

ExLO: 3차원 유체동역학 프로그램의 개발

정완진[#], 이민형²

ExLO: Development of a Three-Dimensional Hydrocode

W. J. Chung, M. H. Lee

Abstract

A unified hydrocode, ExLO, in which Lagrangian, ALE and Eulerian solvers are incorporated into a single framework, has recently been developed in Korea. It is based on the three dimensional explicit finite element method and written in C++. ExLO is mainly designed for the calculation of structural responses to highly transient loading conditions, such as high-speed impacts, high-speed machining, high speed forming and explosions. In this paper the numerical schemes are described. Some improvements of the material interface and advection scheme are included. Details and issues of the momentum advection scheme are provided. In this paper the modeling capability of ExLO has been described for two extreme loading events; high-speed impacts and explosions. Numerical predictions are in good agreement with the existing experimental data. Specific applications of the code are discussed in a separate paper in this journal. Eventually ExLO will be providing an optimum simulation environment to engineering problems including the fluid-structure interaction problems, since it allows regions of a problem to be modeled with Lagrangian, ALE or Eulerian schemes in a single framework.

Key Words : hydrocode, explicit FEM, impact, explosion

1. 서론

고속동적 과도현상의 연구는 실제 구현비용이 대부분 과도하여 시뮬레이션에 상당부분 의존하고 있다. 따라서 이러한 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위한 노력이 경주되어 왔다.(Benson 1992) 고속동적 현상은 고속절삭가공, 고속전단, 폭발성형, 파우더고속성형 등의 산업적 응용뿐 아니라 탄두관통해석, 성형작약탄해석, 폭발충격파 해석 등의 군사적 응용에서도 발생한다. (Weingarten et al. 1992)

2004년부터 Lagrangian, ALE 그리고 Eulerian 해석을 한 프레임에서 구현하기 위한 프로그램(ExLO)의 개발을 시작하였다. 본 논문에서는 ExLO의 간단한 소개와 함께 검증예제를 제시하였다. 충돌예제와 폭

발예제에 대한 해석을 수행하여 실험 및 이론치와 비교검토하여 프로그램의 유효성을 보이고자 한다

2. ExLO 프로그램의 개요

ExLO는 삼차원 외연적 동적거동 해석프로그램으로 유한요소법을 기반으로 개발되었다. Splitting법을 사용하여 Lagrangian, ALE 그리고 Eulerian 기법을 하나의 프레임에서 구현하였다. 이러한 구조는 여러 개의 프로그램을 연결하여 수행하여야 하는 경우에 한 프로그램 내에서 해석이 가능하게 한다. 현재, 프로그램은 8 절점의 입방체 요소를 사용하고 있으며 재료모델은 Von-Mises 탄소성 모델, Johnson-Cook 모델 등을 사용할 수 있다. 상태방정식으로 폭발현상을 모델링하기 위한 Jones-

1. 세종대학교 기계공학과

교신저자: 서울산업대학교 금형설계학과

wjchung@snut.ac.kr

Wilkins-Lee (JWL), 이상기체 그리고 Mie-Grünisen 모델이 있다. 한 요소 내에 다중물질이 포함될 수 있으며 다중물질 간의 경계 구성기법으로는 구분적 일정법(Annois 1999) 와 구분적 선형법(Youngs 1987) 를 사용하였다. 질량과 내부에너지 등의 요소중심에서 표현되는 물리량에 대해서는 1 차적인 역이류 기법이 사용되었다. 분산을 감소시키기 위하여 2 차적인 기법도 프로그램에 포함되었다. (Youngs 1982, van Leer 1977). 절점 물리량의 이류는 SALE 알고리즘 (Benson 1990)을 기반으로 수정된 방법을 사용하였다. 하나의 셀에 같이 속한 다중물질 사이의 상호작용을 모델링하기 위하여 혼합이론(mixture theories)가 사용되며 동일변형율모델 (equal strain rate model)과 선형평형압력모델 (linearized pressure equilibrium model)을 사용하였다.

3. 검증 예제

3.1 텅스텐 봉의 두꺼운 강구조물 관통해석

초기속도가 1000, 1500 그리고 2000 m/s 이고 형상비(L/D)가 5 인 텅스텐 봉이 4030 강 구조물을 관통하는 현상을 해석하였다. Von-Mises 모델이 재료거동에 사용되었다.

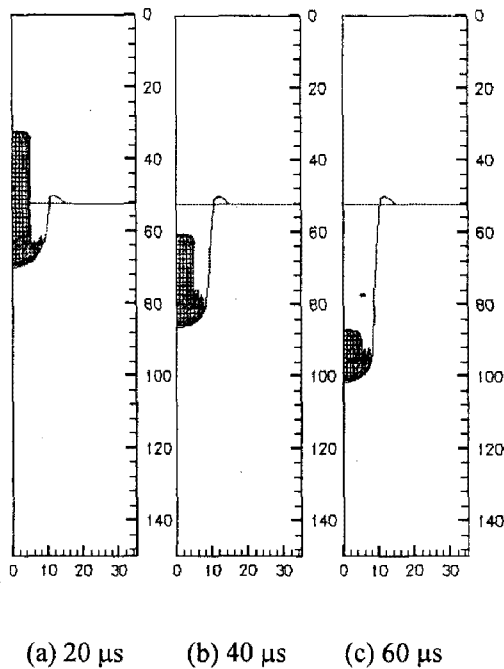


Fig. 1 Shapes of a tungsten rod penetrating a thick steel target, impact velocity 1500 m/s .

해석 과정에서 $120 \times 35 \times 35$ 메쉬가 사용되었다. 초기속도가 1500 m/s 일 때 시간에 따른 변형을 Fig. 1 에 나타내었다. 해석결과의 정확성을 검증하기 위하여 최종관통 깊이를 Fig. 2 에서 실험결과와 비교하였다. (Anderson et al. 1996)

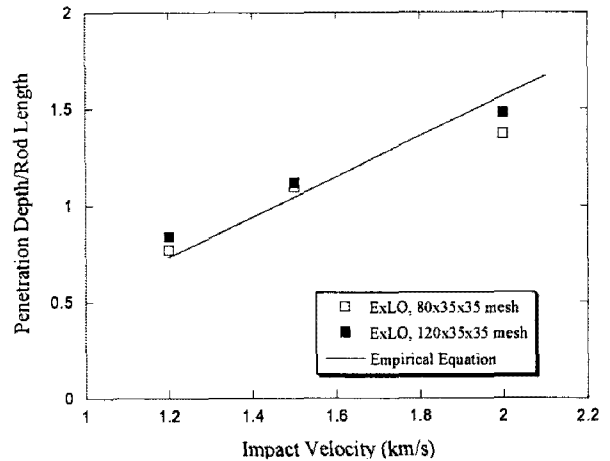


Fig. 2 Penetration depth (P/L) comparisons for $L/D = 5$ rod.

3.2 공기 중의 TNT 폭발해석

상태방정식과 에너지방정식은 동시에 연립되며 정수압과 에너지를 계산한다. TNT 의 폭발현상은 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 상태방정식으로 고려되었다. 공기는 JWL 상태방정식의 특수한 경우로 고려되었다. 이 문제에서 TNT 는 중심에 위치하며 공기는 그 주변을 둘러싸고 있는 것으로 모델링하였다. 이 문제의 이론적 해가 존재하며 이와 비교하기 위하여 Fig. 3 과 같이 메쉬를 모델링하였다. 육면체 요소를 사용하였으며 반경 100m 까지 총 2,000 개의 요소를 사용하였다. 중앙에 있는 9,080 kg 의 TNT 가 폭발한 후 공기를 밀어내며 전진하게 된다. 시간이 지남에 따라 TNT 와 공기의 접촉면보다 충격파가 빨리 전진하여 공기 중에서 전파해 나가게 된다. 특정한 2 개의 지점에서 최대압력과 최대압력 발생시간을 각각 측정하여 이론적 해 (Kinney and Graham 1985)와 비교하였다. Fig.4 는 시뮬레이션에 의한 압력-시간 곡선을 나타낸다. A 지점에서 최대 압력은 이론 값이 11.15 기압인데 시뮬레이션 값이 10.17 기압이다. 또한 최대압력의 도달시간은 이론에서 10.31msec, 시뮬레이션에서 11.70msec 이다.

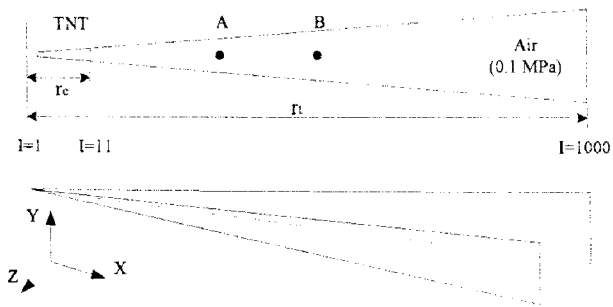


Fig. 3 One dimensional model setup (spherical coordinate) using a three dimensional code.

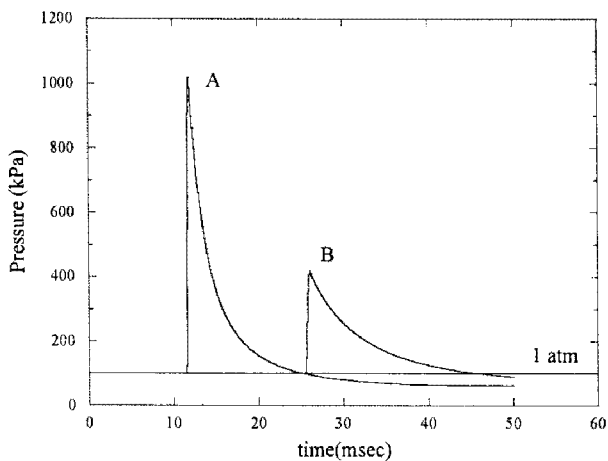
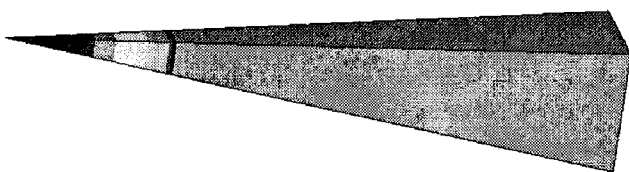


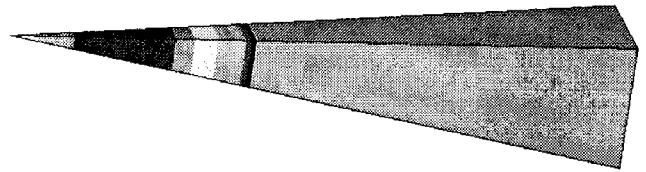
Fig. 4 Pressure signatures calculated at two different locations.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Typical pressure contours from air shock, (a) 10 msec, (b) 20 msec, and (c) 40 msec.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원(UD070008AD)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Anninos, P., 1999, "New VOF Interface Capturing and Reconstruction Algorithm," Lawrence Livermore National Lab., UCRL-ID-135084.

Benson, D.J., 1992, "Momentum Advection on a Staggered Mesh," *J. Comp. Phys.*, Vol. 100, pp. 143-162.

Benson, D.J., 1992, "Computational Methods in Lagrangian and Eulerian Hydrocodes," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 99, pp. 235-395.

Bjerke, T.W., Zukas, J.A. and Kimsey, K.D., 1992, "Penetration Performance of Disk Shaped Penetrators," *Int. J. Impact Engrg.*, Vol. 12, No. 2, pp. 263-280.

Dobratz, B.M., 1981, LLNL Explosive Handbook, UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. USA.

Franzen, R.R., Walker, J.D., Orphal, D.L. and Anderson, C.E., 1994, "An Upper Limit for the Penetration Performance of Segmented Rods with Segment-L/D<1," *Int. J. Impact Engrg.*, Vol. 15, No. 5, pp 661-668.

Kinney, G.F. and Graham, K.J., 1985, Explosive Shocks in Air, 2nd Edition, Springer-Verlag.

Littlefield, D.L., 2001, "Effect of Alignment on the Penetration of Segmented Rods," *Int. J. Impact Engrg.*, Vol. 26, pp. 421-431.