폭발, 고속충돌과 같은 초비정상 구조물 대변형 전산해석 코드개발

Development of Hydrocode for Large Deformations

이 민 형* • 정 완 진**

Lee, Minhyung • Chung, Wan-Jin

요 약

선진국 국립연구소에서만 개발하여 적용중인 hydrocode 또는 wavecode를 최근에 국내에서 C++언어로 ExLO를 개발하였다. 3차원 FEM을 적용한 본 코드의 가장 두드러진 특징은 Lagrangian/ALE/Eulerian solver 들을 모두 한 프레임에 내포하고 있어 적용범위에 따라 즉 변형양상에 따라 선택적인 해석 solver의 적용이 가능하다는 것이다. 즉 문제에 따른 (변형의 양상에 따른) 최적의 시뮬레이션 해석 solver 적용할 수 있다. 본 논문에서는 ExLO를 이용하여 고속 물체의 충돌, 파편의 구조물 관통해석 및 대기 중 Air-blast 충격파 전파해석, 물속에서의 수중폭발 충격파 생성 및 전파해석 등의 예제를 소개하고 그 신뢰성을 확인해 보고자 한다. 대체로 군사적인 적용이 많으나 차츰 민간분야의 다양한 방재현상 시뮬레이션에 적용이 가능할 것이다.

1. 서 론

고속충돌 및 폭발 등의 초비정상, 대변형 문제를 해석하기 위하여 50년대 이후부터 전산기법들이 연구되어 왔는데 이러한 전산 프로그램을 hydrocode, wavecode 또는 shock physics code라 한다. 국내에서는 Lagrangian 하이드로코드가(유요한, 이민형 2003) 약 15년 전부터 개발이 진행되어 적용이 되고 있으며 현재 병렬화 진행 중이다. Eulerian 하이드로코드 (이민형, 정완진, 2006)는 2004년부터 개발진행 중이며 현재 코드명은 ExLO 이다. 기본적으로 3차원 직각좌표계를 사용하고 있지만 1차원 구형좌표계 및 2차원 축대칭 좌표계 모델링이 가능하다. 본 코드의 특징은 Lagrangian/ALE/Eulerian 해석 solver 들이 모두 하나의 framework에 통합되어 있다는 것이다. 이를 활용하면 충돌해석, 파편의 형성, 대기 중 air-blast, 수중에서의 underwater explosion, weapon storage explosion 등등의 해석이 가능하다. 유한요소법 (FEM)을 사용하고 다중물질 (multi-material), 대변형 (large deformation) 및 강한 충격파를 다룰 수 있다.

본 논문에서는 Eulerian solver를 사용하여 충돌해석 및 폭발해석 예제를 소개한다. 몇 경우에 대한 충돌해석을 수행하여 실험값과 비교하여 좋은 결과를 얻었다. 또한 대기 중 폭발 (air-blast) 및 수중폭발 (underwater explosion) 예제를 해석하고 결과를 검정해 보았다. 현재 추가적으로 solver switching 기법 (Lagrangian solver에서 Eulerian solver로 계산중에 변환) 및 병렬화 등의 연구가 진행 중이다.

* 정회원 ▪ 세종대학교 기계항공우주 공학부 교수 mlee@sejong.ac.kr

** 정회원 ▪ 서울산업대학교 금형공학과 교수 Wjchung@snut.ac.kr

2. ExLO 코드 개요

2.1. Operating Splitting Scheme

CFD 코드에서는 단일 스텝으로 해를 구해나가는 방식이 보편적이나 고체역학 문제를 푸는 다중물질 방식의 대부분은 2단계 스텝으로 해를 구한다. 해를 2 단계로 나누어 해를 전진시키는 기법을 "operating splitting" 기법이라 한다. 이 방식은 다양한 분야에서 편미분 방정식을 푸는 수치기법으로 적용되고 있다. 이 기법을 적용하면 해 f(x,t)를 다음과 같이 대류항 (v = 속도)과 소스항 S(x,t)을 지닌 2개의 식으로 나누어 푸는 방식이다 (Chorin, 1980).

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} = S(x,t) \tag{1}$$

다음과 같이 나누어푼다.

단계 1 (Lagrangian step) :

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} = S(x,t) \tag{2}$$

단계 2 (Remap step) :

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

해는 매 시간스텝마다 각각의 단계가 처리되면서 전진한다. 단계 1에서는 Lagrangian 계산을 수행하는데 이는 순수 Lagrangian Solver 계산과 동일하다, 이후 메쉬 이동된 질점의 위치를 고정된 초기 위치로 돌려보내게 된다. 이 과정에서 적절한 체적, 질량, 운동량 그리고 에너지가 요소들 사이를 움직이기 마련인데 이러한 이류를 단계 2 Remap 과정이 처리한다. 차원 물질 이류 계산과정에서는 일차원 이류 방정식을 각각의 축 방향으로 순차적으로 적용하는 공간적 연산자분리 방식으로 적용하여 프로그램 기법의 단순함을 유지하는 방식을 채택하였다.

2..2 주요 기법

3차원 직각좌표계를 사용하고 있으며 1차원 구형좌표계 및 2차원 축대칭좌표계 문제도 설정이 가능하다. Mixture Theory를 구현하여 보이드(Void)를 포함한 다중물질 처리가 가능하다. 보존방정식들을 유한요소법(FEM)으로 기술하여 질량, 운동량 및 에너지를 보존하게 한다. 육면체 모양의 요소를 만들게 되는데 직육면체뿐만 아니라 임의의 육면체 모양을 모두 다룰 수 있다. 질량, 에너지, 압력 등등의 물리량들은 요소의 중앙에서 설정이 되면 속도, 변위, 가속도 및 힘 등은 절점에서 정의된다. 절점의 질량은 주위의 8개 요소 질량의 1/8로 정한다. 운동량은 절점의 운동량과 요소 중앙에서 정의되는 요소 운동량을 모두 다룬다. 요소 운동량은 8개 절점속도의 평균값과 요소의 질량을 곱하여 정의한다.

3.충돌 (Impact) 예제

본 단원에서는 고체물체의 고속 충돌(high-speed impact)/침투(penetration)해석을 다루었다. ExLO 코드를 이용한 3차원 수치해석 결과를 실험값 및 경험식과 비교 검증하여 정확도를 확인하였다. 특히 Eulerian solver를 사용하였다.

3.1 텅스텐 로드의 무한타겟 침투해석 (WHA rod impact into steel target)

L/D=5 (길이 대 지름의 비) 텅스텐 실린더 봉이 무한두께의 4030 steel 타겟에 충돌하는 예제를 다루었다. 충돌속도는 1000, 1500 및 2000 m/s이다. 수직 충돌만 고려하였기 때문에 타겟의 계산영역은 1/4 영역으로 설정가능하다. 타겟의 깊이방향 계산 영역은 봉의 길이보다 약 3배 정도로 하였고 옆면으로는 봉의 반지름보다 약 10배 정도의 크기로 하였다. 메쉬 민감도 조사이후 최종 계산에 사용된 메쉬 시스템은 120x35x35=147,000 이다. 계산에서 예측된 침투과정을 그림 1에 제시하였다. 대체로 일반적인 무한타겟 침투 현상들이 잘 예측되고 있음을 보여준다. 계산의 정확도 확인을 위하여 최종 침투 깊이 (P, penetration depth)를 문헌에서 제시되는 다음과 같은 경험식 (Anderson, 1996)과 비교하여 보았다.

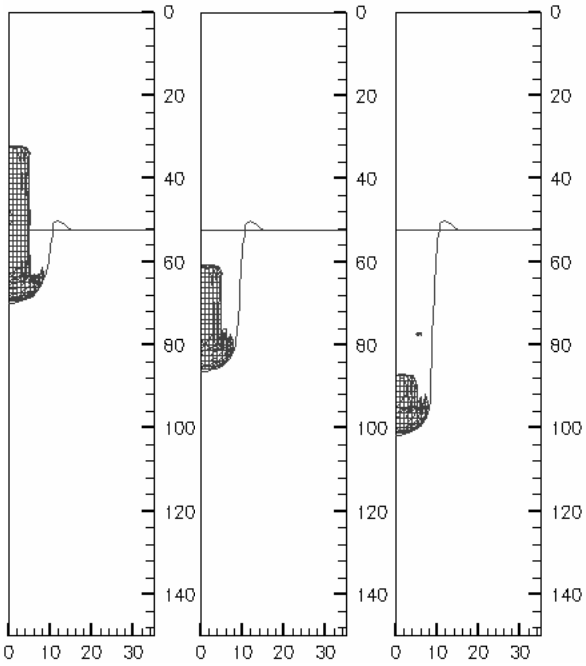

그림 1. L/D=5 텅스텐 로드의 무한 스틸 타겟 침투과정, 충돌속도=1.5 km/s.

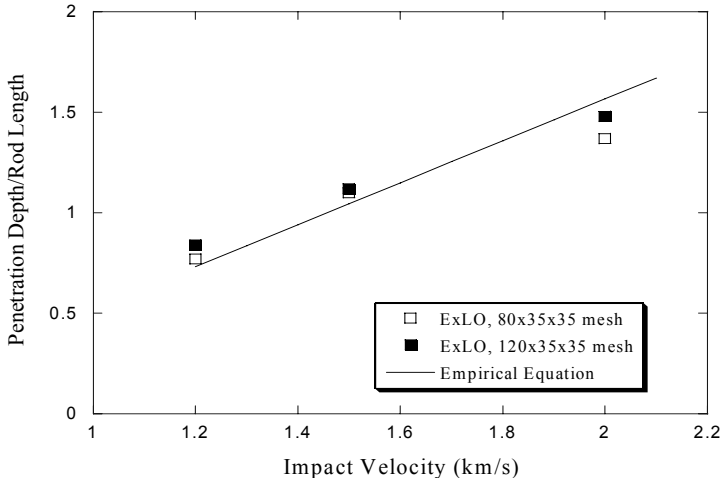

그림 2. 충돌속도별 침투깊이 비교 (경험식과 ExLO 수치해석)

3.2 파편탄의 무한 타겟 침투 (FSP impact into thick target)

파편의 형상과 유사한 물체에 대한 고속충돌 해석을 수행하였다. ExLO를 이용하여 L/D=1, 1/2, 1/4에 대해 3차원 해석을 수행하여 문헌에 제시된 실험 및 또 다른 수치계산 결과와 비교하여 보았다. 충돌속도는 1.5 및 2.0 km/s로 하였다. 계산영역은 대칭면의 존재로 인하여 1/2 계산영역을 설정하였다. 메쉬 시스템은 100x80x40 (=320,000개)로 하였다.

그림 3에 L/D=1/4인 파편의 침투과정을 제시하였다. 여기서는 긴 로드의 침투과정과는 달리 얇은 물체에서만 발생하는 침투현상들이 잘 예측되고 있다. 최종 침투깊이를 문헌 (Walker, 1999)에서 얻어진 값들과 비교하여 그림 4에 제시하였으며 대체로 잘 일치함을 보인다.

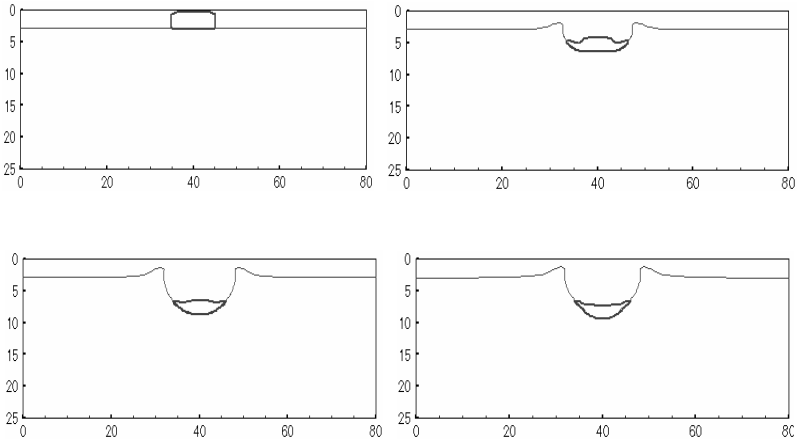

그림 3. 얇은 충돌체 (파편)의 무한타겟 침투과정 (L/D=1/4)

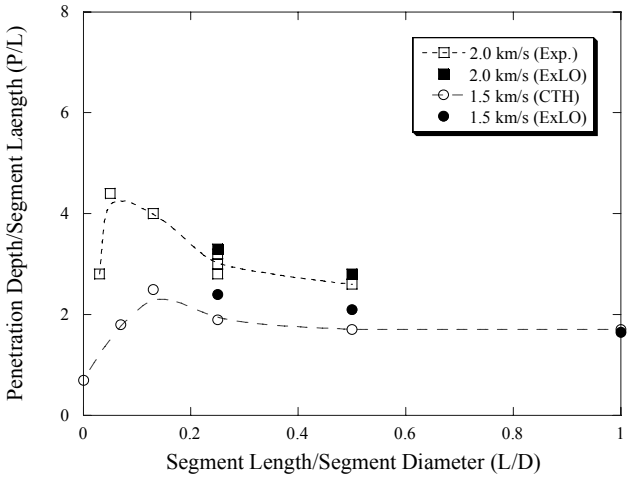

그림 4. 충돌속도별 침투깊이 비교 (L/D<1 인 경우)

4.폭발 (Explosion) 예제

본 단원에서는 대기 및 수중에서의 폭발물(explosive)의 폭발해석을 다루었다. 폭발물의 폭발에 의해 초기 충격파(initial shock)의 생성 및 전파, 버블(bubble)의 생성 및 진동(oscillation)에 의한 2차적인 버블 충격파(bubble collapse wave)의 전파과정을 ExLO로 계산하고 엄밀해, 실험 그리고 다른 기법에 의한 수치계산과 비교하였다. 폭발 예제를 다루기 위해 폭발물은 JWL, 공기는 Ideal gas 및 물은 Mie-Grunisen 상태방정식(EOS)이 사용된다.

4.1 Air-Blast 예제

논문에 대기 중 무한영역에서의 폭발 및 충격파에 대한 거리별 충격파의 크기 및 도달시간에 대한 엄밀해가 Kinney and Graham (1995)에 의해 알려져 있다. 따라서 무한영역 계산을 위해 일차원 구형자표계(spherical coordinate) 모델을 설정하였다. 반경반향으로 육면체를 모델링하였는데 옆면은 일정한 트기의 경사각을 설정한다. 중앙에 TNT를 나머지는 공기를 모델링하였다. 메쉬의 민감도를 조사하기 위하여 요소 수를 500, 1000 및 2000개를 반경 100 m 영역에 형성하였다. Imax = 500개인 경우 9,080 kg의 TNT를 중앙부분 요소 5개로 모델링하였고, Imax = 1000, 2000인 경우 각각 10개 요소 및 20개 요소로 모델링하였다.

그림 5에 여러 시간대에서의 충격파의 전파과정을 도시하였다. 전파가 이루어지면서 압력파의 최대강도는 작아진다. 충격파의 도달시간 및 크기를 조사하기 위해 2개 지점 (A, B)에 압력센서를 두어 충격파를 계산하였다. 전형적인 충격파의 형상으로 불연속에 가까운 충격파 전면(shock front)의 도달 및 지수함수형태의 감소부분이 뒤따른다. 표 1에 엄밀해와 비교한 계산결과를 제시하였다. 좋은 일치를 보여주고 있으나 다소 수치계산값이 작게 예측된다. 3차원 계산도 가능하나 여기서는 다루지 않는다.

표 1. 거리별 충격파의 최대값 및 도달시간 비교

구분	sensor location (non-dimensional)	Analytic [6]	Numerical(mesh sensitivity)		
			I=2000	I=1000	I=500
(Pmax-Pa)/Pa	A (Z=1 m/kg$^{1/3}$)	10.15	9.17	8.72	7.74
	B (Z=1.5 m/kg$^{1/3}$)	4.00	3.19	3.17	2.29

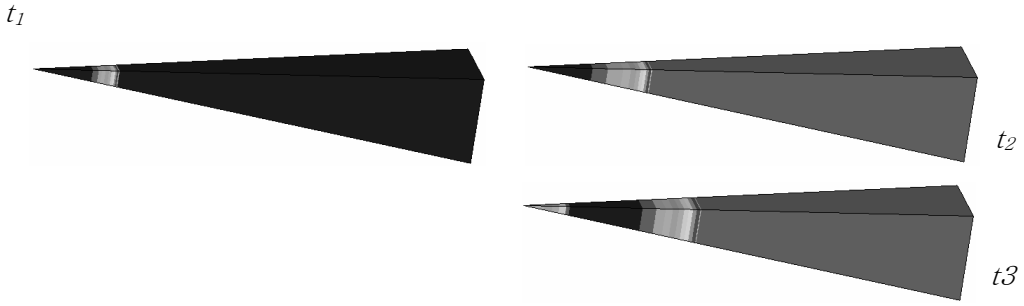

그림 5. 전형적인 충격파 전파과정

4.2 수중폭발 예제

예제로 실험 및 계산 자료가 제시된 문헌 [7]을 활용하였다. 4g Pentolite를 3.05 m의 고압 탱크 (1150 psi=78 기압) 중앙에 설치하였다 (Waigarten et al. 1990). 2개의 압력계를 폭발물로부터 13.97 cm 거리에 설치하여 충격파를 측정하였다. 이 실험은 DTRC에서 이루어졌으며 Sandia Lab의 보고서에 기술되어있다. 문헌에 제시된 충격파 신호를 그림 6에 제시하였다. 보고서에서는 CTH code를 사용하여 실험을 재현해 좋은 결과를 얻었다.

본 예제를 먼저 구형좌표계를 사용한 1차원 수치해석을 수행하였다. CTH에서와 같은 메쉬 시스템을 사용하였다. 즉, 1차원 spherical coordinate를 사용하여 반경방향으로 990개의 동일 간격의 메쉬를 만들고 중앙부분 5개 메쉬에 pentolite를 채웠다. 계산 결과를 그림 3에 제시하였고 유사한 결과가 얻어졌다. 큰 압력의 충격파가 전파된 이후 버블의 형성 및 진동에 의한 버블충격파가 2차적으로 생성되어 전파됨을 잘 보여준다. 실험결과와 차이가 있다면 버블파의 도달시간이 다소 지연이 되는 것이다. 하지만 전체적으로 상당히 유사한 결과가 얻어졌다. 그리고 2~2.5 ms 사이에서 2번째 버블 충격파가 생성됨을 잘 보여준다. 그림 7에 충격파 전파과정을 도시하였다. 일정한 시간이 지난 후 버블충격파가 생성되는 것이 예측되고 있다.

동일한 예제를 3차원 직각좌표계를 사용해 보았다. Eulerian 계산영역은 x, y, z 방향으로 80 x 80 x 80 (512,000개 요소)를 사용하여 각 축 방향으로 200 cm 가지 모델링 하였다. 비등 간격 메쉬를 사용하여 폭발물 주위에 많은 메쉬를 설정하였다. 그림 7에 3차원 계산 결과를 같이 제시하였다. 전반적으로 1차원 계산결과와 유사하나 다소 고주파를 포함하고 있다.

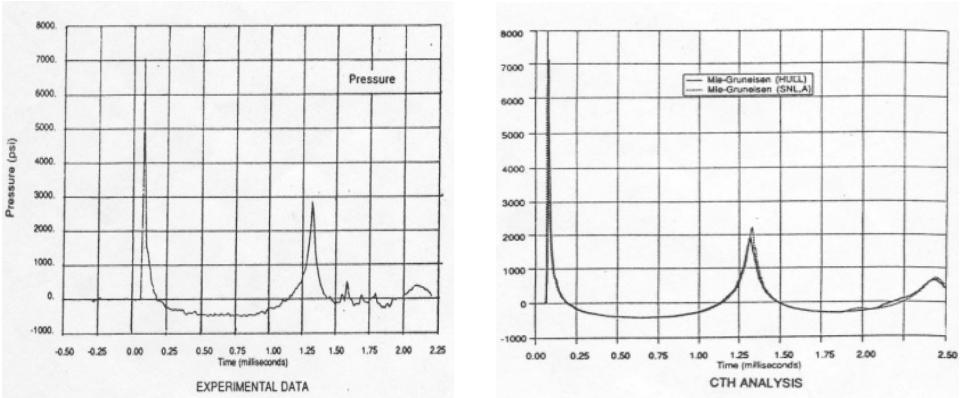

그림 6. 충격파 신호비교, 실험 및 CTH code [7].

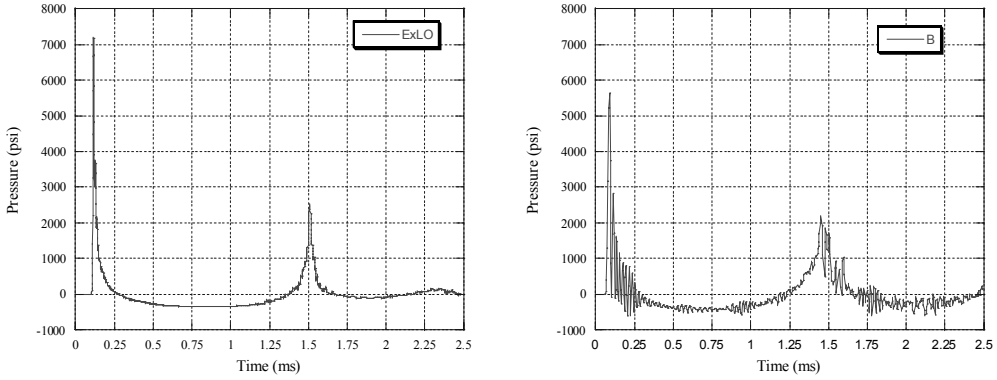

그림 7. ExLO code를 사용한 충격파 전파해석, (a) 1-Dim, (b) 3-Dim.

5. 결론

3차원 유한요소법을 적용하여 Lagrangian/ALE/Eulerian 기법들을 통합한 Hydrocode (ExLO)가 최근에 C/C++ 언어를 사용하여 국내에서는 최초로 본 연구진에 의해 개발되었다. 본 논문에서는 ExLO를 사용하여 극한하중조건중의 대표적인 충돌(impact) 및 폭발(explosion) 시에 발생하는 일련의 과정을 Eulerian solver를 사용하여 해석해 보았다. 현재 가장 우수한 Eulerian code인 인정받아 미국 국립연구소내부에서 사용 중인 CTH의 결과 및 실험과 비교하여 좋은 결과를 얻었다.

추후 기 개발되어 있는 두개의 solver들 즉, Lagrangian solver와 Eulerian solver 간의 상호작용 기능을 구현하면 다양한 극한 하중에서의 시뮬레이션이 가능해진다. 또한 병렬화가 이루어지며 대규모 전산해석 시도가 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위산업청과 국방과학연구소의 지원과제(UD070008AD) 이루어진 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참고문헌

Yoo, YH, Lee, M. (2003) A three-dimensional FE analysis of large deformations in contact- impacts using tetrahedral elements, *Computational Mechanics*, Vol.30(2), pp.96 -105, Jan.

이민형, 정완진 (2006) "3-Dim Simplified ALE Hydrocode 개발 및 Taylor Impact Test," *대한기계학회 논문집*(A), 제30권 제10호, pp.1235-1241.

Chorin, A, Hughes,T. J. R., McCracken, M. F., Marsden, J. E., (1980) Product formulas and numerical algorithms, *Communication of Pure and Applied Mathematics*, vol. 31, pp. 205-256.

Anderson, C. E., Walker, J.D., Bless, S.Y., Partom. Y., (1996) On the L/D effect for long-rod penetrators, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 18(3), pp. 247-264.

Walker. J.D. (1999) "A model for penetration by very low aspect ratio projectiles," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 23, pp. 957-966.

Kinney, G.F., Graham. K.J. (1995) *Explosive Shocks in Air*, 2nd Edition, Springer-Verlag.

Weingarten, LI, Horstemeyer, MF. and Trento, WP. (1990) Modeling Underwater Explosions with an Eulerian Code, *Proceedings of 63rd Shock and Vibration Symposium* pp. 269-277.