

Ammonium Nitrate 계열의 폭발물의 폭굉에 관한 연구

김기홍* · 이진욱** · 여재익**†

Numerical Study of Detonation for AN based non-ideal explosives via an Eulerian multi-material method

Kihong Kim*, Jinwook Lee**, Jaick Yoh**†

ABSTRACT

The numerical simulation for detonation failure of ammonium nitrate (AN) based non-ideal explosives is carried out with an accurate and state-of-the-art Eulerian method. Detonation failure is readily observed in the rate stick experiments utilizing the AN mixture explosives and the inert confinements of varying thicknesses. The composition of non-ideal explosives and thickness of the confinements influence the characteristics of detonation failure. Calculated results are compared against the experimental data of both unconfined and confined rate stick problems and provide a reliable guideline to establish a fine-tuned chemical kinetic model for detonation failure.

Key Words : Ammonium Nitrate, Detonation failure, Rate Stick, Rate Law

Ammonium nitrate(AN)를 주로 포함한 ANFO-K1, AN/mineral oil, AN-emulsion과 같은 폭발물은 상업용으로 주로 사용되고 있다. 이러한 AN 계열의 폭발물은 비이상적인 폭약으로 상대적으로 화학 반응 길이가 이상적인 폭약보다 길어지게 된다. 이러한 현상을 비구속 반응 막대 실험(unconfined rate stick test)에서 size effect와 같은 현상으로 나타나게 되며, AN 계열의 비이상적 폭발물을 정확히 해석하기 위한 화학반응모델과 폭발 시 발생하는 압력을 구하기 위한 상태방정식이 필요하다. 본 연구에서는 화학반응모델을 압력 기반의 함수로 이루어진 JWLL++ 모델을 사용하였으며, 상태방정식으로 JWLL 모델을 사용하여 현상을 해석하였다. 본 연구에서는 폭약과 함께 주변의 비반응성 고체에 대한 해석을 위하여 Eulerian 방법을 기반으로 다중 물질 해석을 진행하였다. 각 물질의 경계면은 level set 함수를 이용하여 정의하였으며, 각 물질에 대한 경계 조건은 ghost fluid 기법을 기반으로 하는 물리적 조건을 정의하였다[1].

실험 자료를 통해 알려진 ANFO-K1의 비구속 반응 막대 실험은 폭약의 크기효과(size effect)를 검증하기 위한 해석으로 사용되었다. 실험에

서 사용되는 폭약의 크기가 작아질수록 detonation 속도가 감소하며, 일정 크기 이하에서는 detonation이 소멸되게 된다. 실험에서 사용된 폭약의 반지름은 각각 7, 12, 25 mm 이다. Figure 1은 실험과 수치해석을 통하여 얻어진 결과를 비교한 것으로 다양한 크기의 영역에서 측정된 detonation 속도가 실험과 일치하는 것을 확인할 수 있다. Figure 2는 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.

구속 반응 막대(confined rate stick) 문제는 폭약의 EOS를 수정하기 위하여 흔히 사용되는 실험으로 폭약이 폭발할 때 주위를 감싸고 있는 고체관의 팽창속도를 측정하는 것이다. 본 연구에서는 AN 혼합물인 QM-100의 실험데이터 [5]를 이용하였으며, OFHC 구리로 이루어진 고체관을 사용하였다. Figure 3은 detonation이 발생한 이후 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. Figure 4는 구리의 밀도를, 폭약은 압력을 나타내고 있으며, 구리를 통하여 충격파가 임피

* Lawrence Livermore National Lab (포스닥)

** 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9334 FAX : (054)-279-3199

던스의 영향으로 반사되는 것을 확인할 수 있으며, 폭약을 통하여 detonation이 진행하며 구리와 상호작용하는 것을 확인할 수 있다.

구속 반응 막대 실험에서 상대적으로 두꺼운 파이프를 사용하게 되면, 작은 두께의 폭약에서도 detonation이 유지되게 된다. 이를 이용하면 상대적으로 초기 detonation 발생을 위하여 필요한 추진 화약의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이를 통하여 상대적으로 큰 추진 화약이 필요한 AN/mineral oil을 실험실 환경에서도 사용할 수 있을 만큼 크기를 줄일 수 있다. AN/mineral oil을 사용한 실험 결과가 Fig. 5에 나타나 있으며 폭발을 통해 발생한 파이프의 팽창 길이를 통하여 폭약의 상태방정식을 구할 수 있다. 본 연구에서는 현재 알려져 있지 않은 폭약이거나 폭약의 조성비가 변경되어 압력에 대한 상태방정식이 존재하지 않을 경우에 대한 해석을 수행하였다. Figure 6은 주어진 실험데이터를 이용하여 해석한 결과로 detonation에 의하여 발생한 에너지가 주변의 파이프로 전파되는 것을 보여주고 있으며, 이때 에너지는 파이프의 끝부분까지 전파되지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 두꺼운 파이프를 사용하면 detonation 에너지의 소산이 일정 부분에 한정되어 일어나는 것을 확인할 수 있다. 실험실에서 수행이 가능한 구속 반응 막대 실험을 통하여 폭약의 상태방정식과 화학반응모델을 JWL EOS와 압력에 대한 반응식 형태로 정의하여 이를 실험과 비교 검증한다.

Figure 7은 QM-100 화약이 구리용기 내부의 중심에서 발달되어 초음속 화염으로 전파되는 결과이다. 용기의 중심부를 따라 증가되는 응력이 결국 용기의 항복점에 통과하여 파괴된다. 이렇게 파괴된 틈새로 화약의 반응물(고온고밀도가스)이 새어나가며 이 과정 중에 다양한 반사파의 상호작용을 볼 수 있다.

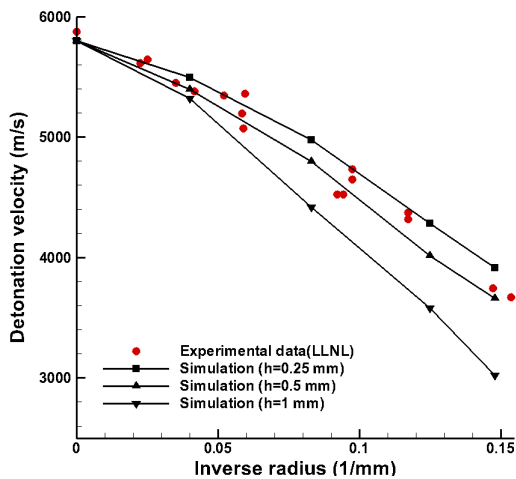


Fig. 1 Size effect curve using ANKO-K1 for the unconfined rate stick problem.

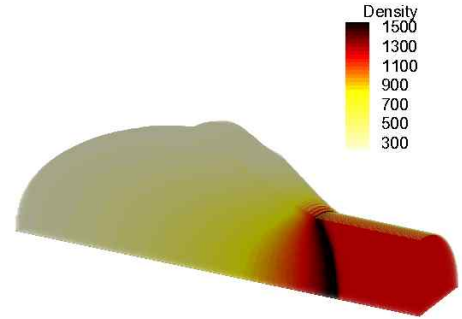


Fig. 2 Density for unconfined rate stick problem with ANFO-K1 of 12 mm.

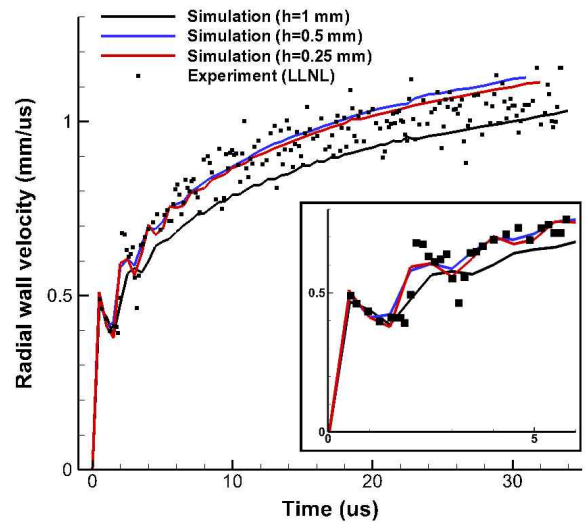


Fig. 3 Calculated and experimental radial wall velocity with time for different mesh sizes.

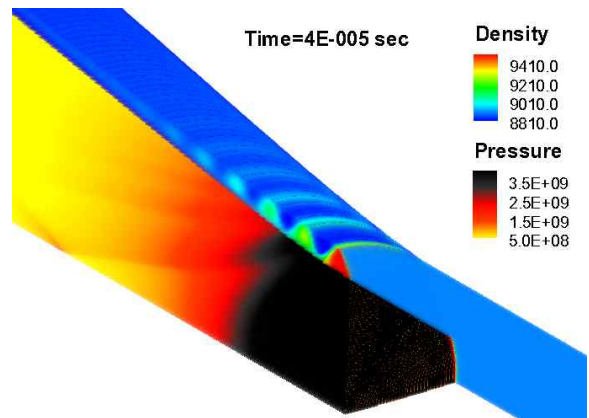


Fig. 4 Snapshot visualized with density of copper and pressure of the QM-100.

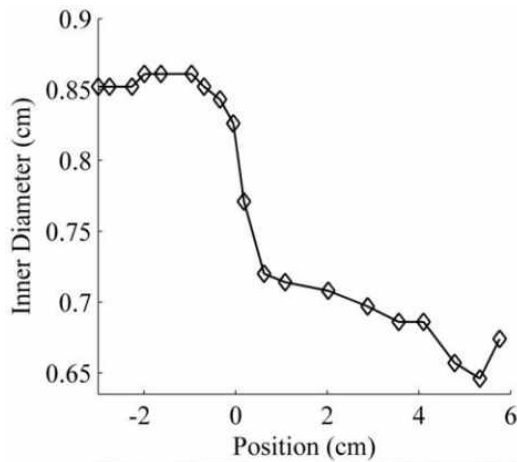


Fig. 5 Measured inner diameter of the confiner for AN/mineral oil confined in 1018 Steel tube.

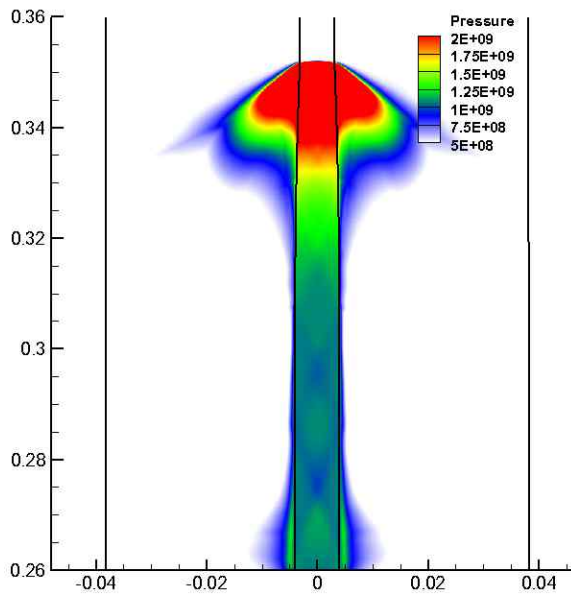


Fig. 6 Calculated pressure for AN mixture explosive confined in 1018 Steel tube.

후 기

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

참고 문헌

[1]K. Kim and J.J. Yoh, "Shock compression of condensed matter using multi-material reactive ghost fluid method," Journal of Mathematical Physics, 49(4), 2008, 043511.
 [2] K. Kim and J.J. Yoh, "A Particle Level-set Based Eulerian Method for

Multi-material Detonation Simulation of High explosive and Metal Confinements," proceedings of the Combustion Institute, in press, 2012.

[3] P. Souer, S. Anderson, J. Mercer, E. McGuire and P. Vitello, "JWL++: A simple reactive flow code package for detonation," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 25, 2000, pp. 54-58.

[4] Souers, P., "Cylinder test to Utah," Internal Report, UCRL-TR-202048, 2004

[5] R. Janesheki, L. Groven, S. Son, "Detonation Failure Characterization of Non-Ideal Explosives," Journal of Applied Physics, submitted, 2012.

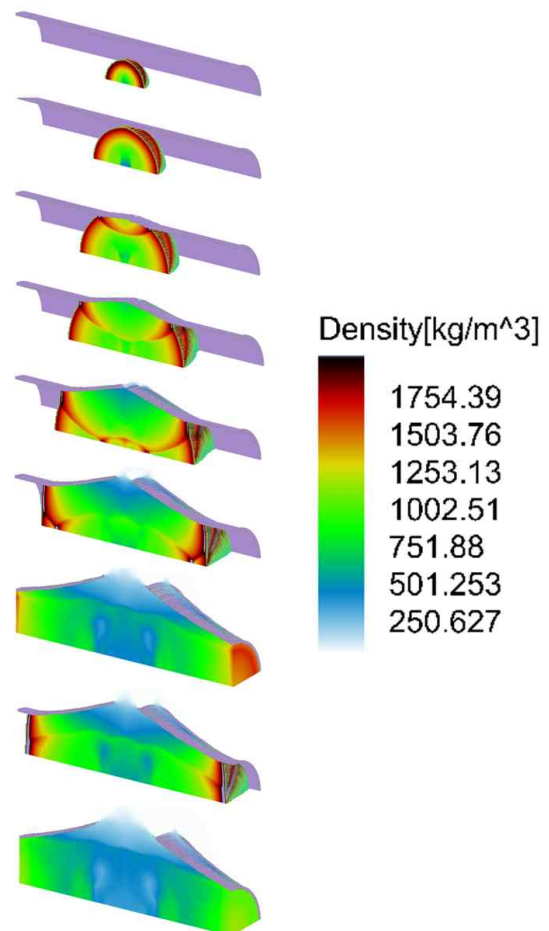


Fig. 7 AN Emulsion (QM-10) 화약의 폭굉에 의한 구리 외벽의 파괴 (1.5 μ s ~ 13.2 μ s)