

유체 동역학 코드를 이용한 화약의 폭발과정에 대한 수치 모델링

박도현^{1)*}, 최병희¹⁾

Numerical Modeling of the Detonation of Explosives Using Hydrodynamics Codes

Dohyun Park, Byung-Hee Choi

Abstract The hydrodynamics code is a numerical tool developed for modeling high velocity impacts where the materials are assumed to behave like fluids. The hydrodynamics code is widely used for solving impact problems, such as rock blasting using explosives. For a realistic simulation of rock blasting, it is necessary to model explosives numerically so that the interaction problem between rock and explosives can be solved in a fully coupled manner. The equation of state of explosives, which describes the state of the material under given physical conditions, should be established. In this paper, we introduced the hydrodynamics code used for explosion process modeling, the equation of state of explosives, and the determination of associated parameters.

Key words Hydrodynamics code, Equation of state, Cylinder expansion test, Explosive modeling

초 록 유체 동역학 코드는 고속 충돌을 모델링하는 수치해석 툴로서 재료가 유체처럼 거동한다고 가정하며, 화약을 이용한 암반발파와 같은 충돌 문제를 푸는 데 광범위하게 사용된다. 암반발파를 현실적으로 모사하기 위해서는 화약을 수치해석적으로 모델링할 필요가 있으며, 이를 통해 암반과 화약의 상호작용 문제를 완전 연계된 방식으로 풀 수 있다. 화약을 수치 모델링하기 위해서는 특정 물리적 조건에서 재료의 상태를 나타내는 상태 방정식이 수립되어야 한다. 본 고에서는 발파 과정을 수치 모델링하기 위한 유체 동역학 코드, 화약의 상태 방정식과 관련 매개변수의 결정방법에 대해 소개하였다.

핵심어 유체 동역학 코드, 상태 방정식, 실린더 팽창 시험, 화약 모델링

1. 서 론

고속 충돌 및 폭발과 같이 매우 짧은 시간 동안 큰 에너지가 방출되어 재료의 대변형을 야기하는 문제를 분석하는 방법에는 실험적 접근법(experimental approach), 해석적 접근법(analytical approach), 수치해석적 접근법(numerical analysis approach)이 있다(Zukas, 2004). 실험적 접근법은 물체에 발생하는 변형을 관찰하는 데 있어서 가장 정확한 방법이지만 극한 상황이 발생

하거나 비용이 많이 소요되는 문제점이 있다. 해석적 접근법은 충돌 시 물체의 변형이나 응력을 예측하기 위하여 지배 방정식을 단순화한 모델링 이론을 이용하는 것으로서 기하학적 조건이 평판, 구(sphere), 실린더 등과 같이 단순한 형상이거나, 하중이 경계나 초기 조건으로 주어지는 경우에 적합한 방법이다. 마지막으로 수치해석적 접근법은 유한요소법(finite element method)이나 유한차분법(finite difference method)과 같은 수치해석 기법을 이용하여 충돌 및 폭발 시 경과 시간에 따른 물체의 변형을 예측하는 것이다. 위의 세 가지 접근법 중 수치해석적 방법은 기본적인 지배 방정식(질량, 운동량, 에너지 보존 방정식), 재료의 상태 방정식(equation of state), 강도 방정식 등을 풀기 위

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : parkdo@kigam.re.kr

접수일 : 2016년 5월 3일

심사 완료일 : 2016년 5월 13일

게재 승인일 : 2016년 5월 24일

하여 상당히 많은 변수를 다루고 일부 조건에 대해 실험 결과와 비교하는 검증 작업이 필요하지만, 실험적 방법이나 해석적 방법에 비하여 짧은 시간 내에 많은 종류의 대변형 충돌 해석을 비교적 정확하게 할 수 있는 장점을 갖고 있다.

화약을 이용한 발파 과정은 화약의 폭굉(detonation) 과 이로 인한 폭발파(blast wave)의 주변 매질로의 전파로 이루어진다. 이러한 발파 과정을 수치해석적으로 모델링하는 방법은 크게 두 가지로서 부분연계모델(partial coupled model)과 완전연계모델(full coupled model)이 있다. 부분연계모델에서는 발파 과정의 첫 번째 단계인 화약의 폭굉을 발파압에 의해 모델링한다. 발파압은 발파공의 벽면에 작용하는 압력으로서 경험식에 기반하여 산정되므로 경험식에 맞지 않는 조건인 경우에는 폭발의 모델링이 적절하지 않을 수 있다. 반면, 완전연계모델에서는 화약 자체를 재료거동 모델을 이용하여 수치해석적으로 모델링하므로 발파문제를 현실적으로 모사(simulation)할 수 있는 장점이 있다. 그러나 완전연계모델에서는 화약의 폭발 과정을 수치 모델링할 수 있는 재료거동 모델을 수립해야 하고, 화약을 모델링하기 위해서는 작은 크기의 해석 요소(element)가 사용되어야 하므로 계산시간이 많이 소요될 수 있다.

본 고에서는 유체 동역학 코드(hydrodynamics code)를 이용한 화약 폭발과정의 수치 모델링 방법 및 화약의 재료거동 모델에 대해 소개하고, 문제점 및 개선사항에 대해 기술하였다.

2. 유체 동역학 코드

2.1 개요

Zukas(2004)에 따르면 유체 동역학 코드는 관통 문제와 충격파 전파 문제 등을 풀기 위한 연속체 역학에 근거한 수치해석 알고리즘으로서 1950년대 후반에 Los Alamos Scientific Laboratory에서 PIC(Particle-In-Cell)의 개발(Harlow, 1955; Evans and Harlow, 1957) 후 Rand Corporation의 Bjork(1958)이 PIC를 steel과 aluminum이 5.5, 20.0, 72.0km/s의 속도로 충돌하는 문제에 적용하면서 개발되었다. 이러한 고속 충돌의 경우에는 재료의 강도를 몇 차수(order) 이상

초과하는 충돌 압력이 작용하기 때문에 재료가 비선형적 거동을 하고 수치 계산은 재료의 강도가 무시된다는 가정, 즉 재료가 유체 동역학적 거동을 보인다는 가정 하에 이루어졌다. 이로 인해 유체 동역학 코드는 재료와 구조물에 작용하는 고속의 큰 집중 하중에 관한 동역학적 문제를 계산하는 컴퓨터 프로그램을 의미하게 되었다. 유체 동역학 코드는 화약의 폭발과 관련된 안전 문제, 원자로 압력 용기(nuclear reactor pressure vessel)의 건설, 항공기 충돌, 자동차 설계, 방위 산업 등 다양한 분야에서 활용되어 왔다.

2.2 수치 모델링 방법

유체 동역학 코드를 구성하는 방법에는 대표적으로 그리드(grid) 생성과 관계되는 Lagrange와 Euler 코드, 요소의 그리드가 필요하지 않은 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 코드가 있다. Lagrange 코드에서는 수치 계산을 하는 동안 요소의 질량이 변하지 않고 일정하게 유지되나 요소의 부피와 밀도가 변화하여 Fig. 1(a)와 같이 요소가 변형하게 된다. 반면, Euler 코드에서는 Lagrange 코드와는 다르게 수치 계산을 하는 동안 요소의 부피가 변하지 않아 요소의 변형은 없으나 요소의 질량과 밀도는 변화하게 된다(Fig. 1(b)). 한편, Lagrange 코드에서는 고정된 질량을 갖는 각 요소의 운동을 추적하기 위하여 그리드가 재료와 함께 변형하므로 흐름 알고리즘 필요하지 않으나, 요소의 크기가 매우 작은 경우 시간증분이 영(zero)에 가까워져 계산 시간이 길어지는 단점이 있다. 반면, Euler 코드는 Lagrange 코드보다 계산 시간 측면에서 효율적일 수 있으나, 대변형 문제를 다루는 경우 Fig. 1(b)와 같이 대변형에 따른 질량의 흐름을 모사하기 위하여 필요한 요소의 수가 과다해지는 단점을 갖고 있다. 그리고 재료흐름(material transport)의 결정, 즉 한 요소의 재료를 이웃하는 요소로 이동시키는 흐름 알고리즘이 필요하고 아직까지는 일반화된 흐름 알고리즘이 없다(Zukas, 2004).

앞서 설명한 대로 Lagrange와 Euler 코드는 수치 모델링 시 그리드를 생성하는 코드이나, 천체 물리현상을 해석하기 위하여 Lucy(1977)와 Gingold and Monaghan(1977)에 의해 개발된 SPH 코드는 Fig. 1(c)와 같이 Lagrange와 Euler 코드에서 필요한 그리드를

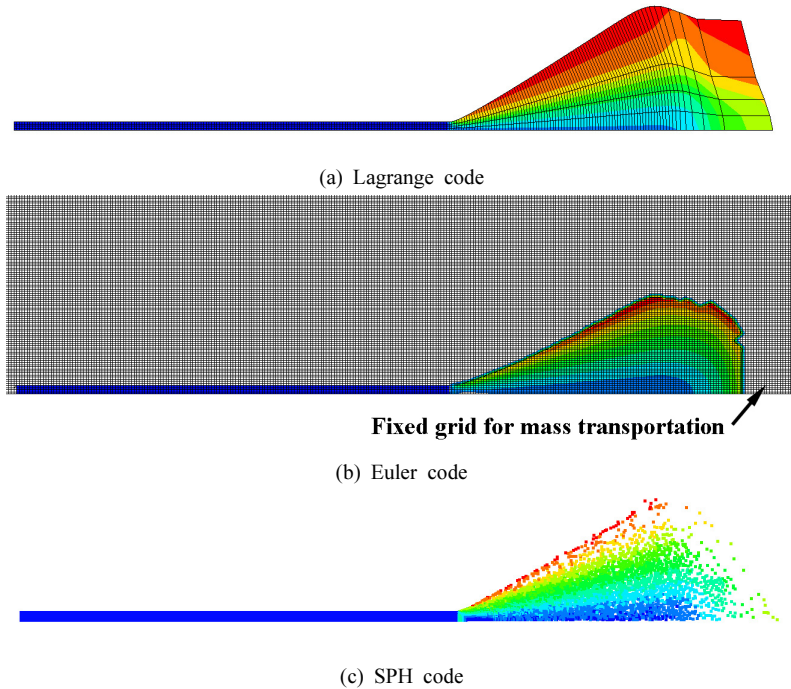


Fig. 1. Numerical modeling of explosives(Park, 2009).

생성하지 않으므로 무요소 코드(meshfree code)라고도 한다. 그리드는 재료를 모델링한 구조나 순서에 대한 정보를 제공하지만, Lagrange와 Euler 코드에서 각각 아주 작은 그리드의 변형이나 아주 작은 부피의 재료 흐름이 발생하는 경우 물리량(밀도, 압력, 에너지 등)을 평형화하는 데 많은 반복계산이 요구되거나 계산오류가 발생하기 때문에 재료의 파괴 및 분리와 관련된 대변형 문제를 푸는 데 어려움이 있다. 반면, SPH 코드에서는 Fig. 1(c)와 같이 그리드의 모델링이 필요하지 않아 Lagrange 코드에서의 요소의 큰 왜곡(distortion)에 따른 요소 재생성의 부담이 근본적으로 제거되고, 입자분리에 근거하여 입자들 간에 상호 작용을 계산하므로 재료 파괴 및 분리와 관련된 대변형 문제를 Lagrange와 Euler 코드에 비해 어려움 없이 계산할 수 있는 장점이 있다.

SPH 코드에서 입자는 단순히 상호 작용하는 질량 점(mass point)이 아니라 물리량(밀도, 변형률, 압력, 에너지 등)을 계산하기 위한 보간점(interpolation point)이고 물리량의 보간을 위해 가중 함수(kernel function)

를 사용한다. Fig. 2는 1차원 상에서 밀도에 대한 kernel approximation을 나타내는 그림으로서 Fig. 2(a)에서 I번 입자의 밀도는 완화 길이(smoothing length), h 에 대하여 I번 입자를 중심으로 반경 $2h$ 인 원의 내부에 포함되는 입자들의 밀도와 Fig. 2(b)에 표시된 각 입자들의 가중 함수의 값을 이용하여 식 (1)과 같이 산정된다.

$$\rho^I = \sum_{j=1}^N m^j W^{IJ}(X^I - X^j, h) \quad (1)$$

여기서 ρ^I 는 I번 입자의 밀도, m^j 는 j번 입자의 질량, W^{IJ} 는 가중 함수, X 는 입자 중심의 위치, h 는 완화 길이이다.

위의 계산 과정은 해석 시간 단계별로 각 입자의 위치와 주변 입자들의 위치를 재분석하여 반복되고 기타 물리량(변형률, 속도, 압력 등)도 이와 같은 방식으로 계산된다.

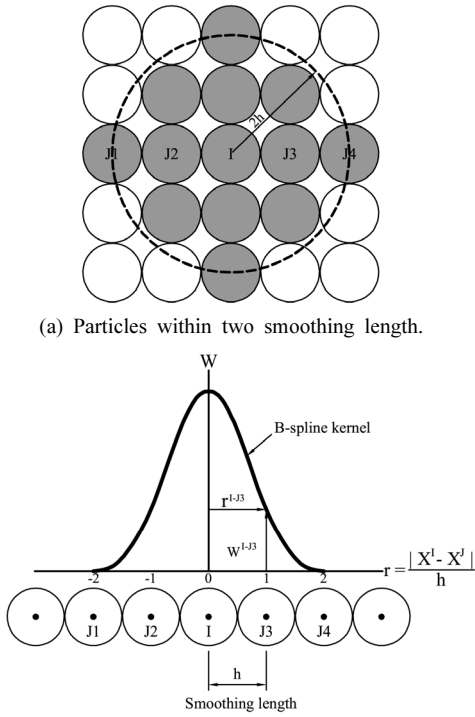


Fig. 2. Kernel function for interpolation in SPH code.

3. 화약의 재료 모델

3.1 화약의 거동

화학 물질의 결합체인 화약은 폭굉 시 빠른 반응에 의해 높은 압력의 큰 에너지를 생성하고 반응 생성물을 가스의 형태로 순간적으로 방출한다. 따라서 화약이 가진 전체 에너지는 폭굉에 의해 발생하는 에너지의 크기와 반응 생성물이 팽창하는 가스가 외부에 전달되는 힘에 의해 결정된다고 할 수 있다. Fig. 3은 화약의 폭굉 과정을 설명하는 그림으로서 그림의 좌측은 이미 화학 반응이 발생한 영역, 즉 반응 영역(reacted zone)을 나타내고 우측은 아직 화학 반응이 일어나지 않은 순수 화약의 상태, 즉 미반응 영역(unreacted zone)을 나타낸다.

반응 영역과 미반응 영역에 대한 질량, 운동량, 에너지 보존 법칙에 따라 식 (2)-(4)와 같은 보존식들이 유도된다.

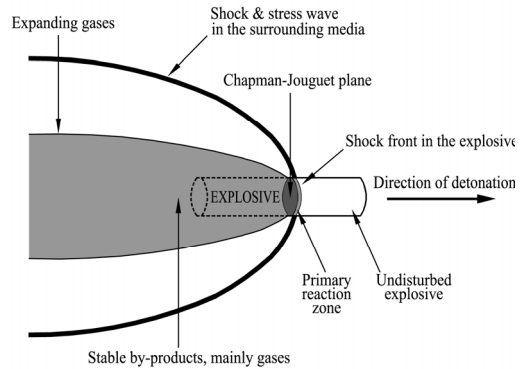


Fig. 3. Detonation process of an explosive(Park, 2009).

질량 보존식:

$$\rho_0 U_s = \rho_1 (U_s - u_p) \tag{2}$$

운동량 보존식:

$$P_1 - P_0 = \rho_0 U_s u_p \tag{3}$$

에너지 보존식:

$$P_1 u_p = \frac{1}{2} \rho_0 U_s u_p^2 + \rho_0 U_s (E_1 - E_0) \tag{4}$$

여기서 ρ_0 과 ρ_1 은 충격 전과 후의 밀도, U_s 와 u_p 는 충격파 속도와 충격파 전파에 따른 재료의 입자 속도, P_0 과 P_1 은 충격 전과 후의 압력, E_0 과 E_1 은 충격 전과 후의 내부 에너지(internal energy)이다.

위의 식 (4)에서 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 속도 기호를 제거하면 식 (5)와 같은 랭킨-유고니오(Rankine-Hugoniot) 곡선(또는 유고니오 곡선)이 얻어진다.

$$(E_1 - E_0) = \frac{1}{2} (V_0 - V_1) (P_1 + P_0) \tag{5}$$

여기서 E_0 과 E_1 은 충격 전과 후의 내부 에너지, V_0 과 V_1 은 충격 전과 후의 부피, P_0 과 P_1 은 충격 전과 후의 압력이다.

Fig. 4는 폭굉 시 화약과 화약의 화학 반응에 의해 생성된 가스생성물의 유고니오 곡선을 나타낸다. 화약에 대한 유고니오 곡선을 보면 폭굉 전의 화약의 압력과 부피는 P_0 과 V_0 이고 폭굉 시 발생하는 충격파로 인해 압력은 증가하고 화약은 압축되어 압력과 부피

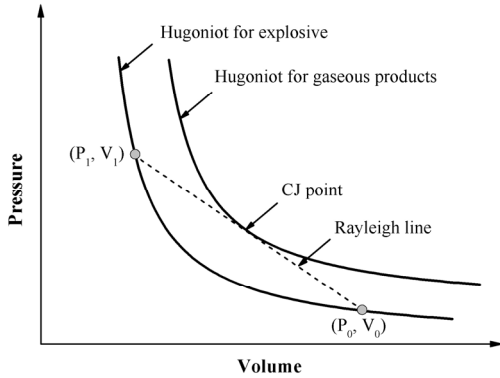


Fig. 4. Change of state due to detonation of an explosive.

가 P_1 과 V_1 이 된다. 그리고 화약의 폭굉 시 화학 반응에 의해 생성된 열로 인해 가스생성물에 대한 유고니오 곡선이 추가적으로 얻어진다. 폭굉 전의 압력과 부피인 P_0, V_0 과 폭굉 후의 압력과 부피인 P_1, V_1 을 연결하는 직선(Rayleigh line)과 가스생성물의 유고니오 곡선이 만나는 점이 CJ(Chapman-Jouguet) 점이다. CJ 점은 폭굉 전 압력과 부피인 (P_0, V_0) 점에서 가스생성물의 유고니오 곡선에 대한 접선의 접점을 나타낸다. 생성된 가스는 고압으로 인해 무점성 유동(inviscid flow)을 하는 것으로 가정할 수 있고, 이에 따라 화약의 폭발로 인한 가스 팽창의 과정은 등엔트로피 과정으로 간주할 수 있다. 이러한 화약의 폭굉 및 가스 팽창 과정을 수치 모델로 모사하기 위해서는 상태 방정식의 설정이 필요하다.

3.2 화약의 상태 방정식

상태 방정식은 재료의 거시적인 거동에 대한 실험적 관찰을 통하여 원자 격자(atomic lattice)의 미세구조 모델을 이론적으로 예측하기 위한 식이다. 화약의 상태 방정식과 관련된 연구는 다양하게 수행되어 왔고, 대표적으로 polytropic gas law, BKW(Becker-Kistiakowsky-Wilson), JWL(Jones-Wilkins-Lee), LJD(Lennard-Jones-Devonshire) 등의 상태 방정식들이 있다. 이러한 여러 형태의 모델들 중 JWL 상태 방정식은 알려진 단점, 즉 금속 실린더의 구속(confinement)로 인해 화약의 폭발 팽창에 대한 과소 평가(Hamashima et al., 2004)의 문제점에도 불구하고, 화약의 거동을 비교적 잘 모사하고 상태 방정식의 매개변수들에 대한 연구가

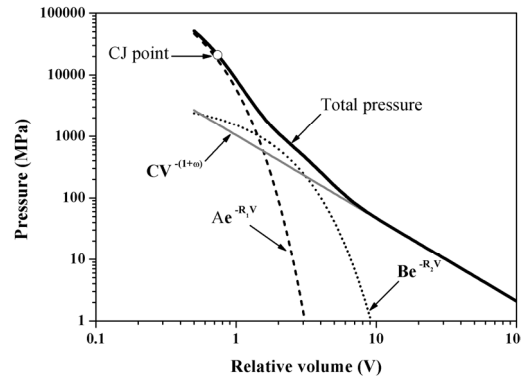


Fig. 5. JWL equation of state for high explosives.

TNT(trinitrotoluene), ANFO(ammonium nitrate and fuel oil)를 포함하여 다양한 종류의 화약에 대해 수행되어 유체 동역학 코드에서 가장 많이 사용된다. 식 (6)은 화학반응 후 가스생성물의 등엔트로피 팽창 과정에 대한 JWL 식이고, 식 (7)은 화약의 내부 에너지를 고려한 최종적인 상태 방정식을 나타낸다. Fig. 5는 등엔트로피 팽창 과정에 대한 전형적인 JWL 상태 방정식의 형태를 나타낸다.

$$P_s = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + CV^{-(\omega+1)} \quad (6)$$

$$P = P_s + \int \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_V dE = P_s + \frac{\omega}{V}(E - E_s) \quad (7)$$

$$= A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E$$

여기서 P_s 와 E_s 는 등엔트로피 가스팽창 과정에 대한 압력과 에너지, P 와 E 는 화약의 내부 에너지를 고려한 최종 압력과 화약의 내부 에너지, V 는 상대 부피(relative volume, 밀도에 대한 초기 밀도의 비), $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ 는 화약 거동을 표현하는 JWL 상수들이다.

JWL 상태 방정식의 주요 특징은 이상 기체(ideal gas)에 대한 polytropic equation of state에서 가스 팽창에 따른 압력과 부피의 관계가 Fig. 6과 같이 로그 좌표에서 선형적인 반면, JWL 상태 방정식에서는 Fig. 5와 같이 세 단계에 걸쳐 표현된다는 것이다. Alia and Souli(2006)에 따르면 JWL 상태 방정식의 첫 번째 항은 고압에 대한 식으로서 상대 부피가 1에

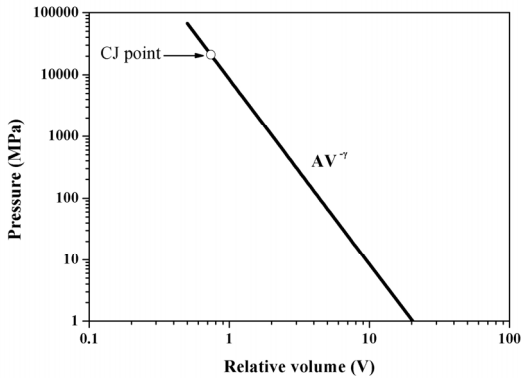


Fig. 6. Polytropic equation of state for ideal gas.

가까울 때 지배적인 영향을 미치는 식이고, 두 번째 항은 상대 부피가 2에 가까울 때 큰 영향을 미치는 식이다. 마지막 세 번째 항은 상대 부피가 무한히 커지는 경우의 가스 팽창을 묘사하기 위한 polytropic equation of state이다.

3.3 JWL 상태 방정식의 매개변수 산정 방법

JWL 상태 방정식의 매개변수들은 실린더 팽창 시험(cylinder expansion test)을 통하여 산정될 수 있다. 실린더 팽창 시험은 얇은 두께의 구리(copper) 재질의 실린더 안에 화약을 장착시켜 기폭하고 폭발에 따른 팽창 과정을 고속 카메라를 이용하여 시간대별로 촬영하는 시험이다. 일반적으로 길이 305mm, 내부 직경 25.4mm, 두께 2.6mm인 구리 재질의 실린더가 사용되고(Hornberg and Volk, 1989), 구리 재료를 사용하는 이유는 구리의 큰 연성 특성(ductile property)로 인하여 화약의 폭발에 따른 팽창의 궤적을 정밀하게 촬영할 수 있기 때문이다. Merchant et al.(2002)은 길이 300mm, 직경 25.4mm인 화약을 두께 2.6mm인 구리 재질의 실린더에 삽입한 후 촬영 속도 30mm/us인 CORDIN의 회전 거울형 카메라(rotating mirror camera)를 사용하여 시험을 수행하였고, Itoh et al.(2002)은 금속 실린더를 사용하지 않고 PMMA(polymethylmethacrylate) 재질의 수조를 제작하여 수중에서 촬영 속도 100~10,000,000 fps인 HADLAND PHOTONICS의 IMACON468 카메라를 사용하여 시험을 수행하였다(Fig. 7).

실린더 팽창 시험에 의해 촬영된 화약의 폭발 영상

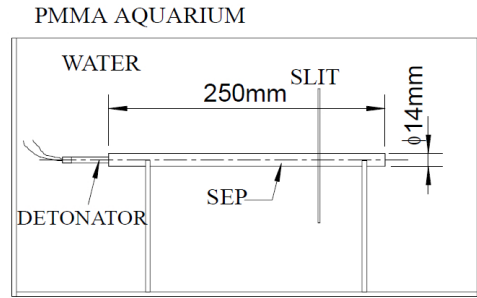


Fig. 7. Experimental device for cylindrical high explosive (Itoh et al., 2002).

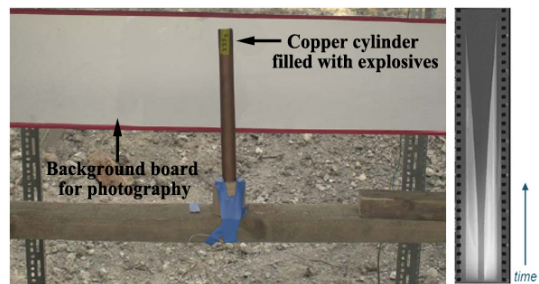
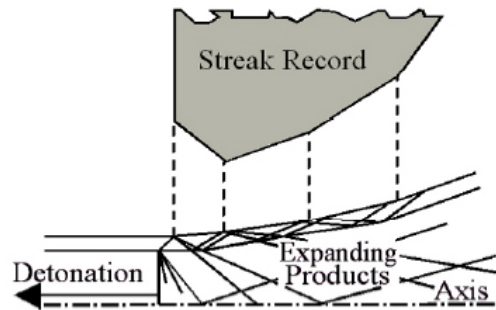


Fig. 8. Example of cylinder expansion test(Donahue and Ripley, 2005).

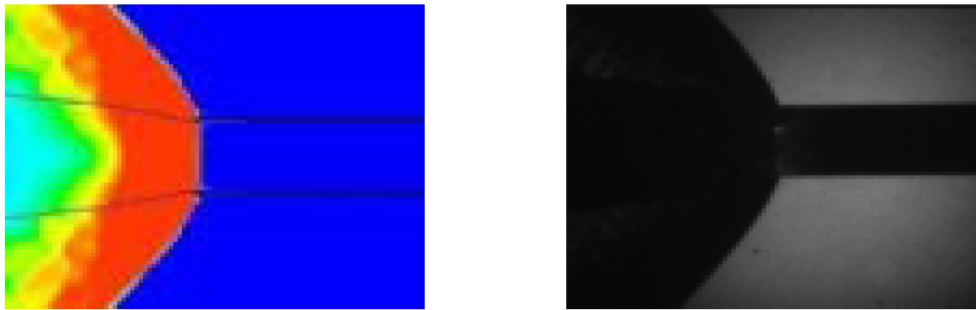
을 이용하여 JWL 상태 방정식의 매개변수들을 결정하는 방법에는 크게 해석적 방법(analytic method)과 시행오차법(trial and error method)이 있다(Lan et al., 1993). 해석적 방법은 시행오차법의 반복 계산에 따른 과도한 분석 시간을 단축시키기 위해 단순화된 이론적 모델을 이용하여 실린더 팽창 궤적에 따른 압력과 부피의 관계를 얻는 방법이고, 시행오차법은 촬영된 실린더 팽창 궤적이 유체 동역학 코드로 해석한 결과와 허용 범위 내에서 일치할 때까지 반복적으로 계산하는 방법이다. 해석적 방법은 단순하여 시간적 측면에서 효율적이나 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 시행오차법을 이용하여 JWL 상태 방정식의 매개변수들을 결정한다.

시행오차법에 의하여 JWL 상태 방정식의 매개변수들을 결정하는 과정은 다음과 같다.

- ① 임의의 초기 매개변수들로 실린더 팽창 시험을 수치해석
- ② 실린더 팽창 시험의 결과와 수치해석의 결과의 팽창 궤적 비교



(a) Photographing using streak camera



(b) Comparison between the numerical (left) and experimental results (right)

Fig. 9. Determination of the parameters of JWL equation of state(Itoh et al., 2002).

③ 1단계의 매개변수들로 분석된 수치해석의 결과와 실린더 팽창 시험의 결과가 허용 범위 내에서 만족할 때까지 1, 2단계를 반복 수행하여 최종적으로 JWL 상태 방정식의 매개변수들을 결정

Fig. 8은 실린더 팽창 시험을 수행하기 위한 기폭 전 시험 장면을 나타내고(Donahue and Ripley, 2005), Fig. 9는 고속카메라에 의해 촬영된 화약의 폭발 영상과 앞서 언급한 시행오차법을 통하여 최종적으로 결정된 수치해석상의 화약의 팽창 궤적을 나타낸다(Itoh et al., 2002).

4. 맺음말

본 고에서는 화약의 폭발과정을 수치해석적으로 모델링하기 위한 유체 동역학 코드, 화약의 상태 방정식과 관련 매개변수의 산정방법에 대해 소개하였다. 기존에 잘 알려지고 많이 사용되는 TNT, ANFO 등의 화약에 대해서는 재료거동 수치모델에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔고, 상태 방정식과 관련된 물성들이 정립된 것으로 파악되었다. 그러나 국내에서 생산

되고 발파굴착 작업시 많이 사용되는 에멀전과 다이너마이트 계열의 폭약에 대해서는 관련 연구가 거의 이루어지지 않고 있다. 이로 인해 사용되는 화약 대신에 재료물성이 알려진 TNT나 ANFO로 장약량을 환산하여 발파해석을 수행하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 방법은 발파원 모델링의 정확도가 높지 않는 방법으로 향후 국내에서 생산되는 화약을 대상으로 한 재료거동 수치모델에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 화약의 폭굉에 대한 Chapman-Jouguet 이론은 화약의 반응속도가 매우 커서 충격파가 지나가면 화학반응이 순간적으로 동시에 발생하는 것을 가정한 단순한 모델이다. 이 경우 폭발파의 속도 및 압력과 같은 물리적인 성질들은 기폭 방법 등에 무관하고, 오직 반응 전과 후의 화약상태에 의해서만 결정된다. 그러나 기폭이나 폭발파의 형성, 복잡한 형상에서의 전파특성 등을 현실적으로 모델링하기 위해서는 화약의 반응속도를 고려해야 한다. 따라서 유한한 속도의 화학반응을 고려하는 Zeldovich-von Neumann-Doring 폭굉이론과 같은 수치모델에 대한 연구가 향후 필요

할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘심부 지오시스템 특성 평가기술 개발(과제코드 GP2016-014)’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Alia, A. and M. Souli, 2006, High explosive simulation using multi-material formulations, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, No. 10, pp. 1032-1042.
- Bjork, R.L., 1958, Effects of a meteoroid impact on steel and aluminum in space, The Rand Corporation Report, P-1662.
- Donahue, L. and R.C. Ripley, 2005, Simulation of cylinder expansion tests using an Eulerian multiple-material approach, Proceedings of the 22nd International Symposium on Ballistics, CD-ROM.
- Evans, M.W. and F.H. Harlow, 1957, The particle-in-cell method for hydrodynamic calculations, Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-2139.
- Gingold, R.A. and J.J. Monaghan, 1977, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 181, pp. 375-389.
- Hamashima, H., Y. Kato and S. Itoh, 2004, Determination of JWL parameters for non-ideal explosive, Proceedings of the 13th American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter (The American Institute of Physics Conference Proceedings 706), pp. 331-334.
- Harlow, F.H., 1955, A machine calculation method for hydrodynamic problems, Los Alamos Scientific Laboratory Report, LAMS-1956.
- Hornberg, H. and F. Volk, 1989, The cylinder test in the context of physical detonation measurement methods, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 14, No. 5, pp. 199-211.
- Itoh, S., H. Hamashima, K. Murata and Y. Kato, 2002, Determination of JWL parameters from underwater explosion test, Proceedings of the 12th International Detonation Symposium, CD-ROM.
- Lan, I.F., Hung, S.C., Chen, C.Y., Niu, Y.M., Shiuan, J.H., 1993, An improved simple method of deducing JWL parameters from cylinder expansion test, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 18, No. 1, pp. 18-24.
- Lucy, L.B., 1977, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, The Astronomical Journal, Vol. 82, No. 12, pp. 1013-1024.
- Merchant, P.W., S.J. White and A.M. Collyer, 2002, A WBL-consistent JWL equation of state for the HMX-based explosive EDC37 from cylinder tests, Proceedings of the 12th International Detonation Symposium, CD-ROM.
- Park, D., 2009, Reduction of blast-induced vibration in tunnelling using barrier holes and air-deck, Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea.
- Zukas, J.A., 2004, Introduction to hydrocodes, Amsterdam, Elsevier.



박도현

한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3913
E-mail: parkdo@kigam.re.kr



최병희

한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr