

에너지 물질이 포함된 장치의 폭발 해석을 위한 다중물질 해석 방법

김기홍* · 여재익*†

Numerical Method Aimed at Multi-material Simulation of the Energetic Device

Kihong Kim* · Jai-ick Yoh*†

ABSTRACT

We present an innovative method of multi-physics application involving energetic materials. We use an Eulerian methodology to address these problems. We have devised a new level set based tracking framework that can elegantly handle large gradients typically found in energetic response of high explosive and metals. Proper constitutive relations are employed to model the transient phases of gas, liquid, and solid in the high strain rate regime. We use the confined and unconfined rate stick results to validate against the experimental data.

초 록

다양한 고에너지 물질이 포함된 폭발 장치를 정확하게 해석하기 위해서는 고에너지 물질의 다양한 연소 현상과 주변을 둘러싸고 있는 고체물질에 대한 대변형 현상을 정확하게 모사하는 것이 필수적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 다중물질 각각의 경계면을 level set 함수를 이용하여 정확하게 표현하였으며, 경계면은 ghost fluid 기법을 사용하여 나타내었다. 각각의 물질에 대하여 대변형에 적합한 구성방정식을 사용하였으며, 지배방정식을 고차의 수치해석 기법을 사용하여 해석하였다. 다양한 폭발장치 중 실험적인 데이터를 이용하여 검증이 가능한 rate stick 문제를 해석하였으며, 실험과 유사한 결과를 획득하였다.

Key Words: Confined and unconfined rate stick, Energetic device(폭발 장치), Multi-material simulation(다중 물질 해석), Eulerian methodology(오일러리안 방법)

1. 서 론

고에너지 물질이 포함된 다양한 폭발 장치는 에너지 물질과 주변의 비반응 물질과 같이 두 가지 이상의 물질이 상호작용을 하며, 고 에너지 물질의 연소현상을 포함하고 있다. 본 연구에서는 이를 해석하기 위해 Eulerian methodology

* 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

[1]를 바탕으로 각각의 물질의 경계면 추적기법, 물질의 경계면에서 필요한 경계조건은 ghost fluid 기법 [2]을 적용하였다. 각각의 물질의 경계면은 level set 함수를 사용하여 경계면을 중심으로 하는 거리의 함수로 표현이 되며, level set 방법의 정확도 향상을 위하여 particle method가 포함된 particle level set [3]방법을 사용하였다. Level set 함수를 통하여 경계면이 정확하게 정의되면 각각의 물질에 맞는 경계면을 물리적인 조건을 기반으로 정의하였다.

2. 문제 서술

2.1 지배방정식

본 연구에서 사용되는 에너지 물질과 대변형을 하는 고체 물질에 대한 지배방정식은 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho E v_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j \sigma_{ij}}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dt} = G(p+Q)^b (1-F) \quad (4)$$

위 식은 각각 질량, 모멘텀, 에너지, 화학반응식을 각각 나타내고 있다. 유체(기체, 액체)의 경우 강성이 없다고 가정하면 코시응력(Cauchy stress)이 사라지게 되지만, 고체의 경우 대변형을 정확하게 모사하기 위해서는 응력의 해석이 추가적으로 필요하게 된다. 응력의 해석을 위해서 사용된 추가적인 편차응력(deviatoric stress)에 관한 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial s_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial(s_{ij} v_k)}{\partial x_k} &= -s_{ik} \Omega_{ij} + \Omega_{ik} s_{ij} + s_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + 2G(\bar{D}_{ij} - D_{ij}^p) \quad , \\ \sigma_{ij} &= s_{ij} - p\delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서 사용된 고체 상태의 폭약의 경우는 detonation이 발생하기 전까지 변형에 의한 변화가 거의 없기 때문에 응력은 해석하지 않았다.

2.2 구성방정식

Rate stick 문제와 같이 에너지물질이 포함된 현상은 수십 GPa까지 압력이 상승하게 되며 이때 정확한 상태방정식의 사용이 필수적으로 요구되게 된다. 본 연구에서는 에너지 물질의 압력을 구하기 위하여 JWL 형태의 상태방정식을 사용하였으며, 연료와 반응 가스에 따라 각각 아래의 형태가 사용되었다.

$$p_{\text{reacted}} = Ae^{-R_1 v} + Be^{-R_2 v} + \frac{C}{v^{1+w}}$$

$$p_{\text{unreacted}} = \frac{1}{n\kappa} \left(\frac{1}{v^n} - 1 \right)$$

$$p_{\text{total}} = (1-F^m) p_{\text{unreacted}} + F^m p_{\text{reacted}}$$

각각의 압력은 반응 변수 F에 따라 총 압력이 구하여지게 된다.

고체의 경우 압력(hydrostatic pressure)은 Mie Gruneisen 상태방정식을 사용하여 정의하였다. 상태방정식은 압축과 팽창에 따라 각각 아래와 같은 형태로 표현이 된다.

$$p(\rho, e) = \begin{cases} \rho_0 \Gamma_0 \left[e - \frac{1}{2} \frac{\rho_0 c_0^2 \phi}{(1-s\phi)^2} \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \right] + \frac{\rho_0 c_0^2 \phi}{(1-s\phi)^2} \\ \rho_0 \Gamma_0 e + c_0^2 (\rho - \rho_0) \end{cases}$$

위 식에서 $\phi = 1 - \rho_0/\rho$ 로 정의된다.

2.3 경계면 추적 기법

각각의 물질들은 level set 함수를 통하여 경계면이 정해지게 되며, 이러한 경계면은 입자 속도에 의하여 시간에 따라 변화하게 된다. Level set 함수는 아래와 같은 식에 의하여 시간에 따라 변화하게 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} + v_2 \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Level set 방법을 사용할 경우 대변형이 발생하거나 메쉬가 상대적으로 적은 영역에서 질량이 감소하는 현상이 발생하면, 이때 문제를 해결하기 위하여 particle method와 level set 방식이 결합된 particle level set method를 사용하였다.

2.4 경계조건

에너지 물질의 폭발현상을 통하여 발생하는 가스는 주변을 둘러싸고 있는 고체와 만나게 되며, 이때 적합한 경계조건이 필요하게 된다. 경계면에서 수직방향의 속도와 응력은 연속적이며, 전단 방향과 접선 방향의 응력은 불연속적이게 된다. 고체와 유체의 경우 경계면에서 아래와 같은 적합조건을 만족하여야 한다.

$$\sigma_{nn}^{solid} = -P^{fluid}, \sigma_{nt}^{solid} = 0,$$

$$v_n^{solid} = v_n^{fluid}$$

3. Rate stick 문제

3.1 Unconfined rate stick 문제

Unconfined rate stick 문제는 폭약의 크기효과(size effect)를 검증하기 위한 실험으로 사용되는 폭약의 크기가 작아질수록 detonation을 속도가 감소하며, 일정 크기 이하에서는 detonation이 소멸되게 된다. 본 연구에서 사용된 폭약은 ANFO-K1으로 해석 [4]에 사용된 반지름은 각각 7, 12, 25 mm 이다. Fig. 1은 실험과 수치해석을 통하여 얻어진 결과를 비교한 것으로 다양한 크기의 영역에서 측정된 detonation 속도가 실험과 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2는 10, 20 μ s에서의 밀도를 표현한 것으로 detonation의 진행에 따라 면이 곡률을 이루는 것을 확인할 수 있다. 이러한 곡률은 폭약의 폭발에 따라 발생하는 압력이 외부로 확산됨에 따라 생성되는 것으로 실험을 통하여 측정이 가능하다.

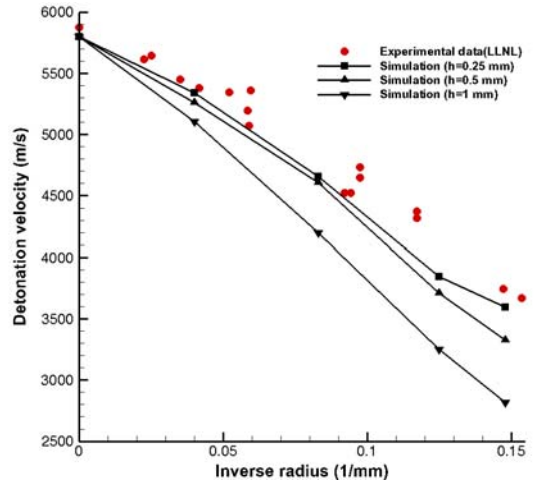


Fig. 1 Comparison of numerical and experimental results for the unconfined rate stick problem

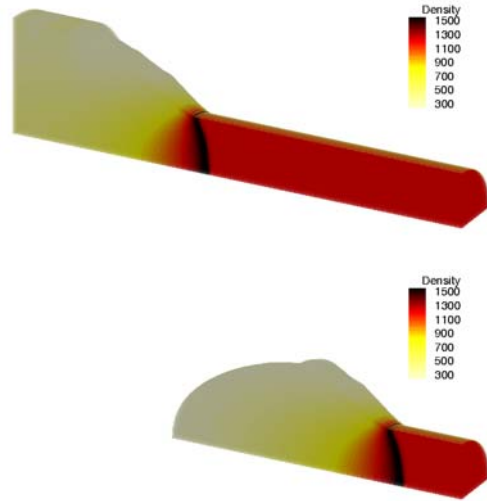


Fig. 2 Density distribution for the unconfined rate stick at 10, 20 μ s

3.2 Confined rate stick 문제

Confined rate stick 문제는 폭약의 EOS를 수정하기 위하여 흔히 사용되는 실험으로 폭약이 폭발할 때 주위를 감싸고 있는 고체관의 팽창속도를 측정하는 것이다. 본 연구에서는 LLNL의 실험데이터 [5]를 이용하였으며, 사용된 고체관은 OFHC 구리이며, 내부의 폭약은 QM-100을 사용하였다. Fig. 3은 detonation이 발생한 이후

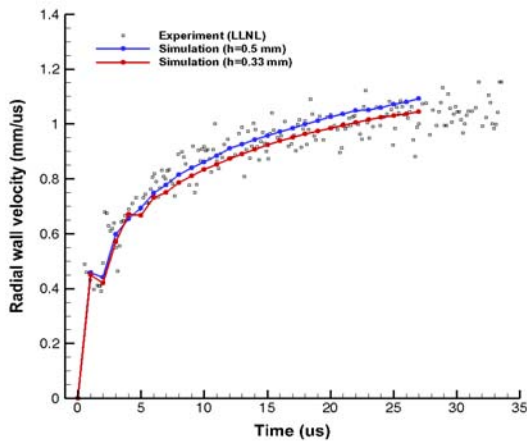


Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results for the confined rate stick problem

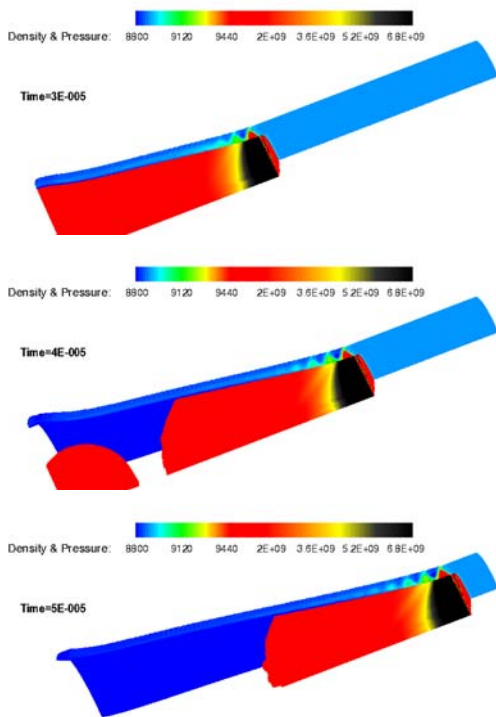


Fig. 4 Sequent snapshots consisting of density (copper) and pressure(explosive) for the confined rate stick problem

발생하는 구리의 팽창속도를 실험결과와 비교한 것으로 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있다.

초기 속도가 증가이후 감소하는 것은 충격파가 구리를 통과한 이후 공기를 통해 나가는 과정에서 반사충격파가 크게 발생하기 때문이며, 이는 Fig. 4를 통하여 명확하게 확인할 수 있다. Fig. 4는 구리는 밀도를, 폭약은 압력을 나타내고 있으며, 구리를 통하여 충격파가 임피던스의 영향으로 반사되는 것을 확인할 수 있으며, 폭약을 통하여 detonation이 진행하며 구리와 상호작용하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

에너지 물질이 포함된 장치가 폭발하게 되면 detonation과 같은 연소현상이 발생되며, 이는 주위의 비반응성 고체 물질에 영향을 가하여 대변형을 유발시키게 된다. 본 연구에서는 다양한 rate stick 문제를 통하여 에너지물질이 포함된 고체와 유체간의 상호작용을 한 가지 해석틀을 통하여 해석하였으며, 실험과의 비교를 통하여 검증은 수행하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구사업 (에너지물질 08-08-01)과 핵심기술(응용연구)지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Kim, K.H. and Yoh, J.J., "Shock compression of condensed matter using multi-material reactive ghost fluid method," *Journal of Mathematical Physics*, 49(4), 043511, 2008
2. Fedkiw, R.P., Aslam, T., Merriman, B., Osher, S., "A Non-oscillatory Eulerian approach to interfaces in multimaterial flows," *Journal of Computational Physics*, Vol. 152, 1999, pp.457-492

3. Enright, D., Fedkiw, R., Ferziger, J. and Mitchell, I., "A hybrid particle level set method for improved interface capturing," *Journal of Computational Physics*, Vol. 183, 2002, pp.83 - 116
4. Souer, P., Anderson, S., Mercer, J. McGuire, E. and Vitello, P., "JWL++: A simple reactive flow code package for detonation," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 25, 2000, pp.54-58
5. Souers, P., "Cylinder test to Utah," *Internal Report*, UCRL-TR-202048, 2004