변수들은 각각 표 2.1와 표 2.2에 기재하였다. 또한, 폭약 압력은 식 2.21과 같이 표준 혼합물 법칙 (standard mixture rule)을 적용하여 도출하였다.

$$\dot{w}_H = I(1-\lambda)^b(\eta-a)^x \qquad ; \ \eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$
$$+ G_1(1-\lambda)^c\lambda^d P^y \, G_1(1-\lambda)^c\lambda^d P^y + G_2(1-\lambda)^e\lambda^g P^z \tag{2.18}$$

$$P_{unreacted} = A_0\left(1-\frac{w_0}{R_{01}V}\right)e^{-R_{01}V} \qquad ; \ V = \frac{\rho}{\rho_0}$$
$$+ B_0\left(1-\frac{w_0}{R_{02}V}\right)e^{-R_{02}V} + w_0\frac{E}{V} \tag{2.19}$$

$$P_{reacted} = A_1\left(1-\frac{w_1}{R_{11}V}\right)e^{-R_{11}V} \qquad ; \ V = \frac{\rho}{\rho_0}$$
$$+ B_1\left(1-\frac{w_1}{R_{12}V}\right)e^{-R_{12}V} + w_1\frac{E}{V} \tag{2.20}$$

$$P_{tot} = (1-\lambda)P_{unreacted} + \lambda P_{reacted} \tag{2.21}$$

표 2.1 95% HMX (0% Al)의 I&G 반응모델 매개변수 [15]

	Reaction rate parameters
I	7.43e+11 μs^{-1}
G_1	800 $Mbar^{-3}\mu s^{-1}$
G_2	30 $Mbar^{-1}\mu s^{-1}$
a	0.0
b	0.667
c	0.667
d	0.111
e	0.667
g	0.667
x	20.0
y	3.0
z	1.0

표 2.2 95% HMX (0% Al)의 JWL EOS 매개변수 [15]

	Unreacted JWL EOS
A_0	9522 Mbar
B_0	-0.059444 Mbar
R_{01}	14.1
R_{02}	14.1
w_0	0.8938
	Reacted JWL EOS
A_1	16.689 Mbar
B_1	0.5969 Mbar
R_{11}	5.9
R_{12}	2.1
w_1	0.45
E_0	0.102 Mbar/g

제 3 장 Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션

3.1 격자 크기에 따른 해석능력과 검증

데토네이션은 일반 연소현상과 달리 반응 영역의 길이가 매우 짧기 때문에 데토네이션 충격파 압력, 온도 등을 정확히 모사하기 위한 적절한 격자 크기가 매우 중요하다. 따라서, 격자 크기에 대한 전산모사 수렴 도를 조사하고, 그에 따라서 대표적인 데토네이션 상태량들에 대하여 검증을 수행하였다.

3.1.1 격자 크기에 따른 해석능력

Al 입자를 함유한 폭약 성능에 대한 Al 질량분율의 효과를 조사하기 앞서 기초 폭약 95% HMX (95% HMX/ 5% binder: estane-BDNPA/F)의 데토네이션 특성을 고려하였다. 기초 고폭약의 초기 밀도는 1808 kg/m^3 이며, 무한반경의 rate stick에 대한 데토네이션에 대하여 전산모사를 수행하였다. 그림 3.1은 격자 크기 (h)에 따른 데토네이션 전파 구조를 보여준다. 검은 점선은 h=1/5 mm, 빨강 실선은 h=1/10 mm, 파랑 전선은 h=1/20 mm을 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯, 격자 크기, h=1/10 mm는 데토네이션 전파 구조를 전산모사하기에 최적의 크기라 판단된다.

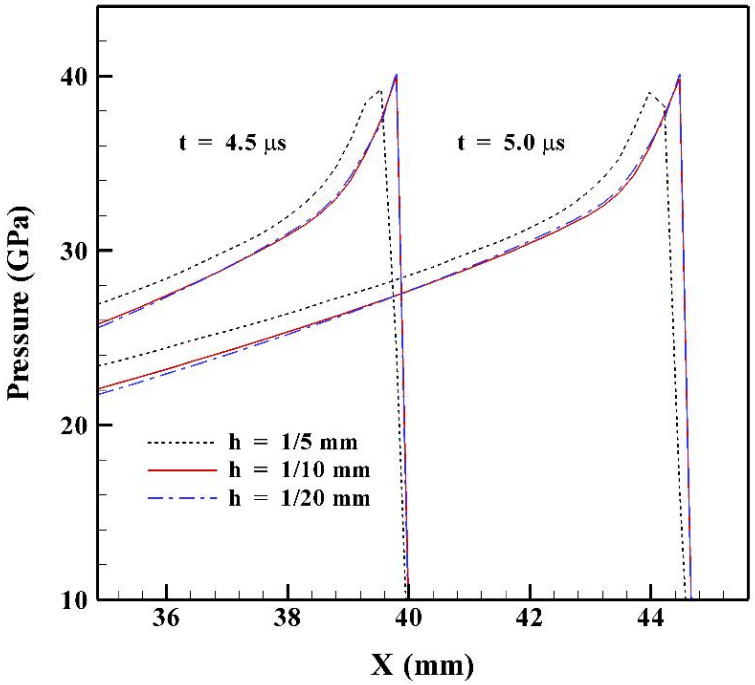


그림 3.1 95% HMX의 기폭 현상 수치해석을 위한 격자 크기에 따른 해석 능력 시험

3.1.2 열역학적 상태량 검증

Al 입자를 함유한 폭약을 전산모사하기 위해서는 기초 고폭약 95% HMX의 정확한 특성을 나타낼 수 있어야 한다. 따라서 격자 크기 h=1/10 mm에서 기초 고폭약의 von Neumann spike 압력 (P_{VN}), Chapman-Jouguet 상태의 압력과 온도 (P_{CJ}, T_{CJ}), 반응영역 길이 (X_R: reaction zone length)가 모두 잘 모사되어야 한다.

그림 3.2은 격자 크기 h=1/10 mm에서 기초 폭약의 정상상태 데토네이션 전파 형상의 전산모사 결과이며, 압력선도와 온도선도, 그리고 고폭약 산화물의 질량분율 (burned mass fraction)을 보여준다.

표 3.1에서는 그림 3.2의 수치해석 결과를 이용하여 도출된 데이터를 실험값과 일반적으로 사용되는 열화학 프로그램인 Cheetah code 결과와 비교를 보여주며, 수치해석 결과가 잘 모사함을 확인하였다.

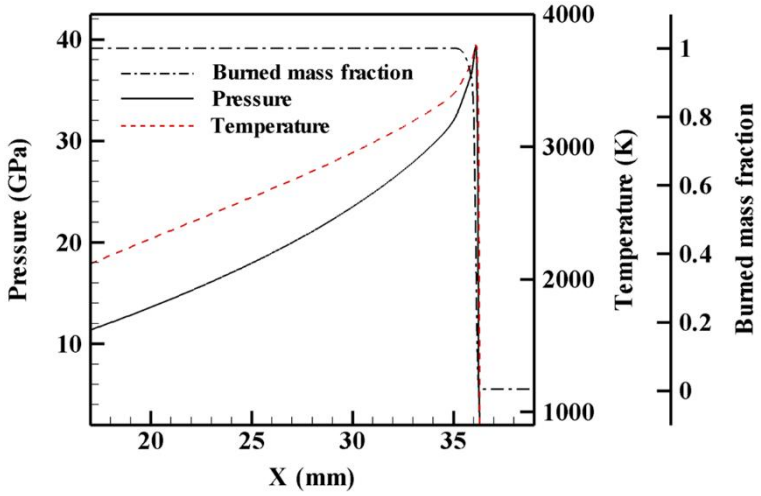


그림 3.2 95% HMX의 기폭현상에 따른 수치해석의 열역학적 상태량과 반응영역 길이

표 3.1 95% HMX (0% Al)의 열역학적 상태량과 반응영역 길이에 대한 실험결과와 수치해석결과와의 비교

	Calculation	Reference
P_{VN}	39.5 GPa	~40 GPa [16]
P_{CJ}	32.3 GPa	32.76 GPa [17]
T_{CJ}	3391.7 K	3341 K [17]
X_R	0.388 mm	0.33±0.05 mm [18]

3.1 Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션 속도

Micro-size Al 입자를 함유한 다양한 고폭약에 대하여 Al 입자 함유량 증가에 따른 데토네이션 속도의 감소는 실험적으로 보고되었다 [2, 19, 20]. 이러한 경향성과 정확도를 조사하기 위해 다양한 Al 질량분율에 대한 실험결과가 존재하는 confined rate stick test를 고려하였다.

3.2.1 계산영역 설정

Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션 속도 측정 실험은 copper confinement shell 두께(t) 2 mm를 갖는 직경(D) 20 mm, 길이(L) 100 mm의 confined rate stick으로 이루어 졌으며 [19], 그와 동일하게 그림 3.3와 같이 계산영역을 설정하였다. 계산영역은 폭약, 금속 copper [21], 그리고 void로서 세 가지 구성요소로 이루어 졌다. 각 구성요소는 level-set (LS) 방법에 의해 zero LS을 경계로 분리되었으며, 실선으로 나타나져 있다. 또한, 각 구성요소 간 경계에 대한 경계조건은 Ghost Fluid Method (GFM)을 이용하여 결정되었다. LS과 GFM에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [22]에서, void와 금속 영역 계산에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [23]에서 확인할 수 있다.

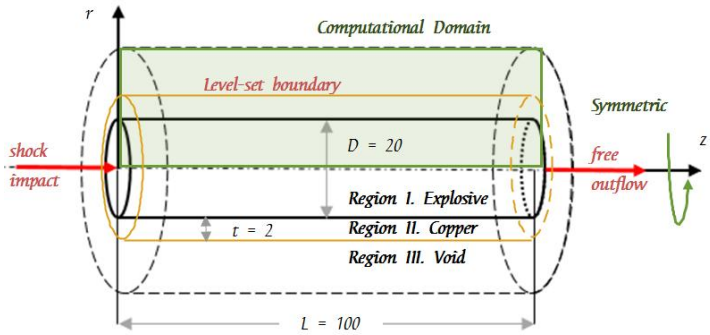


그림 3.3 2 차원 원통형 계산영역: 2 mm 두께를 갖는 copper confined rate stick (D = 20 mm, L = 100 mm)

3.2.2 결과 및 논의

Al 질량분율 증가에 따른 데토네이션 전파형상의 변화를 알아보기 위해서, rate stick의 중심선에서 다양한 Al 질량분율에 따른 완전 발달된 데토네이션 압력 선도를 그림 3.4에 나타내었다. 그림에서는 0%, 5%, 15%, 그리고 25% 의 Al 질량분율에 따른 Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션 압력 선도를 나타내고 있으며, 충격에 의한 점화 후 6 μs에서 측정되었다. Al 질량분율이 0%에서 5%, 15%, 25%로 증가함에 따른 데토네이션 속도는 8823 m/s에서 8770 m/s, 8680 m/s, 8596 m/s로 감소하는 것을 확인하였으며, P_{VN}은 38.9 GPa에서 37.69 GPa, 35.6 GPa, 33.5 GPa로 감소하였다. 또한, 고폭약에 의한 데토네이션 충격파 후방에서 Al 입자의 연소가 일어나며, 그에 따른 후방에서 압력증가가 나타난다. 또한 Al 질량분율 증가에 따라서 압력증가 두드러짐을 볼 수 있으며, 이는 데토네이션 충격파 후방에서 압력 감소율이 감소했음을 의미한다.

이러한 결과로서, Al 질량분율이 증가함에 따라 P_{VN}의 감소를 Al

입자의 연소에 의한 후방 압력증가로서 보상할 수 있다고 추론할 수 있다. 다시 말해, 폭약 내 Al 입자의 함유는 P_{VN}와 데토네이션 속도의 감소를 가져오지만, 기초 고폭약 산화물 내에서 충분히 빠른 Al 입자 연소로 인해 충격파 향상을 기대할 수 있다. Al 질량분율 증가에 따른 충격파 성능은 다음 5, 6장에서 다룰 것이다.

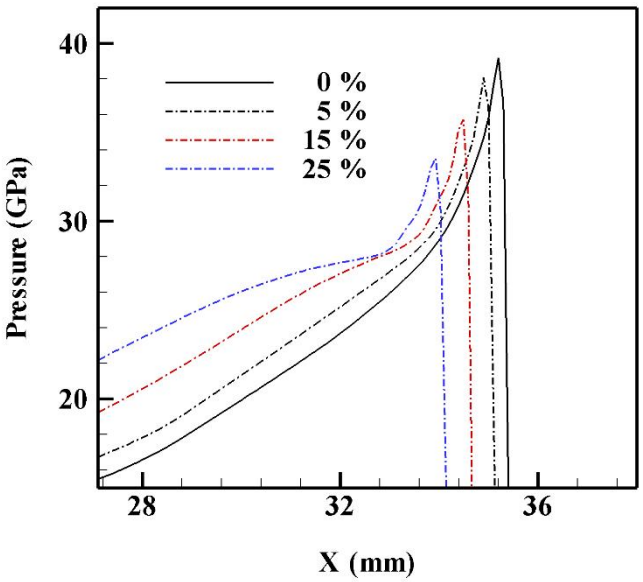


그림 3.4 충격에 의한 점화 후 6 μs에서 다양한 Al 질량분율 (0 %, 5 %, 15 %, 및 25 %)을 갖는 Al 입자를 함유하는 HMX의 데토네이션 전파에 대한 수치해석 결과

그림 3.3과 같은 이차원 원통형 계산공간에서 계산결과는 다음 그림 3.5과 같이 압력 장으로서 나타낼 수 있다. 계산 결과는 25%의 Al 질량분율에 대한 데토네이션 전파 형상이며, 측정된 데토네이션 속도는 8596 m/s 이다. 이는 25%의 Al 질량분율에 대한 실험결과 8563 m/s와 비슷한 결과이다.

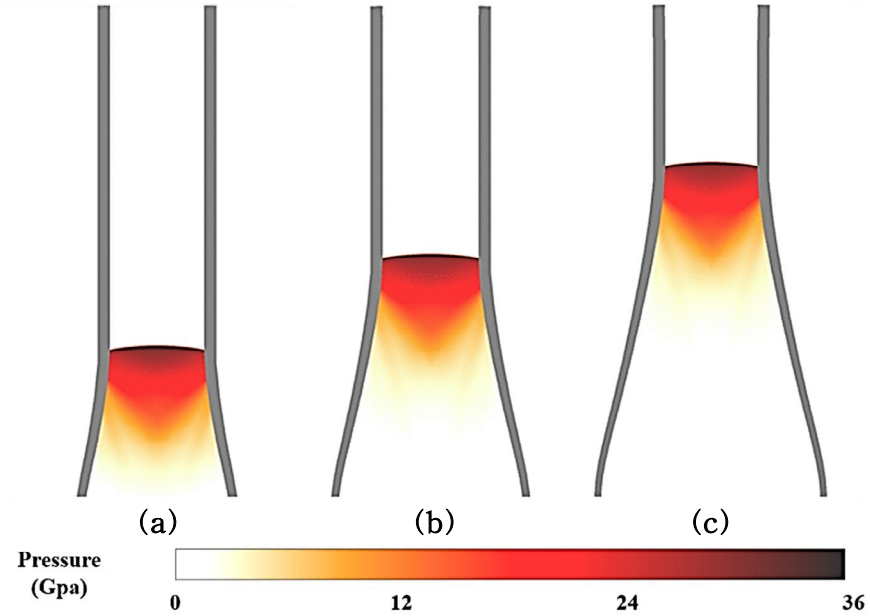


그림 3.5 충격에 의한 점화 후 Al 입자를 함유하는 HMX의 데토네이션 전파형상: (a) 4 μs, (b) 6 μs, (c) 8 μs

Al 질량분율 증가에 따른 Al 입자를 함유한 HMX의 데토네이션 속도에 대한 실험결과 [19]와 수치해석 결과의 비교는 그림 3.6에서 나타나져있다. 실험결과는 5%, 15%, 25%의 세 가지 Al 질량분율에 대하여 수행되었으며, 본 연구에서는 10%, 20%의 Al 질량분율을 추가하여 5가지 Al 질량분율에 대하여 수행되었다.

그림 3.6에서 확인할 수 있듯, Al 질량분율 증가에 따라 데토네이션 속도가 감소함을 알 수 있다. Al 질량분율 증가에 따른 데토네이션 감소에 대한 두 가지 주요하게 생각되는 요인들: 1) Al 함유량 증가함에 따른 전체 rate stick 내의 기초 고폭약 HMX의 감소와, 그에 따른 기초 고폭약 HMX의 에너지 감소 그리고 2) 기초 고폭약 데토네이션 충격파 전방부에서 데토네이션 산화물과 Al 입자와의 상호작용에 의한 운동량과 에너지 손실. 이 두 가지 요인들은 본 연

구의 모델에서 모두 고려되고 있으며, 실험결과와 본 연구의 수치해석 결과와의 오차는 ±50 m/s 이하를 나타내고 있다.

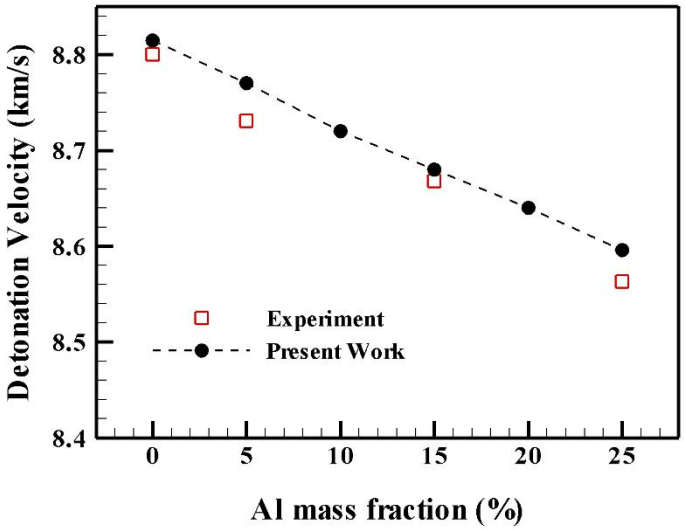


그림 3.6 Al 질량분율에 따른 데토네이션 속도의 실험결과와 수치해석 결과와의 비교: 직경 20 mm와 두께 2 mm를 갖는 copper confined rate stick 실험

제 4 장 Al 입자를 함유한 HMX의 폭발 성능

Al 입자를 함유한 폭약의 폭발 성능은 단지 높은 Al 함유량에서 나타나지 않고, 어느 최적의 Al 입자 함유량에서 나타난다. 최적의 Al 함유량의 존재는 실험적으로 보고되었다 [1-3]. 이 장에서는 이상모델을 이용하여 Al 입자를 함유한 HMX의 폭발 성능을 조사하기 위하여, 이전에 수행되었던 이용 가능한 실험데이터가 존재하는 가속능력 측정실험을 전산 모사하였다. 추가적인 전산모사로서, 폭발 능력평가 시험 중 하나인 plate dent test가 고려되었다.

4.1 Al 입자를 함유한 HMX의 가속능력

폭약의 가속능력시험은 폭약의 폭발 능력을 평가하는 실험 중 하나의 방법으로서 confined rate stick test에서 이루어지며, rate stick을 감싸고 있는 금속 confinement shell의 반경방향 속도를 측정하며, 가속능력을 평가한다.

4.1.1 계산영역 설정

Al 입자를 함유한 HMX의 confinement shell의 반경방향속도 측정실험은 steel confinement shell 두께(t) 5 mm를 갖는 직경(D) 20 mm, 길이(L) 120 mm의 confined rate stick으로 이루어 졌으며 [1], 그와 동일하게 그림 4.1와 같이 계산영역을 설정하였다. 금속 steel의 계산영역에 대한 상태방정식과 상수들은 참고문헌 [23]에 게재되어있다.

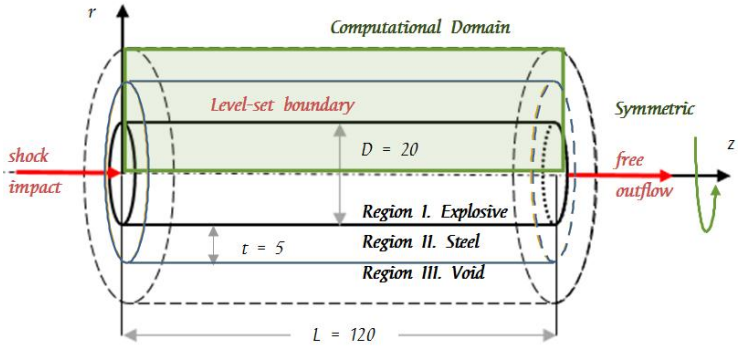


그림 4.1 2 차원 원통형 계산 영역 : 5 mm 두께를 갖는 steel confined rate stick (D = 20 mm, L = 120 mm)

Confinement shell의 반경방향속도는 그림 4.2와 같이 rate stick의 중간부분에서 측정되었다. 마찬가지로, 이차원 원통좌표계 수치 해석결과에서도 rate stick 중간부분에서 측정되었다.

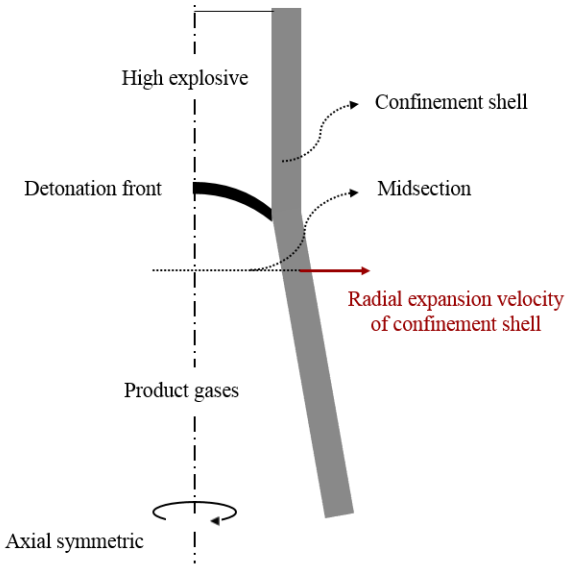
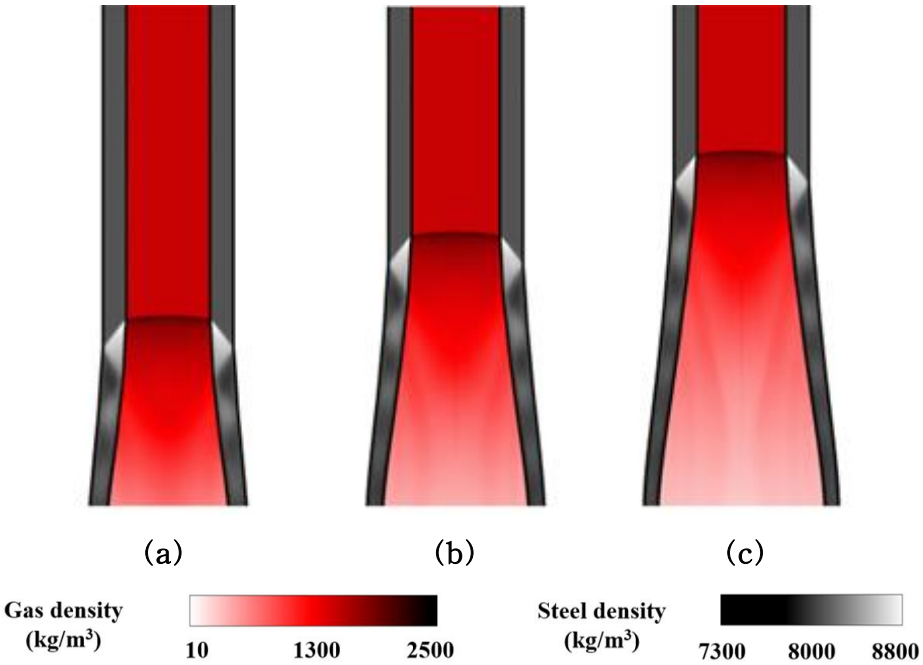
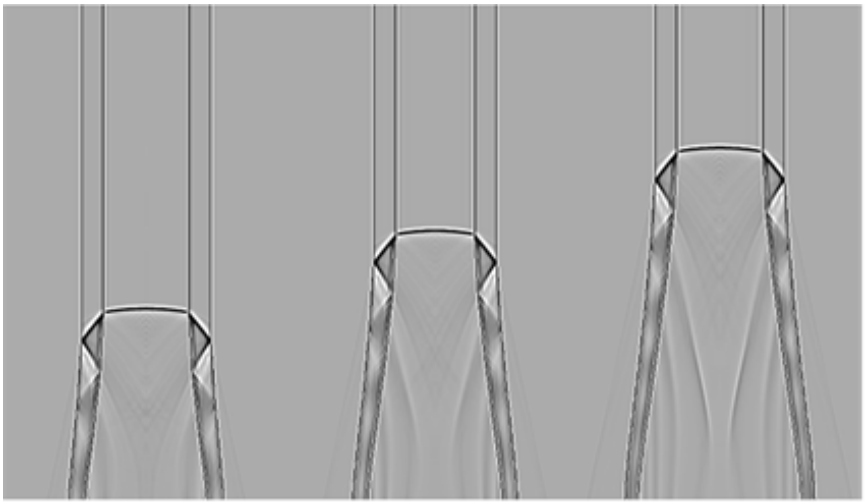


그림 4.2 Confinement shell의 반경방향 팽창 속도 측정 방식

4.1.2 결과 및 논의

가속능력 평가실험의 전산모사의 한 예로서, 15%의 Al 질량분율에 대한 steel confined rate stick test 결과를 그림 4.3에서 보여준다. 수치해석 결과는 밀도와 밀도에 대한 shadowgraph로서 데토네이션 전파형상을 나타내며, confinement shell의 반경방향속도는 1257 m/s를 나타낸다.





(a) (b) (c)

그림 4.3 충격에 의한 점화 후 Al 질량분율 15%를 갖는 HMX에 대한 steel과 폭약에 대한 밀도장과 shadowgraph: (a) 6 μs, (b) 8 μs, (c) 10 μs

Al 질량분율 증가에 따른 Al 입자를 함유한 HMX의 가속능력평가 실험결과는 15%, 20%의 두 가지 Al 질량분율에 대하여 수행되었으며, 본 연구에서는 5%, 10%, 25%의 Al 질량분율을 추가하여 5가지 Al 질량분율에 대하여 수행되었다.

표 4.1 95% HMX (0% Al)의 가속능력에 대한 실험결과와 수치해석결과와의 비교

	반경방향속도
Experiments [1]	1150 m/s
Present Work	1193 m/s
Error	3.74 %

표 4.1는 기초 폭약 95% HMX에 대한 confinement shell의 반경방향속도의 실험결과와 수치해석 결과를 보여준다. 실험결과는 1150

m/s, 수치해석 결과는 1193 m/s를 나타내며, 오차는 3.74 %이다. Al 질량분율에 따른 반경방향속도 증가에 대한 실험결과와 수치해석결과의 비교를 보다 명확히 하기위해서, 본 연구에서는 가속능력(AA)를 식 4.1처럼 기초 폭약 HMX의 실험 혹은 수치해석의 결과로 나누어진 무차원화 된 속도로서 정의한다. 즉, 기초 폭약 HMX에 대한 실험결과와 수치해석결과의 가속능력은 1을 갖는다. 그림 4.4는 다양한 Al 질량분율에 따른 가속능력에 대해 실험결과와 수치해석결과의 비교를 보여준다.

$$AA_j = V_{i,j} / V_{i,0} \qquad ; i = experimental, present\ work \quad ; j = Al\ mass\ fraction \tag{4.1}$$

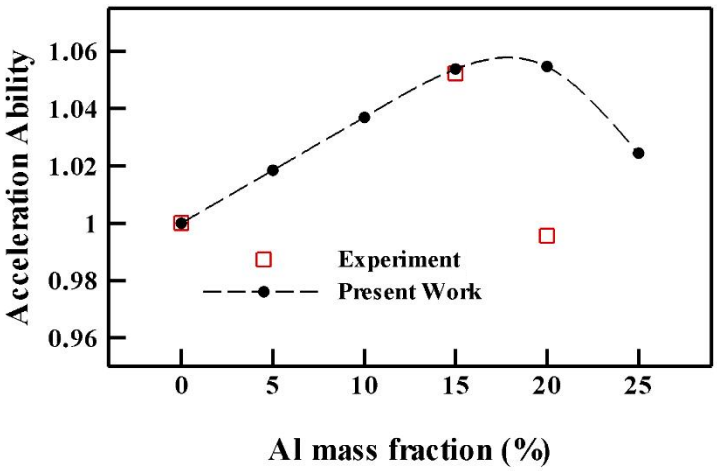


그림 4.4 Al 질량분율에 따른 가속능력에 대한 실험결과와 수치해석 결과와의 비교: 직경 20 mm와 두께 5 mm를 갖는 steel confined rate stick 실험

그림 4.4에서 보이듯, 비록 다양한 Al 질량분율에 대한 실험결과가 부족하지만, Al 질량분율에 따른 가속능력을 볼 수 있다. 또한, Al

질량분율 증가에 따라서 가속능력이 증가하다가 Al 입자 함유량이 어느 함유량이상 함유하게 되면 가속능력이 다시 감소하는 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 즉, Al 질량분율이 증가함에 따라, 가속능력은, 단지 높은 질량분율이 아닌, 최적의 Al 질량분율에서 최대값에 도달한다.

본 연구에서 다루는 시험들은, 기초 폭약의 산화물이 Al 입자 연소를 위한 산화물로 이용된다. 즉, Al 질량분율 증가에 따라 Al 입자 연소를 위한 산화물의 양이 줄어든다. 식 2.9에 따르면 Al 질량분율 증가에 따라서 단위 부피당 Al 입자의 연소 생성물은 증가하지만, 식 2.10에 따르면 단위 질량당 Al 입자 연소율은 감소한다. 또한, Al 질량분율 증가에 따라 산화제의 부족으로 Al 입자의 불완전 연소가 증가하고, 그에 따라서 단위 질량당 Al 입자의 연소 발열량이 감소한다 [12]. Al 입자의 점화 입장에서 생각해보면, Al 질량분율 증가에 따라서 Al 입자의 가열의 위해 기초 폭약의 산화물로부터 Al 입자가 뺏어오는 에너지는 증가하게 되고, 그에 더해 전체 폭약 내 기초 폭약의 에너지는 감소하게 된다. 그 결과, 기초 폭약은 Al 입자를 함유하지 않을 때보다 비교적 낮은 산화물 온도를 갖게 되고, Al 입자의 가열 속도는 낮아진다.

기초 고폭약 산화물과 Al 입자와의 이러한 복잡한 상호작용으로서 Al 입자를 함유한 폭약의 성능은 Al 질량분율에 따라서 영향 받게 되고, 그에 따른 최고의 성능을 얻기 위해 최적의 Al 질량분율을 구성하는 것이 중요하다.

Al 입자를 함유한 HMX의 실험결과에서는, 최고의 가속능력은 약 10-15%의 Al 질량분율에서 보이고 있고, 15%의 Al 질량분율에서 confinement shell의 반경방향 속도는 Al 입자를 함유하지 않았을 때와 비교하였을 때 5.2% 증가하였다. 또한, 수치해석 결과에서도 Al 질량분율 증가에 따라 비슷한 경향성을 모사할 수 있었으며, 약

15-20%의 Al 질량분율에서 Al 입자를 함유하지 않은 폭약의 반경 방향속도보다 5.3%의 증가를 갖는 최대 가속능력을 보였다.

그러나, 실험결과에서는 최적의 Al 질량분율 보다 높은 Al 질량분율에서 수치해석결과와 비교하였을 때, Al 질량분율 증가량에 따라서 가속능력의 급격한 감소율을 보였다. 다양한 Al 질량분율에 대한 정확한 밀도와 실험결과의 부족으로 가속능력의 급격한 감소 이유를 정의하기 어렵다. 그러므로, Al 질량분율에 따른 정확한 밀도와 실험결과가 충분하다면 Al 입자 연소에 대한 정확한 반응율을 모사할 수 있을 것이다.

비록 실험결과와 수치해석결과는 최적의 Al 질량분율과 그 Al 질량분율을 지나 가속능력의 감소율이 조금 차이를 보이지만, 최대 가속능력의 증가율과 Al 질량분율 증가에 따른 경향성을 모사할 수 있었다.

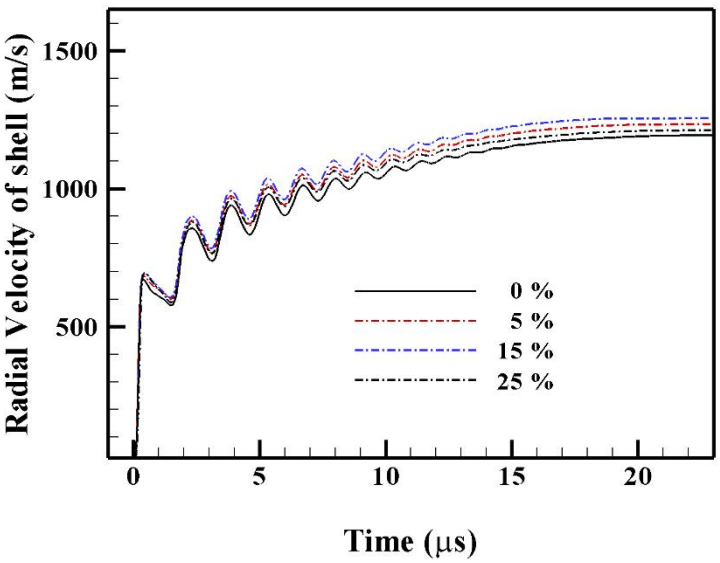


그림 4.5 다양한 Al 질량 분율 (0 %, 5 %, 15 % 및 25 %)을 갖는 Al 입자를 함유하는 HMX의 폭발로 인한 시간에 따른 confinement shell의 수치해석 반경방향 팽창속도

그림 4.5은 다양한 Al 질량분율에 따른 confinement shell의 시간에 따른 반경방향속도를 나타내고 있다. 반경방향속도가 안정화된 후에, Al 질량분율 0%, 15%, 25%에 대한 반경방향속도는 각각 1193 m/s, 1257 m/s, 1219 m/s를 나타내었다. 또한, confinement shell의 초기 가속구간에서 진동하며 가속함을 알 수 있다. 이는 그림 4.3에서 알 수 있듯이, 데토네이션 충격파에 의해 전달된 압력파가 shell 내에서 진동하기 때문이다.

4.2 Al 입자를 함유한 HMX의 충격파 성능

폭약의 폭발 성능을 평가하는 또 다른 실험 중 하나는 plate dent test이다. 이 실험은 폭약 rate stick을 금속판에 수직으로 올려놓고, 위에서부터 점화시켜 완전 발달된 폭약 데토네이션 충격파에 의한 금속판의 변형을 측정하는 실험이다.

4.2.1 계산영역 설정

일반적인 plate dent test의 실험은 51.8 mm 두께의 steel witness plate 위에 직경 41.3 mm, 길이 203 mm를 갖는 rate stick을 수직으로 놓은 그림 4.6과 같은 형상이다 [24]. 직경 41.3 mm을 갖는 폭약은 무한반경을 갖는 이상적인 rate stick에서의 데토네이션과 거의 비슷하게 형성되며, 길이 203 mm는 폭약 내 데토네이션이 완전 발달하기에 충분한 길이이다. 하지만, 수치 해석적으로 길이 40 mm는 기초 폭약 HMX 뿐만 아니라 Al 입자를 함유한 HMX에 대하여도 완전 발달한 데토네이션을 모사하기에 충분하다. 따라서, 계산영역은 그림 4.7과 같이 구성하였으며, dent 형상을 보다 더 실질적으로 모사하기 위하여 이차원 형상을 중심축을 기준으로 회전하여 삼차원 형상으로 나타내었다.

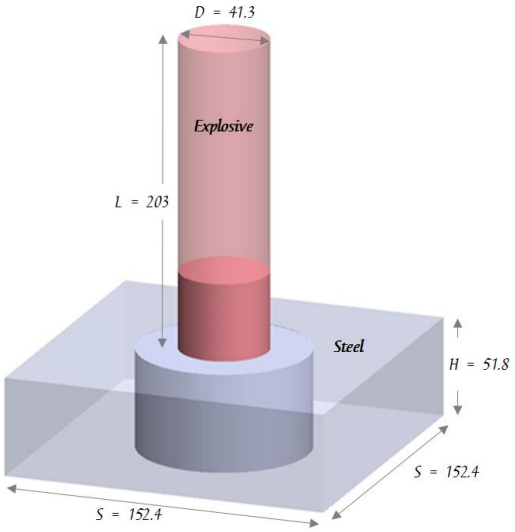


그림 4.6 Plate dent test의 실험 설정: D = 41.3 mm, L = 203 mm를 갖는 unconfined rate stick

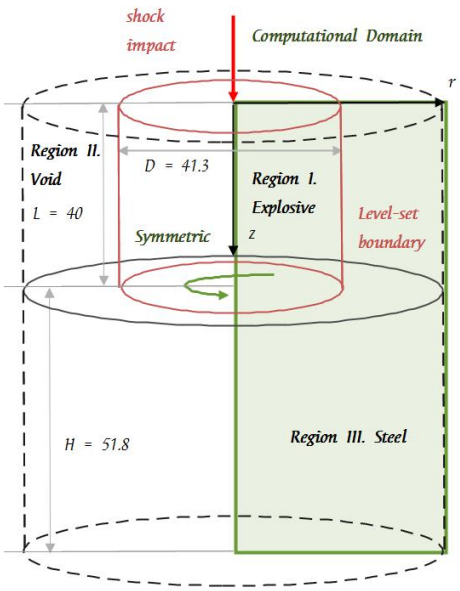


그림 4.7 Plate dent test의 수치해석적 설정: D = 41.3 mm, L = 40 mm를 갖는 unconfined rate stick

4.2.2 결과 및 논의

Al 입자를 함유한 충격파 성능에 대한 Al 질량분율 효과를 조사하기 앞서, 기초 폭약 95% HMX에 대한 정량적으로 실험결과와의 비교가 수행되었다. 기초 폭약 95% HMX의 plate dent test 결과는 dent 깊이 10.5 mm를 나타낸다.

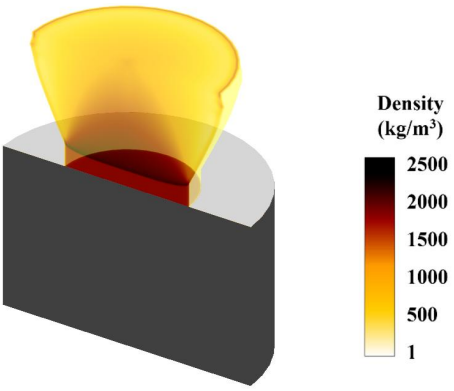
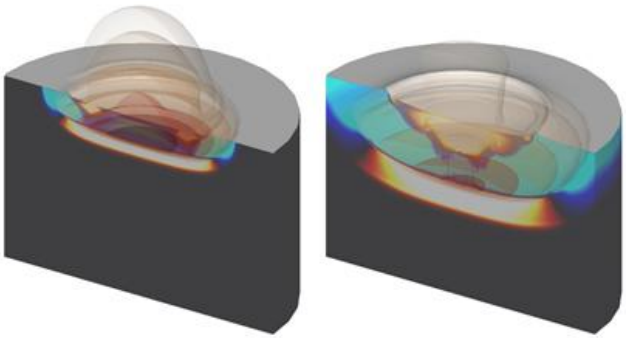


그림 4.8 충격에 의한 점화 후 4 μs에서 steel plate를 향한 95% HMX (0% Al)에 대한 폭발 전파의 밀도장



(a) (b)

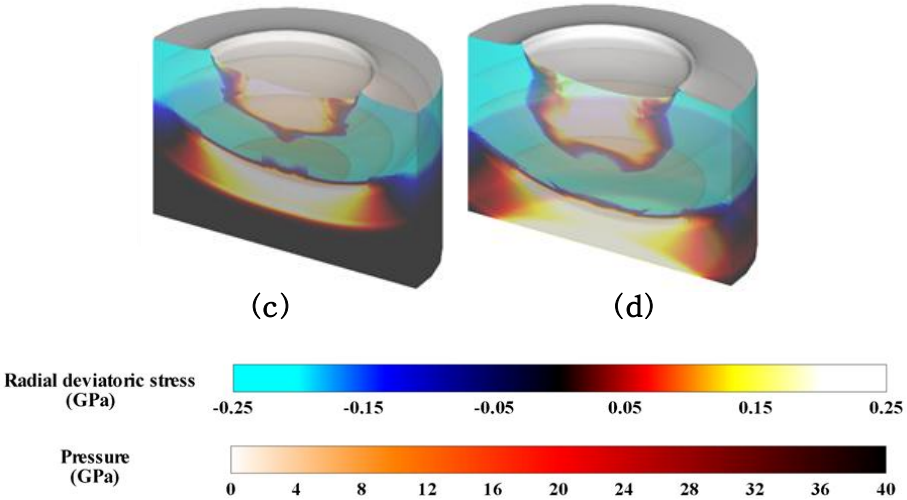


그림 4.9 95% HMX (0% Al)의 충격에 의한 점화 후 dent의 진행과 plate내부 반경 방향 deviatoric stress 장 및 압력 등고면: (a) 6 μs, (b) 8 μs, (c) 10 μs, (c) 12 μs

그림 4.8는 Al 입자를 함유하지 않은 기초 폭약 HMX의 금속철판으로 향하는 데토네이션 전파형상을 밀도 장으로서 보여주며, 충격에 의한 점화 후 4 μs에서의 형상이다. 그림 4.9는 폭약의 데토네이션 충격파가 금속철판에 전달되어 시간에 따라 dent가 형성되는 과정을 금속 내부에 반경방향응력 장과 압력 등고면 (iso-surface)으로서 보여준다. 시간이 지나감에 따라서 dent의 깊이는 증가한다. 하지만, 시간에 따른 dent 깊이를 보여주는 그림 4.10에서 보이듯이, 약 50 μs이후에 dent 깊이는 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과에서 dent 깊이는 11 mm를 나타내며, 표 4.2에서 기재되어 있듯이 실험결과와 비교하였을 때 4.76%의 오차를 보인다.

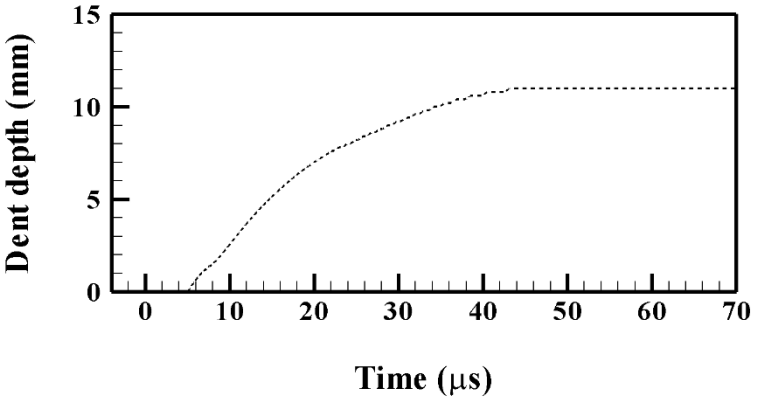


그림 4.10 충격에 의한 95% HMX 점화 후 시간에 따른 dent 깊이에 대한 수치해석 결과

표 4.2 95% HMX (0% Al)의 dent에 대한 실험결과와 수치해석결과와의 비교

	Dent depth
Experiments [24]	10.5 mm
Present Work	11 mm
Error	4.76 %

Al 질량분율에 따른 Al 입자를 함유한 HMX의 plate dent test에 대하여 이용 가능한 실험결과는 존재하지 않지만, Al 질량분율 변화에 따른 dent 깊이를 알아보기 위해 일련의 수치해석을 수행하였다. 아래의 그림 4.11는 Al 입자를 함유한 HMX의 plate dent test의 한 예로서 5%의 Al 질량분율에 대한 수치해석 결과이다. 그림 4.9와 마찬가지로, dent 형성과정을 금속철판 내부에 반경방향응력 장과 압력 등고면으로 나타내었으며, 안정화된 후의 dent 깊이는 11.7 mm를 나타낸다.

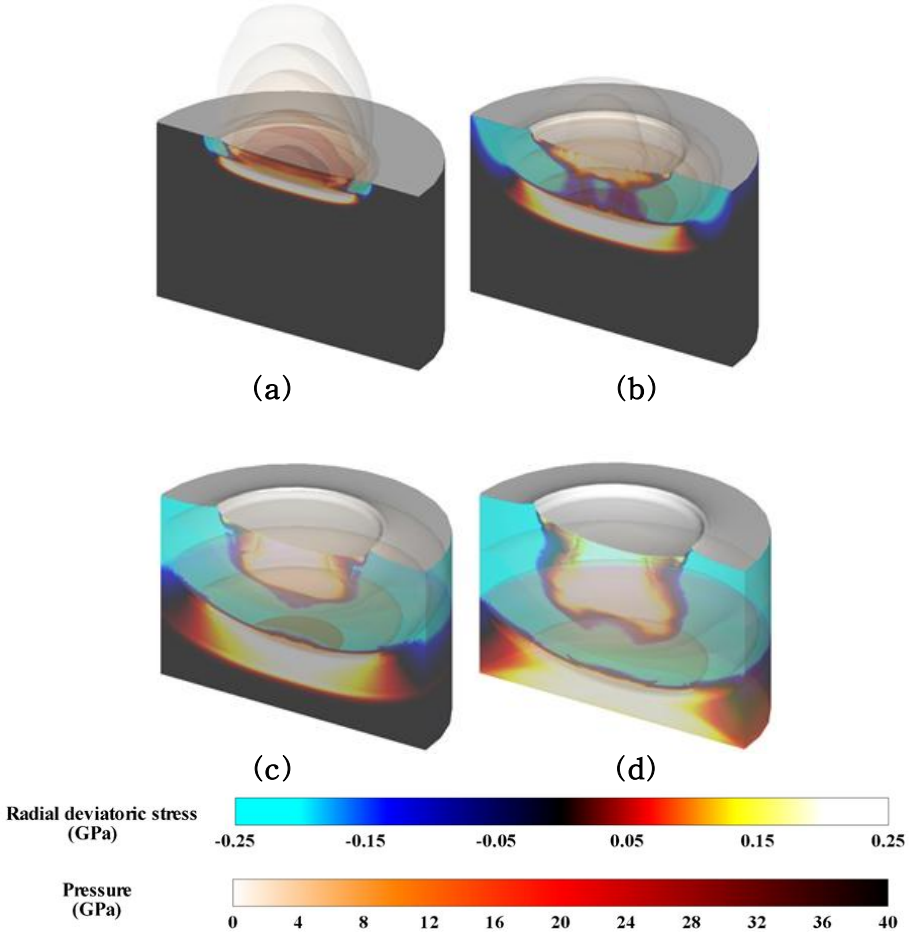


그림 4.11 Al 질량분율 5%를 갖는 Al 입자를 함유하는 HMX의 충격에 의한 점화 후 dent의 진행과 plate내부 반경 방향 deviatoric stress 장 및 압력 등고면: (a) 6 μs, (b) 8 μs, (c) 10 μs, (c) 12 μs

그림 4.12은 Al 질량분율 증가에 따라서 dent 깊이를 나타낸다. 그림에서 보이듯, Al 질량분율이 약 20%정도 까지 증가함에 따라서

dent 깊이는 증가하며, 20%의 Al 질량분율에서 최대의 dent 깊이가 관찰되었다. 최대 dent 깊이는 13.7 mm를 나타내며, 이는 Al 입자를 함유하지 않은 HMX의 dent 깊이와 비교하여 24.5%의 증가를 보였다. 다양한 Al 질량분율에 대하여 조사한 dent 깊이는 가속능력 측정 시험에서와 같이 설명된바와 같이 예상된 경향성을 나타내고 있다.

하지만, 최대 dent 깊이를 위한 최적의 Al 질량분율과 dent 증가율이 가속능력 시험과 차이를 보였다. 이처럼, rate stick의 끝단 (plate dent test)과 반경방향 (AA)에서 얻어진 결과의 차이는 폭약 산화물로부터 방출된 에너지가 타깃에 가해진 시간과 관련이 있다 판단된다. 다시 말해서, 데토네이션 전파 방향이 금속철판으로 향하고 있기 때문에, 폭약 산화물로 의해 가해진 에너지가 rate stick의 confinement shell에 가해진 시간보다 금속철판에 가해진 시간이 더 길 것이다. 그 결과, 최대 증가량이 plate dent test가 더 높게 나타났다.

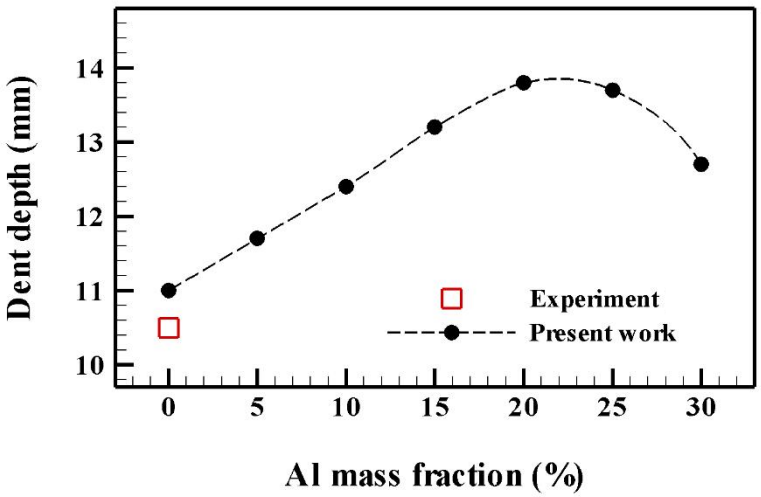


그림 4.12 다양한 Al 질량분율에 따른 plate dent test에 대한 수치해석 dent 깊이

제 5 장 결론

본 연구는 알루미늄 질량분율이 알루미늄 입자를 함유하는 폭약의 데토네이션속도와 폭발물의 폭발 성능에 미치는 영향을 이상모델을 사용하여 설명될 수 있음을 제시한다.

이상모델을 적용한 수치해석에서 다양한 알루미늄 질량분율에 대한 알루미늄 입자를 함유하는 HMX를 고려하였으며, 데토네이션 속도측정 실험결과와 마찬가지로 알루미늄 질량분율이 증가함에 따라서 데토네이션속도의 감소가 확인되었다. 더욱이, 폭약의 폭발 성능평가 시험 중 하나인 가속능력평가 시험에서 최대 confinement shell의 반경방향 팽창 속도에 대하여 최적의 알루미늄 질량분율이 존재함을 수치 해석적으로 모사할 수 있었다. 또한, 그 실험결과의 오차 또한 근소한 차이를 보이며, 정확도면에서도 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

폭약의 폭발 성능평가 시험 중 또 다른 하나로서, plate dent test가 추가적인 수치해석으로 고려되었다. 알루미늄 질량분율에 따른 이용 가능한 dent 깊이 결과는 존재하지 않았지만, 기초 고폭약 95% HMX에 대한 실험결과와의 비교로서 정량적 검증을 토대로 알루미늄 질량분율에 따라서 수치해석을 수행하였다. 최적의 알루미늄 질량분율과 그 질량분율에 따른 최대 증가량에 차이를 보였지만, 알루미늄 질량분율에 따른 dent 깊이의 경향성은 가속능력 평가시험의 경향성과 일치하였다.

참고문헌

[1] Grishkin, A., Dubnov, L., Davidov, V., Levshina, Y., Mikhailova, T., “Effect of powdered aluminum additives on the detonation parameters of high explosives,” Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol.29, No. 2, 1993, pp.293-241

[2] Trzcinski, W. A., Cudzilo, S., and Szymanczyk, L., “Studies of Detonation Characteristics of Aluminum Enriched RDX Compositions,” Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol.32, No. 5, 2007, pp.3925-400

[3] Jouet, R. J., Granholm, R. H., Sandusky, H., W., Warren, A. D., “Preparation and Shock Reactivity Analysis of Novel Perfluoroalkyl Coated Aluminum Nanocomposites,” Proceedings of AIP, Vol.845, No. 1, pp.1527-1530

[4] Nigmatulin, R. I., “Dynamics of multiphase media,” Hemisphere Pub. Corp., New York: 1991

[5] 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

[6] Fedorov, A. V., Khmel, T. A., “Numerical Simulation of Formation of Cellular Heterogeneous Detonation of Aluminum Particles in Oxygen,” Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 41, No. 4, 2005, pp. 435 - 448

[7] Kuhl, A. L., Bell, J., Beckner, V., “Heterogeneous Continuum Model of Aluminum Particle Combustion in Explosions,” Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol.46, No. 4, 2010, pp. 433-448

[8] Zhang, F., Gerrard, K., Ripley, R. C., “Reaction Mechanism of Aluminum-Particle-Air Detonation,” Journal of Propulsion and Power, 2009, Vol.25, No. 4, pp.845-858

[9] H. Udaykumar, L. Tran, D. Belk, and K. Vanden, "An Eulerian method for computations of multi-material impact with ENO shockcapturing and sharp interface," Journal of Computational Physics, vol. 186, pp. 136-177, 2003

[10] Kim, W., Gwak, M., Yoh, J. J., “Formation of double front detonations of a condensed-phase explosive with powdered aluminum,” Combustion Theory and Modelling

[11] Price, E. W., “Combustion of metalized propellants,” Progress in Astronautics and Aeronautics, 90:479-513 (1984)

[12] Makhov, M., Gogulya, M., Dolgoborodov, A., Brazhnikov, M., Arkhipov, V., Pepekin, V., “Acceleration Ability and Heat of Explosive Decomposition of Aluminized Explosives,” Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol.40, No. 4, 2004, pp.458-466

[13] Menikoff, R., “JWL equation of state,” Los Alamos National Laboratory, 2015

[14] McBride, B. J., Gordon, S., “Computer Program for Calculating and Fitting Thermodynamic Functions,” NASA Rept. RP-1271, 1992.

[15] 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

[16] Tarver, C. M., “Detonation Reaction Zones in Condensed Explosives,” 14th APS Topical Conference on SCCM, Baltimore, MD, United States 2005

[17] Fried, L. E., Souers, P. C., “CHEETAH: A Next Generation Thermochemical Code” Lawrence Livermore National Laboratory, 1994

[18] Loboiko, B. G., Lubyatinsky, N., “Reaction Zones of Detonating Solid Explosives,” Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 36, No. 6, 2000, pp.716-733

[19] 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

[20] Prakash, V., Phadke, V. K., Sinha, R. K., Singh, H., “Influence of Aluminium on Performance of HTPB-based Aluminised PBXs,” Defence Science Journal, Vol. 54, No. 4, 2004, pp.475-782

[21] Gwak, M., Lee, Y., Kim, K., Yoh, J. J.,” Deformable wall effects on the detonation of combustible gas mixture in a thin-walled tube,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol.40, No. 7, 2015, pp.3006-3014

[22] 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

[23] Gwak, M., Lee, Y., Kim, K., Cho, H., Shin, S., Yoh, J. J., ”All Eulerian method of computing elastic response of explosively

pressurised metal tube," Combustion Theory and Modeling, Vol.21, No. 2, 2017, pp.293-308

[24] Terry, R. G., Alphonso, P., "LASL Explosive data," University of California Press, 1980.

Abstract

Wuhyun Kim
Department of Mechanical and Aerospace Engineering
The Graduate School
Seoul National University

The performance of aluminized high explosive is considered by varying the aluminum (Al) mass fraction in a heterogeneous mixture model. Since the time scales of the characteristic induction and combustion 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. For simulating the performance of aluminized explosives with varying Al mass fraction, HMX is considered as a base explosive when formulating the multiphase conservation laws of mass, momentum, and energy exchanges between the HMX product gases and Al particles. In the current study, a two-phase model is utilized in order to determine the effects of Al mass fraction in a condensed phase explosive. First, two types of confined rate stick tests are considered to investigate the detonation velocity and the acceleration ability (AA), which refers to the radial expansion velocity of the confinement shell. The simulation results of the confined rate stick test are compared with the experimental data for the Al mass fraction range of 0-25%, and the optimal Al mass fraction is provided, which is consistent with the experimental observations. Additionally, a series of plate

dent test simulations are conducted, the results of which show the same tendency as those of experimental test with varying Al mass fractions.

Keywords: Aluminized explosives, Numerical simulation, Two-phase model

Student Number : 2016-20731