

Hydrocode를 이용한 수중폭발 충격응답 해석

o 이 상갑*, 박 중규*, 권 정일*, 정 성민*

Shock response analysis to underwater explosion using Hydrocode

Lee Sang-Gab*, Park Chung-Kyu*, Kweon Jung-Il*, Jeong Sung-Min*

ABSTARCT

In recent years, the structural shock response to underwater explosion has been studied as much, or more, through numerical simulations than through testing for several reasons. Very high costs and sensitive environmental concerns have kept destructive underwater explosion testing to a minimum. Increase of simulation capabilities and sophisticated simulation tools has made numerical simulations more efficient analysis methods as well as more reliable testing aids.

For the simulation of underwater explosions against surface ships or submerged structures one has to include the effects of the explosive shock wave, the motion of the gaseous reactive products, the local cavitation collapse, the different nonlinear structural properties and the complex fluid-structure interaction phenomena. In this study, as benchmark step for the validation of hydrocode LS/DYNA3D and of technology of fluid-structure interaction problems, two kinds of cavitation problems are analyzed and structural shock response of floating ship model are compared with experimental result.

1. 서론

함정의 생존성(survivability) 확보 측면에서 예상되는 적의 수중폭발 공격에 대한 대상함의 취약성(vulnerability) 평가는 함정 설계 시 고려되어야 할 가장 중요한 사항중의 하나이다. 실선충격시험을 수행하기 위해서는 막대한 비용이 소요되며 시험 특성상 재시험이 거의 불가능하고 환경영향의 최소화를 위한 과도한 과외비용 지출 등의 많은 현실적 어려움이 있다. 이러한 실선충격시험의 보조자로서, 나아가서는 실선충격시험을 대체할 수 있을 정도로 정확한 충격응답 수치 시뮬레이션 MSC/DYTRAN[1] 또는 LS/DYNA3D[2] 등을 이용하여 유체-구조 연성문제를 3차원으로 시뮬레이션하는 추세에 있다.

수중 폭발의 영향을 받는 자유 수면 하 임의 지점에서의 압력-시간 이력은 자유 수면을 반사한 인장 충격파가 직접 입사파와 중첩되는 시점부터 급격히 감소한다. 이 때 자유 수면 하에서는 그 위치에 따라 압력이

음이 되어 공동 현상이 일어나는 영역이 존재하며, 그 영역이 상당히 크므로 이 현상을 광역 케비테이션(bulk cavitation) 현상이라고 한다. 광역 케비테이션 현상은 충격파에 의한 선박과 같은 구조물에서의 초기 전체 거동을 파악하기 위한 중요한 물리적 현상이다.

또 하나의 케비테이션으로는 수중 폭발로 인한 압력 펄스가 선체 외판과 같이 유연성을 지닌 구조물의 표면에 작용할 때 외판과 유체간의 상호작용으로 판에 작용하는 전체 압력은 절대 압력보다 작은 케비테이션 압력까지 내려가고 이로 인해 압력이 작용하는 판의 전면에 국부 케비테이션(local cavitation)이 발생하게 되고, 선박과 같은 유연성을 갖는 선체 구조물은 이러한 영향을 크게 받게된다.

본 연구에서는 LS/DYNA3D를 사용하여 수중폭발 충격응답해석에 대한 code의 검증과 정확한 해석 기술의 축적을 위하여, 기존의 해석해와 시뮬레이션의 결과가 있는 케비테이션에 대한 충격응답해석을 수행하고 수상선 모형선의 3차원 충격응답해석을 수행하여 충격파에 의한 수상선의 충격응답 및 충격손상의 추정에 관한 실험 결과들과 비교 검토하고자 한다.

* 한국해양대학교 해양시스템공학부

2. 1차원 광역 캐비테이션 구조 해석

Fig. 1과 같은 Bleich-Sandler의 판 모델은 흔히 광역 캐비테이션 1차원의 수학적 모델의 검증에 사용되어 왔고[3,4], USA code를 사용하여 수학적 모델의 해석과 같은 결과를 유도하고자 시도된 바 있다[5]. 본 연구에서는 LS/DYNA3D code를 사용하여 USA code의 결과와 비교 검토함으로써 검증을 하고자 한다.

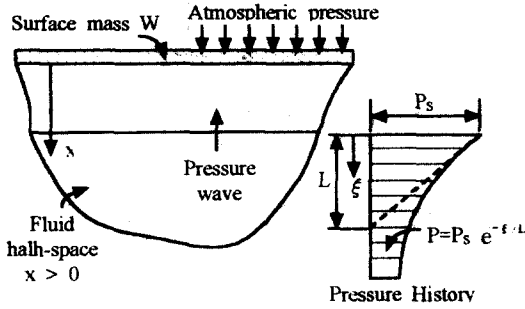


Fig. 1 Bleich-Sandler plate problem

시뮬레이션에 사용된 요소는 폭발로 인해 발생하는 충격파의 영향을 고려하기 위해서 Acoustic 요소를 사용하였으며 캐비테이션으로 인한 유체-구조물간의 상호작용을 직접 해석하기 위하여 Fig. 2와 같이 측정 거리보다도 10배 가량 늘려서 사용하였다.

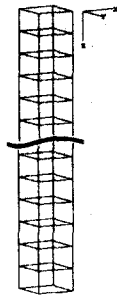


Fig. 2 Finite element mesh configuration of one dimensional plate problem

시뮬레이션을 위한 판과 유체의 물성치는 각각 Table 1과 2와 같이 주어져 있으며 폭발에 기인한 순간 압력파의 특성은 Table 3과 같다.

Table 1 Plate characteristics

Thickness	1 in
Dimensions	1.5 in × 1.5 in
Modulus of elasticity	30.0E06 psi
Poisson's ratio (ν)	0.3
Mass Density (γ_0)	5.32986E-4 lb/in ³

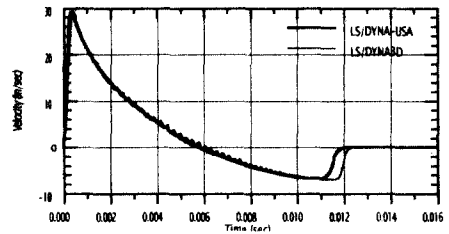
Table 2 Fluid characteristics

Fluid depth	1500.0 in
Dimensions	1.5 in × 1.5 in × 1.5 in
Number of element	1000 Solid elmt. (8 node)
Sound speed in liquid (C_1)	5.712E+4 in/sec
Sound Speed in cavitated region (C_2)	0
Mass Density (γ_0)	9.3455E-5 lb s ² /in ³

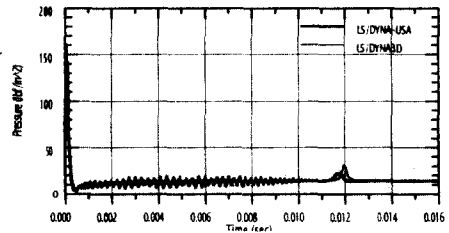
Table 3 Incident pressure characteristics

Peak pressure	103 psi
Decay time	9.958E-4 sec
Charge depth	1.0E7 in (on the center of the plate)
Atmospheric pressure	14.7 psi
Gravity	32.2 ft/sec ²
Cavitation pressure	0

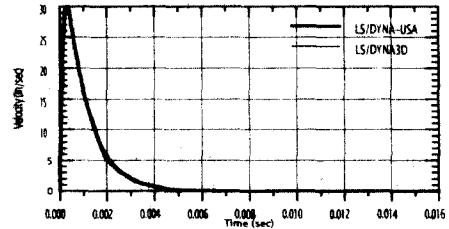
Fig. 3(a) 및 (b)는 캐비테이션을 고려한 경우, Fig. 3(c) 및 (d)는 캐비테이션을 고려하지 않는 경우 판의 수직 속도와 압력의 이력을 USA code와 비교하여 보여 주고 있으며, 압력이력은 본 해석결과가 더 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 4는 각 위치에서의 폭발로 인한 충격 반사파가 수면에 있는 판에 도달한 후 캐비테이션이 열리고 일정 시간 후 닫히면서 발생한 공동 폐쇄 압력 형태가 잘 나타나고 있고 USA code의 결과와도 대체로 잘 일치하고 있다.



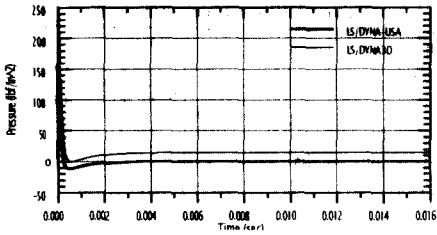
(a) Vertical velocity (cavitation on)



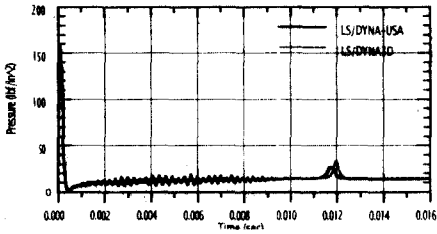
(b) Pressure (cavitation on)



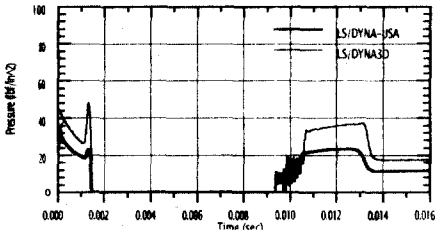
(c) Vertical velocity (cavitation off)



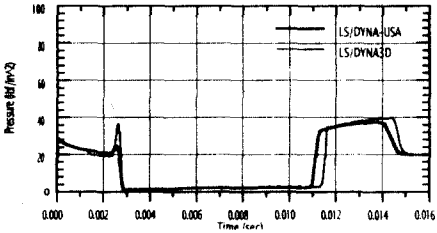
(d) Pressure (cavitation off)
Fig. 3 Plate velocity/pressure



(a) Depth = 3'



(b) Depth = 75'



(c) Depth = 150'

Fig. 4 Fluid pressure at 3', 75', 150'

3. 근접 수중폭발 하중을 받는 수중 실린더형 셸의 충격응답

근접 수중폭발 하중을 받는 실린더 셸 구조물의 소성 변형의 거동에서 국부 캐비테이션의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 5와 같은 배치의 수치 시뮬레이션을 수행하였다[6]. 사용한 폭약의 종류는 Pentolite Type a로써 질량은 약 0.06kg이다. 폭약은 구조물 아래 0.1524m에 위치하고 있고, 실린더형 셸의 직경은 약 0.3048m, 길이는 1.0668m이고, 물성치는 Table 4와 같은 변형 경화와 변형률 시간 의존성을 지닌 Aluminum Alloy이다.

Fig. 6은 유한요소 Mesh를 보여주고 있으며, Table 5은 폭약 Pentolite type a의 JWL 상태방정식과 청수의

압력 상태방정식의 파라미터를 요약하였다.

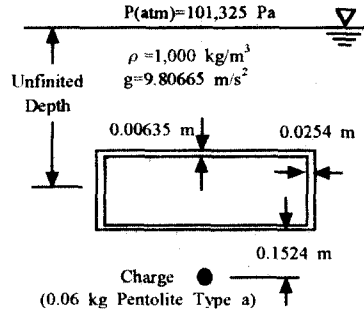


Fig. 5 Arrangement of cylindrical shell under underwater explosion

Table 4 Material properties of Aluminum alloy 6061-T6

Density (ρ)	2,700 kg/m ³
Modulus of elasticity (E)	70 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.33
Yield stress (σ_0)	270 Mpa
Ultimate stress (σ_u)	317 Mpa
Failure plastic strain (ϵ_f)	0.17
Dynamic yield stress constants	D=1.288E6 s ⁻¹ p=4

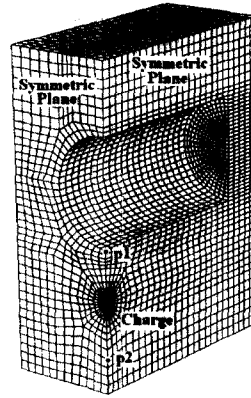


Fig. 6 Finite element mesh configuration of cylindrical shell under underwater explosion

Table 5 Parameters of EOS-JWL and linear polynomial of fresh water

Pentolite type a		Fresh Water ($\mu < 0.8$)	
ρ_0	880 kg/m ³	ρ_0	1,000 kg/m ³
A	3.486E11 Pa	a_1	2.002E9 Pa
B	1.1288E9 Pa	a_2	8.432E9 Pa
ω	0.24	a_3	8.014E9 Pa
R_1	7.00	b_0	0.4934
R_2	2.00	b_1	1.3937
d	5,170 m/s	b_2	0.0000

폭약의 위치로부터 같은 거리 0.1524m 만큼 떨어진 지점에서의 압력 분포는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 구조물의 영향을 받는 폭약 위 부분 p1과 그렇지 못한 아래 부분 p2에서 다른 경향을 보여주고 있다. 국부 캐비테이션은 약 0.1 msec에서 시작하여 0.35msec에서 닫히고 있으며, p1에서의 압력의 크기는 p2의 약 2배에 이르는 것을 알 수 있다. 이것은 충격파의 입사파와 동위상을 갖는 구조물의 반사파와의 중첩에 기인하는 것으로 구조물 표면의 곡률, 탄성 및 전체 구조 거동의 영향을 받는다고 알려져 있다[7].

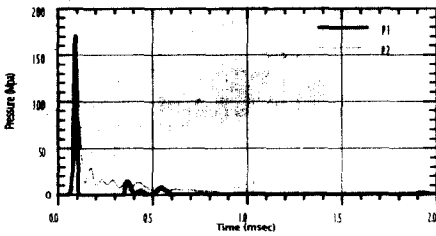


Fig. 7 Time history of pressure in the same distance

Fig. 8은 0.1msec에서의 압력 분포를 보여주고 있으며 폭약과 가까운 원통형 셸 수위의 물에 캐비테이션이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 실린더형 셸에서 폭발에 가장 근접한 중앙 지점, 끝단 지점 및 중간 지점에서의 변형 이력을 보여 주고 있으며, Fig. 10은 시뮬레이션 마지막 시간 2.0msec에서의 좌굴 변형된 모습을 보여 주고 있다.

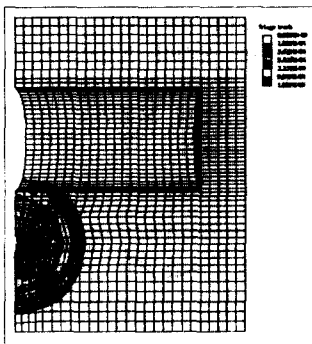


Fig. 8 Cavitation in water around shell surface

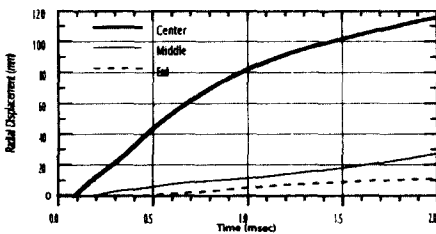


Fig. 9 Time history of plastic deflection

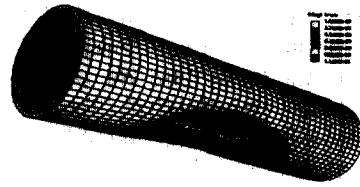


Fig. 10 Deformation of shell at 2.0 msec

4. 수중폭발에 의한 수상함의 충격응답

Fig. 11은 수중폭발의 충격파를 받는 수상함 모형선의 충격응답을 추정하기 위하여 수행한 실험 배치를 보여 주고 있다[8]. Fig. 12와 같이 대칭조건을 사용하여 수중 폭발 기폭 시뮬레이션을 수행하였으며, 모형선의 중앙 횡격벽의 선저 p1에서의 충격압력과 선저 중앙부의 최대 소성변형 등의 실험 결과와 비교 검토하고자 한다.

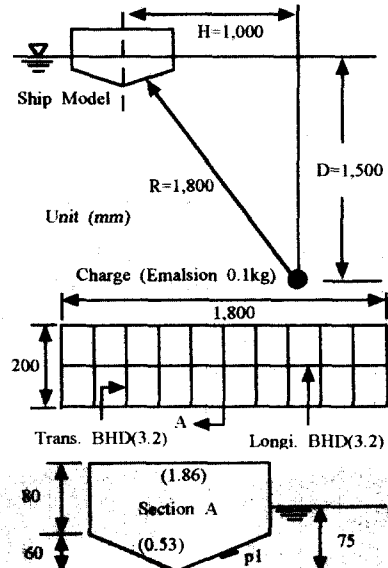


Fig. 11 Arrangement and geometry of test model

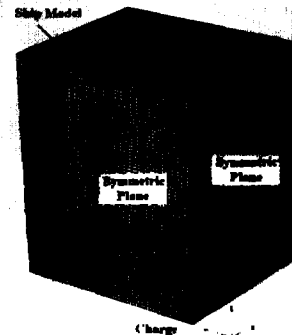


Fig. 12 Finite element mesh configuration of test model under underwater explosion

실험에서는 Table 6과 같은 재료적 물성치를 갖는 강판을 사용하였으며, 질량 0.1kg의 Emulsion 폭약의 JWL 상태방정식의 파라미터는 Table 7에 요약되어 있고, 청수의 압력 상태방정식의 파라미터는 Table 5와 같다. 기폭해석에서는 중력과 대기압을 고려하였고 모형선의 상부 갑판의 양 끝단의 모서리 부분은 실험에서와 같이 구속하였다.

Table 6 Material properties of steel plate

Density (ρ)	7,800 kg/m ³
Modulus of elasticity (E)	160 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.3
Yield stress (σ_0)	190 Mpa
Ultimate stress (σ_u)	316 Mpa
Failure plastic strain (ϵ_f)	0.378

Table 7 Parameters of EOS-JWL of Emulsion

ρ_0	1,100 kg/m ³
A	2.26E11 Pa
B	6.461E9 Pa
ω	0.36
R ₁	5.19
R ₂	1.46
d	3,390 m/s

Fig. 13은 폭발로 인한 충격 압력파의 전파 과정을 보여주고 있으며 약 1.2 msec에서 선저에 도달하는 것을 알 수 있다. 이로 인해서 선체는 전체적으로 수직하게 상부로 거동하기 시작하지만, 선체의 양 끝단의 구속으로 전체적인 중방향으로는 굽힘이, 선저부에는 국부 변형이 발생하고 있음을 Figs. 14~16에서 알 수 있다.

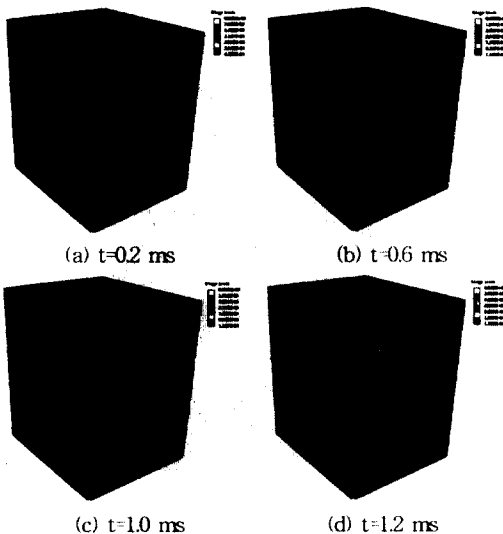


Fig. 13 Propagation of shock wave by explosion

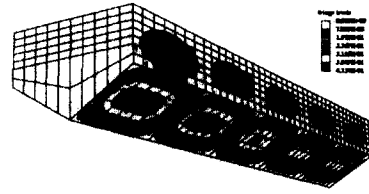


Fig. 14 Deformation distribution (1.6ms)

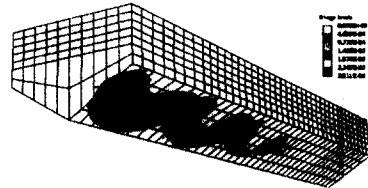


Fig. 15 Plastic strain distribution (1.6 ms)

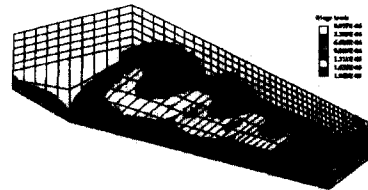


Fig. 16 Stress distribution (1.6 ms)

실험에서의 선저부 영구변형은 5.5mm이었으며 시뮬레이션에 의한 선저부 영구변형은 중앙 횡격벽과 선저 바닥의 패널 사이의 상대적 변형으로서 Fig. 17과 같이 약 42mm 정도로 대체로 잘 일치하고 있지만 다소 작다는 것을 알 수 있는데 모형선을 고정할 경계조건과 수면의 반사면을 고려하지 않은 경계조건에 기인하는 것으로 사료된다.

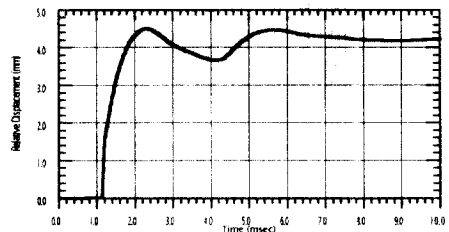


Fig. 17 Time history of relative permanent deformation of ship model

수면의 경계조건으로 반사면을 고려하지 않았으므로 본 수치 시뮬레이션에서는 광역 캐비테이션은 발생하지 않았으나, 모형선의 선저 부근에서는 국부 캐비테이션은 발생하였을 것이다. Fig. 18은 실험 시 모형선 선저에서 폭약과 가장 가까운 중앙 횡격벽 p1점의 압력 계지의

충격 압력의 시간이력과 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여 주고 있다. 1.2 msec에 충격파가 선저에 도달한 이후에 충격 압력파가 매우 짧게 발생하여 없어지고 2.2 msec 이후에 다시 발생하는 것으로 미루어 국부 캐비테이션이 발생하고 있음을 알 수 있다. 실험 시 2.2msec 앞부분의 실험 데이터만 측정하여 전체적인 비교는 할 수는 없지만 초기부분의 경향은 피크와 주기가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

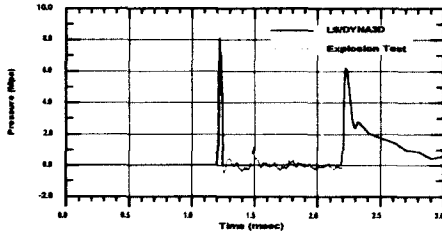


Fig. 18 Time history of pressure at p1 point

5. 결론

수중폭발에 대한 Hydrocode의 검증과 정확한 해석 기술의 축적을 위하여 본 연구에서 LS/DYNA3D를 사용하여 광역 및 국부 캐비테이션에 대한 충격응답해석을 수행한 결과들은 기존의 해석해 및 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 충격파와 국부 캐비테이션을 고려한 수상선 모형선의 3차원 충격응답 해석은 실험 결과와 대체로 잘 일치하고 있었으나 code의 개발과 해석 기술의 보완이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] MSC/DYTRAN User's Manual, Version 4.5, The MacNeal Shwendler Corp. U.S.A., 1998.
- [2] LS/DYNA3D User's Manual, Version 9.50, Livermore Software Technology Corp., 1999.
- [3] H. H. Bleich and I. S. Sander, "Interaction between structures and bilinear fluids", Int. J. Solids Structures, Vol. 6, pp. 617~639, 1970.
- [4] Sh. U. Galiev and V. A. Romashchenko, "A method of solving nonstationary 3 dimensional problems of hydroelasticity with allowance for fluid failure", Int. J. of Impact Engineering, Vol. 22, pp. 469~483, 1999.
- [5] Leonard D. Santiago, "Fluid-interaction and cavitation effects on a surface ship model due to an underwater explosion", Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1996.
- [6] Y. W. Kwon, P. K. Fox and Y. S. Shin, "Response of a cylindrical shell subjected to a

- near field side-on explosion", Symposium of Shock and Vibration, No. 62, pp. 483~492, 1992.
- [7] K. Umemoto, T. Yoshikawa, K. Nozawa, H. Sakaue, T. Sano, "Structural response of a submerged structure subjected to underwater explosion load (2nd report : A study on fluid-structure interaction behavior of surface pressure)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 184, pp. 419~431, December 1998.
- [8] N. Yoneda, S. Iwata, M. Tanigawa, M. H. Rashed, A. Kawahara, "Simulation of Under Water Explosion Experiments", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 175, pp. 349~353, June 1995.