

3차원 FEM 다중물질 하이드로코드 개발 현황

Development of 3-Dim FEM Multi-Material Hydrocode

이민형*

Lee, Min-Hyung

ABSTRACT

Hydrocodes are large computer programs that can be used to solve a wide variety of highly transient problems such as high-speed impact and explosion events. This paper describes the recent activity to develop a Multi-material hydrocode in Korea. The code consists of two stages; Lagrangian, and remap stages. Although a sophisticated contact algorithm has been developed for Lagrangian calculations, a relatively simple mechanics at the interfaces of materials are used in the multi-material Eulerian code. Volume of fluid interface reconstruction methods are used to resolve the interfaces between different materials. For the advection stage of the cell centered properties, one-dimensional hyperbolic equation is used. Test problems demonstrated here are the high-speed impact/penetration and explosion problems.

주요기술용어(주제어) : Hydrocode(하이드로코드), Multi-material(다중물질), Contact(접촉), High-Speed Impact(고속 충돌), Explosion(폭발)

1. 머리말

초고속충돌, 대기 및 수중폭발 등에서 야기되는 비정상, 대변형 문제를 해석하기 위하여 40년대 후반부터 hydrocode 전산기법들이 연구되어 왔다¹⁾. 지배방정식의 형식에 따라 Lagrangian, ALE 및 Lagrangian 코드들로 개발되었다. Lagrangian 코드가 유효한 문제가 있는 반면 대변형 시 자유표면의 생성이 자연스럽게 이루어지며 메쉬의 변형에 의한 제약이 발생하는 문제에서는 Eulerian 및 ALE 코드들이 더욱 효율적일 수 있다. 다중물질 Eulerian 코드는 물질이

메쉬 경계면을 따라 이동하기 때문에 각각의 메쉬에 존재하는 물질들의 구성 및 상태를 추적하는 계산이 요구된다. 본 논문에서는 외국에서 개발된 코드 소개와 현재 국내의 코드 개발 연구현황 및 기능을 기술한다.

2. 국내외 개발 현황

미국 국립연구소에서의 코드 개발역사는 약 60여년이 되고 많은 코드들이 세상에 알려졌지만 활용성이 높은 것은 일부분이다. 1940년대 Manhattan project에서 하중에 대한 변형 그리고 high explosive implosion system에 대해 Lagrangian 비정상해석이 적용되었다. Eulerian 코드는 Los Alamos에서

† 2008년 9월 1일 접수~2008년 10월 10일 게재승인

* 세종대학교(Sejong University)

주저자 이메일 : mlee@sejong.ac.kr

particle-in-cell(PIC) 기법을 적용한 것이 1957에 처음 발표되었다^[2]. 1960년대 후반부터 70년대 초반에 computational shock physics가 발전하여 Wilkins와 Herrmann등이 1차원 Lagrangian 코드를 개발하였다. 비슷한 시기에 Johnson 등이 현대의 코드와 유사한 일차원 Eulerian 코드를 개발하였으며 빠르게 2차원으로 확장되었다. 그림 1에 Eulerian 코드의 family-tree를 나타내었다^[3]. 초기에는 Walsh, Johnson과 Hegeman, Thompson과 McGlaun 등의 적은 수의 연구자들 일로부터 출발하였다고 볼 수 있다. 이러한 코드들은 Los Alamos, LLNL, Sandia 등에서 JOY, MESA, CTH로 발전하였고 현재는 CTH만이 발전해오고 있다^[4].

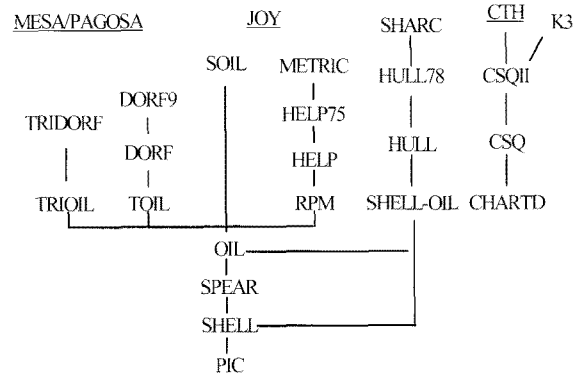
그림 2에 Lagrangian 코드의 family-tree를 나타내었다. 마찬가지로 초기에 몇 명의 연구자인 Wilkins, Halquist, G. Johnson, Herrmann, Swegle and Kipp 등에 의해 발전이 시작되었다. 현재는 ALE3D 및 ALEGRA등으로 이어지고 있으며 이들은 ALE 유한요소법을 채택하고 있다. 특히 ALEGRA는 MM-ALE 코드 형태로 개발되어 Lagrangian, ALE 및 Eulerian 코드가 통합되어 있으며 adaptive mesh 시스템이 최근에 구현되었다^[5].

또한 코드간의 연계가 이루어져 강체탄두의 변형타겟 침투해석(Deep Penetration) 예측이 보다 정확성을 기할 수 있게 되었다. 수치해석 방법론적으로 강체탄두는 Lagrangian으로 그리고 변형타겟은 Eulerian으로 모델링하며 그 경계에서는 coupling 기법을 사용한다. CTH가 EPIC 또는 PRONTO와 연계되어 이러한 해석을 수행한다. 또한 PCTH 병렬코드로 개발이 진행되었다.

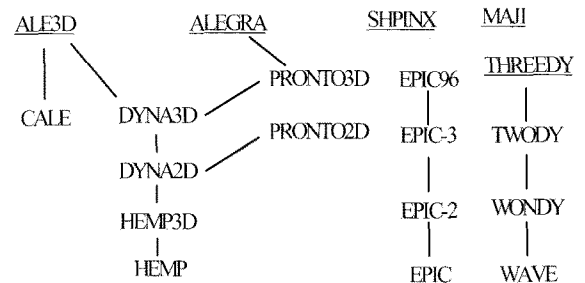
국내에서는 약 10여년전부터 Lagrangian 코드 연구를 진행하였다. 초기에는 PRONTO2D에 기반을 두고 NET2D Lagrangian 코드를 개발하였고, 추후 NET3D 3차원으로 확장하였다^[6]. NET3D의 가장 큰 특징은 세라믹과 같은 취성재료의 파괴해석을 위한 cohesive-fracture model의 구현을 “node separation scheme” 수치기법으로 적용한 것이다. 단점으로는 절점 분리에 따른 절점 수의 증대로 계산시간이 과도하다는 것이다. 현재 병렬화 연구가 진행 중이다.

2004부터 Eulerian 코드 연구가 국내에서도 시작되

었다. IPSAP/Explicit가 단일 물질 처리만 가능한 형태로 개발되었다^[7]. 또한 다중물질 처리가 가능하며 유한요소법에 기초한 3차원 ExLO 코드가 개발되었고 지속적으로 발전중이다^[8]. 아래 단원에는 ExLO 코드에 적용된 기법과 몇 가지 계산 예제를 다루었다.



[그림 1] Eulerian code family-tree^[3]



[그림 2] Lagrangian code family-tree^[3]

3. ExLO 국내 개발 적용 기술

가. 코드 구조

CFD 코드에서는 단일 스텝으로 해를 구해나가는 방식이 보편적이거나 고체역학에 근거를 둔 연구그룹들은 다중물질 문제는 대부분 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 해를 대류항과 소

스항을 지닌 지배방정식이 2개의 식으로 나누어 푸는 방식으로 개발이 되어있다.

해는 매 시간스텝마다 각각의 단계가 처리되면서 전진하게 된다. 단계 1에서는 Lagrangian 계산을 수행하는데 이는 순수 Lagrangian Solver 계산과 동일하다, 이후 메쉬 이동된 절점의 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. 다차원 물질 이류 계산과정은 일차원 이류 방정식을 각각의 축 방향으로 순차적으로 적용하는 공간적 연산자분리 방식으로 적용하는데 이는 프로그램 개발 시에 단순함을 유지하는 방식이므로 여기서 채택하였다.

3차원 직각좌표계를 사용하고 있으며 1차원 구형좌표계 및 2차원 축대칭좌표계도 설정이 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.

나. Lagrangian 모듈

8 절점을 사용한 육면체 요소를 사용하고 있다. 인공점성 및 hourglass 모드 조절 기능을 가진다. 재료 방정식은 von-Mises, Elastic, Johnson-Cook 모델, 및 유체를 위한 null 모델 등이 존재한다. 상태방정식에는 이상기체, JWL, 및 Mie-Grunisen 방정식 등이 구현되어 있다. 요소소진(Erosion) 및 contact 기능은 추가 구현이 요구된다.

다. Remesh 모듈

Lagrangian 계산이후 절점들을 이동시키는 모듈이며 이는 사용자가 문제의 특성에 따라 다른 선택을 한

다. 현재 가장 대표적인 Equi-potential smoothing 및 equal-x 기능만이 구현되어 있다. 또한 초기 메쉬 시스템으로 복원하게 되면 이것은 순수 Eulerian 계산이 된다.

라. Remap 모듈

절점 이동에 따른 물성들의 매핑이 이루어지는 과정이다. 체적 이류는 절점들의 좌표를 사용하면 쉽게 구한다. 물질간의 경계추적은 Modified SLIC으로 구현되어 있으며 Youngs' 기법^[9]은 테스트중이다. 물성 이류는 van Leer 기법^[10]을 사용하였고 운동량 이류는 SALE 기법을 채택하고 있다.

마. 다중물질 처리

Mixture Theory를 구현하여 보이드(Void)를 포함한 다중물질 처리가 가능하다. "Equal strain rate" 및 "Pressure equilibrium" 2가지 모델이 구현되어있다. 각각의 장단점이 있으며 특히 임피던스(Impedance) 차이가 매우 큰 경우 압력평형이론을 적용한다.

4. 계산 예제

가. High-Speed Impact

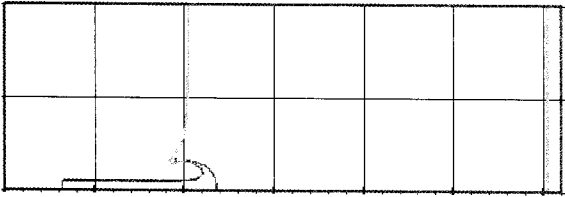
본 단원에서는 고체물체의 고속 충돌/침투문제를 다룬다. ExLO 코드를 이용한 수치해석 결과를 실험값 및 경험식과 비교 검증하여 정확도를 확인한다. 특히 Eulerian 해석을 수행하였다.

1) 2-Dim Plain Strain Simulation

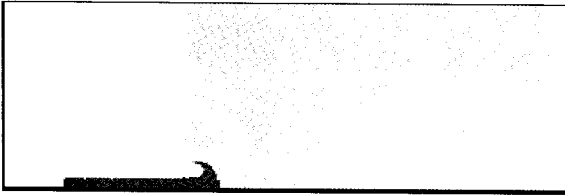
첫 번째 충돌예제는 긴 관통자의 무한타겟 침투해석이다. 2차원 plain strain 시뮬레이션을 수행하였다. 텅스텐 탄자가 스틸 타겟을 충돌속도 1.5km/s로 침투하는 과정을 그림 3에 나타내었다. 코드 정확도를 확인하기 위해 상용코드 AUTODYN과 비교하였으며 매우 유사한 결과가 얻어진다.

2) 2-Dim Axi-symmetric Simulation

다음은 보다 실질적인 L/D=5(길이 대 지름의 비) 텅스텐 long-rod가 4030 steel 무한타겟에 침투하는

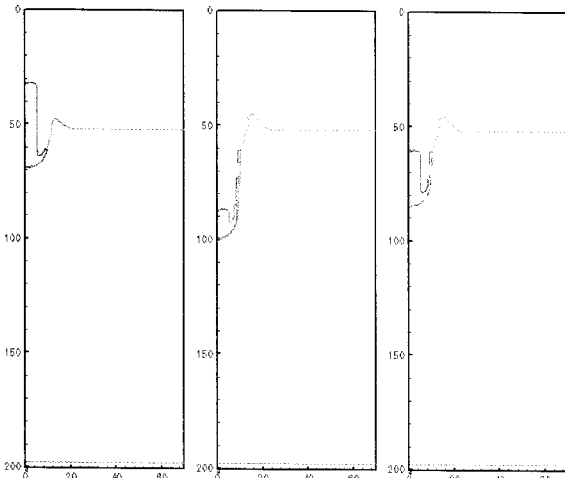
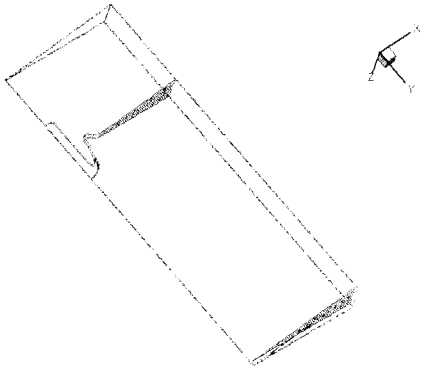


(a) ExLO, 2-Dim Plain Strain



(a) AUTODYN, 2-Dim Plain Strain

[그림 3] Long-body deep penetration 비교



[그림 4] Long-rod 침투과정, 2차원 축대칭 계산

예제를 다루었다. 충돌속도는 1000, 1500 및 2000m/s 이다. 수직 충돌만 고려하였기 때문에 2차원 축대칭 계산이 가능하다. 3차원 코드를 사용한 축대칭 계산 도메인은 그림 4에서와 같이 wedge plane을 설정하였다. 타겟 깊이방향 계산 영역은 봉의 길이의 3배로 옆면으로는 봉의 반지름의 14배의 크기로 하였다. 축대칭 계산에 사용된 메쉬 시스템은 200×70=14,000. 예측된 침투과정들을 그림 4에 제시하였다. 대체로 일반적인 무한타겟 침투현상들이 잘 예측되고 있음을 보여준다. 계산의 정확도 확인은 다음 장에서 비교하였다.

3) 3-Dim Simulation

앞에서의 축대칭 계산 예제와 동일한 문제로 설정하였다. 3차원 타겟의 계산영역은 1/4 영역으로 설정 가능하다. 타겟 깊이방향 계산 영역은 봉 길이의 3배 정도로, 옆면으로는 봉 반지름의 10배의 크기로 하였다. 메쉬 민감도 조사 이후 최종 계산에 사용된 메쉬 시스템은 120×35×35=147,000. 시간에 따른 예측된 침투과정을 그림 5에 제시하였다. 일반적인 현상이 잘 예측되고 있음을 보여준다. 계산의 정확도 확인을 위하여 최종 침투 깊이(P : Penetration Depth)를 문헌에서 제시되는 다음과 같은 경험식^[11]과 비교하여 보았다.

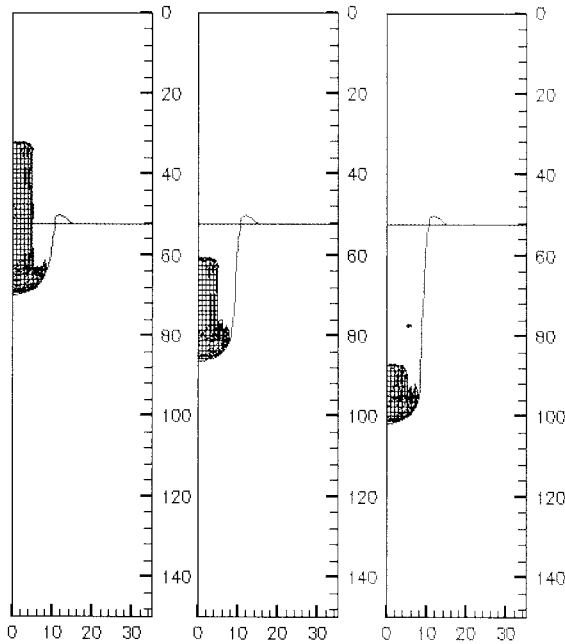
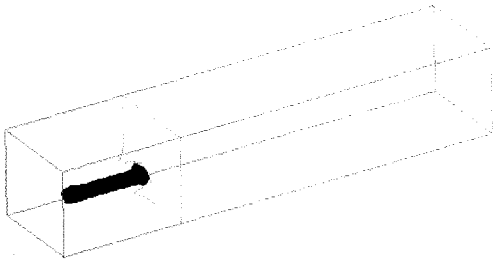
$$\frac{P}{L} = -0.209 + 1.044 \left(\frac{U}{U_o} \right) - 0.194 \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1)$$

for, $1.2 < U/U_o < 1.8$,
and $5 < L/D < 30$.

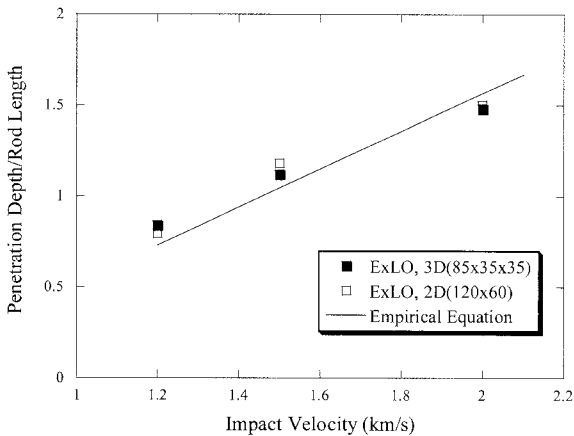
여기서, $U_o=1.0\text{km/s}$. 비교 결과를 그림 6에 제시하였는데 ExLO 예측이 경험식과 잘 일치함을 보여준다.

나. Explosion

본 단원에서는 대기폭발과 수중폭발 두 가지 예제를 다루었다. ExLO 코드를 이용한 수치해석 결과를 엄밀해 또는 실험값과 비교 검증하여 정확도를 확인하였다. 공기는 이상기체, 물은 Mie-Gruneisen 그리고 TNT는 JWL 상태방정식을 적용하였다.



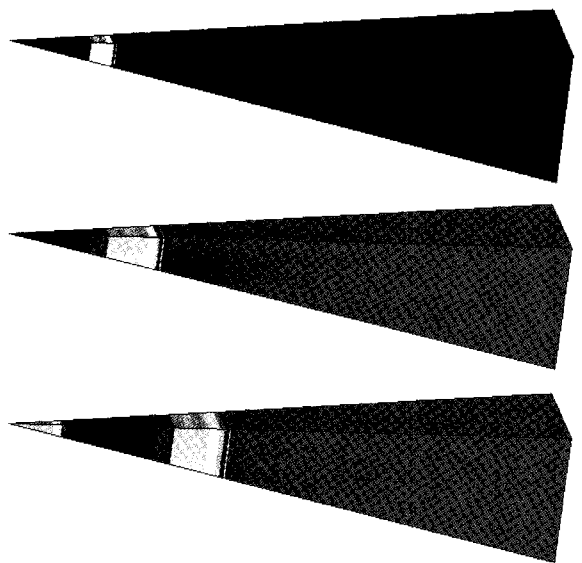
[그림 5] Long-rod 침투과정, 3차원 계산



[그림 6] Long-rod 3차원 계산

1) Air-Blast Simulation

무한영역(Free-field) 계산을 일차원 구형좌표계(Spherical Coordinate) 모델로 설정하였다. 반경반향으로 육면체를 모델링 하였는데 옆면은 일정한 크기의 경사각을 지니는 wedge가 된다. 웨지 중앙에 TNT를 나머지 영역은 공기를 채운다. 매쉬 민감도를 조사하기 위하여 요소 수를 500, 1000 및 2000개를 반경 100m 영역에 형성하였다. $I_{max}=500$ 개인 경우 9,080 kg의 TNT를 중앙부분 요소 5개로 모델링 하였고, $I_{max}=1000, 2000$ 인 경우 각각 10개 요소 및 20개 요소로 모델링 하였다. 그림 7에 여러 시간대에서의 충격파의 전파과정을 도시하였다. 전파가 이루어지면서 압력파의 최대강도는 작아진다. 대기 중 무한영역에서의 폭발에 의한 거리별 충격파의 크기 및 도달시간에 대한 엄밀해가 알려져 있다. 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 엄밀해^[12]와 비교한 계산결과를 제시하였다. 좋은 일치율을 보여주고 있으나 다소 수치계산값이 작게 예측된다. 3차원 계산도 가능하나 여기서는 다루지 않는다.



[그림 7] Typical blast wave propagation

[표 1] 거리별 충격파의 최대값 및 도달시간 비교

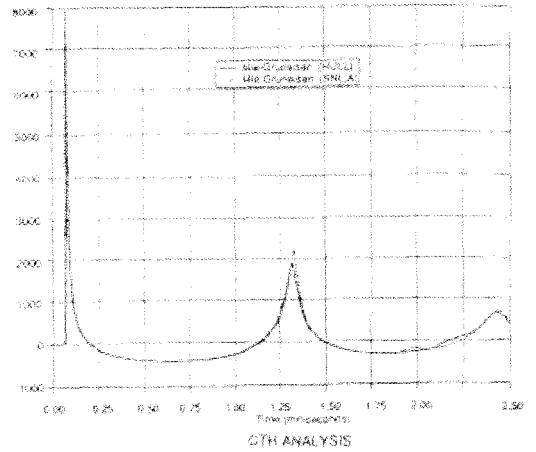
구분	센서위치 (무차원변수)	Analytic [12]	Numerical (mesh sensitivity)		
			l=2000	l=1000	l=500
$(P_{max}-Pa)$ /Pa	A ($Z=1m/kg^{1.3}$)	10.15	9.17	8.72	7.74
	B ($Z=1.5m/kg^{1.3}$)	4.00	3.19	3.17	2.29
t_a (msec)	A	10.31	11.70	11.90	12.10
	B	22.65	22.65	25.95	26.40

2) Underwater Explosion Simulation

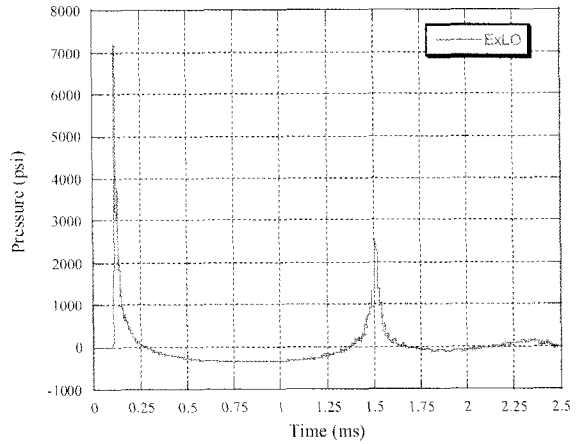
예제로 실험 및 계산 자료가 제시된 문헌^[13]을 활용하였다. 4g Pentolite를 3.05m의 고압 탱크(1150 psi=78 기압) 중앙에 설치하였다. 2개의 압력계를 폭발물로부터 13.97cm 거리에 설치하여 충격파를 측정하였다. 이 실험은 DTRC에서 이루어졌으며 Sandia Lab의 보고서에 기술되어있다. 문헌에 제시된 충격파 신호를 그림 8에 제시하였다. 보고서에서는 CTH 코드를 사용하여 실험과 유사한 결과를 얻었다.

본 예제를 먼저 구형좌표계를 사용한 1차원 수치해석을 수행하였다. CTH에서와 같은 메쉬 시스템을 사용하였다. 즉, 1차원 구형좌표계를 사용하여 반경방향으로 990개의 동일 간격의 메쉬를 만들고 중앙부분 5개 메쉬에 pentolite를 채웠다. ExLO를 사용한 일차

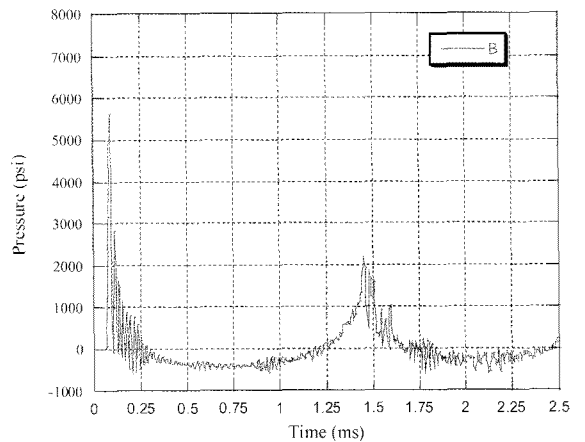
[CTH]



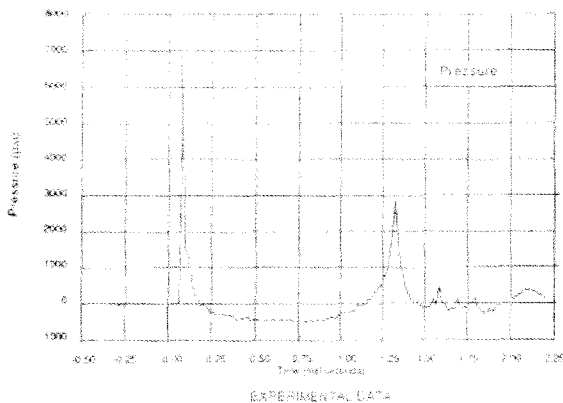
[ExLO 1-Dim]



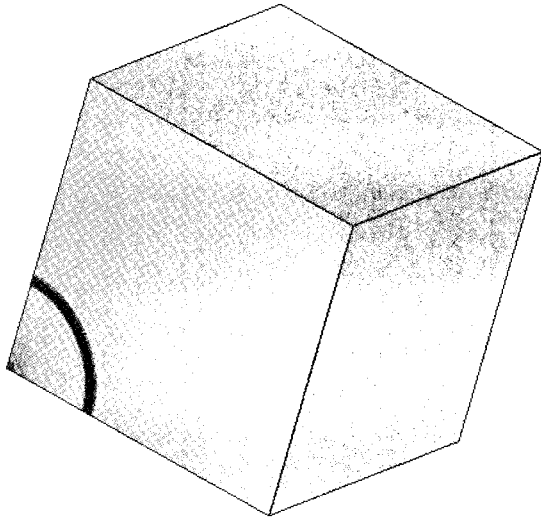
[ExLO 3-Dim]



[실험값]



[그림 8] 수중폭발 충격파 신호비교



[그림 9] 수중폭발 충격파, 3차원 1/4 모델

원 및 3차원 계산 결과를 그림 8에 비교하여 제시하였는데 매우 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. 2~2.5ms 사이에서 2번째 버블 충격파가 생성됨을 잘 보여준다. 그림 9에 3차원 계산예제를 도시하였다.

5. 맺음말

미국에서 40년대 후반부터 개발을 시작한 하이드로코드가 현재 몇 개의 코드로 발전하여왔다. 국내에서는 10여 년 전부터 Lagrangian 코드가 그리고 약 4년 전부터 Eulerian 및 ALE 코드가 개발되어왔다. 미국에서는 많은 코드들이 여러 연구 그룹에 의해 이루어졌으나 국내에서는 여건상 적은 연구 그룹에 의해 이루어지므로 시행착오의 최소화가 극히 요구된다.

특화된 하이드로코드의 특징상 그리고 적용상 미래의 다양한 변화에 대비하기 위하여 국내에서의 적은 노력이나마 연구자들에 의해 이어지기를 바란다.

후 기

이 논문은 2007년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문임

참 고 문 헌

- [1] Anderson C. E., "An Overview of the Theory of Hydrocodes", Int. J. of Impact Eng. Vol. 5, pp. 33~59, 1987.
- [2] Evans M. E. and Harlow F. H., "The Particle-in-Cell Method for Hydrodynamic Calculations", Los Alamos Scientific Laboratory, LA-2139, 1957.
- [3] Hertel E. S., "A Survey of Numerical Methods for Shock Physics Applications", Int. Workshop on New Models and Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media, Sep. 15~19, Oxford, England, 1997.
- [4] McGlaun J. M., Thompson S. L. and Elrick M. G., "CTH : A Three-Dimensional Shock Wave Physics Code", Int. J. Impact Eng. Vol. 10, pp. 351~360, 1990.
- [5] Summers R. M., Peery J. S., Wong M. W., Hertel E. S., Trucano T. G. and Chhabildas L. C., "Recent Progress in ALEGRA Development and Application to Ballistic Impacts", Int. J. Impact Eng. Vol. 20, pp. 779~788, 1997.
- [6] Yoo Y. H. and Lee M., "A Three-Dimensional FE Analysis of Large Deformations for Impact Loadings using Tetrahedral Elements", Computational Mechanics. Vol. 30, pp. 96~105, 2003.
- [7] Paik S. H., Moon J. J., Kim S. J. and Lee M., "Parallel Performance of Large Scale Impact Simulations on Linux Cluster Super Computer", Computers and Structures. Vol. 84, pp. 732~741, 2006.
- [8] Lee M., Chung W. J., Kim H. J. and Kim H.

- W., "ExLO : A Three-Dimensional Total Shock Physics Code", submitted, J. of Mechanical Science and Technology, 2008.
- [9] Youngs D. L., "Time Dependent Multi-material Flow with Large Fluid Distortion", Numerical Methods for Fluid Dynamics, edited by K.W. Morton and M.J Baines, Academic Press, 1982.
- [10] Van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, IV. A New Approach to Numerical Convection", J. Comp. Phys. Vol. 23, pp. 276~299, 1977.
- [11] Anderson C. E., Walker J. D., Bless S. J., Partom Y., "On the L/D Effect for Long-Rod Penetrators", Int. J. Impact Eng. Vol. 18, pp. 247~264, 1996.
- [12] Kinney G. F., Graham K. J., Explosive Shocks in Air, 2nd Edition, Springer-Verlag, 1995.
- [13] Weingarten L. I., Horstemeyer M. F. and Trento W. P., "Modeling Underwater Explosions with an Eulerian Code", Proceedings of 63rd Shock and Vibration Symposium pp. 269~277, 1990.