

# 수중 폭발 시뮬레이션을 위한 경계 요소법 기반의 수치 해석 기법 연구

정준모<sup>†</sup>·이재빈  
인하대학교 조선해양공학과

## A Study on BEM-Based Numerical Simulation Technique for Underwater Explosions

Joonmo Choung<sup>†</sup>·Jae-bin Lee  
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recoverability and vulnerability of navy ships under underwater explosion are critical verification factors in the acquisition phase of navy ships. This paper aims to establish numerical analysis techniques for the underwater explosion of navy ships. Doubly Asymptotic Approach (DAA) Equation of Motion (EOM) of primary shock wave and secondary bubble pulse proposed by Geers-Hunter was introduced. Assuming a non-compressive fluid, reference solution of the DAA EOM of Geers-Hunter using Runge-Kutta method was derived for the secondary bubble pulse phase with an assumed charge conditions. Convergence analyses to determine fluid element size were performed, suggesting that the minimum fluid element size for underwater explosion analysis was 0.1 m. The spherical and cylindrical fluid domains were found to be appropriate for the underwater explosion analyses from the fluid domain shape study. Because the element size of 0.1 m was too small to be applied to the actual navy ships, a very slender beam with the square solid section was selected for the study of fluid domain existence effect. The two underwater explosion models with/without fluid domain provided very similar results in terms of the displacement and stress processes.

**Keywords** : Shock wave(충격파), Bubble pulse wave(구상파), Standoff distance(이격 거리), DAA(이중 점근 근사법), BEM(경계 요소법)

## 1. 서론

함정은 획득 단계부터 피격성(susceptibility)을 낮추기 위한 많은 노력과 비용이 투입되지만, 어뢰/기뢰 공격과 같은 적의 위협에 항상 노출되어 있다. 적의 공격에 의한 피격 이후에도 적은 구조적 손상 및 전투 장비 손상이 발생하도록 설계 되어야 한다. 이러한 함정의 취약성(vulnerability)과 함께 피격 후에도 전투를 유지할 수 있는 능력(회복성, recoverability)을 보유해야 한다. 따라서 함정의 취약성은 회복성을 결정하는 매우 중요한 요소이며, 어뢰/기뢰에 의한 수중 폭발(underwater explosion, UNDEX)은 단 한번의 공격으로도 함정에 매우 큰 구조적 손상을 발생시켜 회복 불능의 상태를 만들 수도 있는 매우 위협적인 적의 공격이다.

수중 폭발에는 두 가지 종류가 있다. 첫 번째로는 폭약이 선체에 근접해서 폭발하는 경우(근거리 수중 폭발, near-field UNDEX)와 선체에서 먼 위치에서 폭발하는 경우(원거리 수중 폭발, far-field UNDEX)이다. 동일한 폭약 질량일 경우 수중 폭발로 인한 피해는 이격 거리에 반비례한다. 이격 거리(standoff distance)가 가까울 경우(근거리 수중 폭발) 폭발 압력은 선체에 직접 손상 또는 파손을 유발할 수 있다. 이격 거리가 멀 경우(원거리 수중 폭발) 버블의 팽창-수축이 과도한 휘핑 응답(whipping response)을 유발할 수 있다.

통상적으로 폭약의 폭발과 함께 음속의 3-5배 정도의 빠른 속도로 방사하는 일차 충격파(primary shock wave)와 음속으로 전진하는 이차 구상파(secondary bubble pulse)가 순차적으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 많은 연구자들에 이러한 현상을

이론적으로 정립하여 왔다.

Coles et al. (1946), Farley and Snay (1978), Price (1979) 등은 원거리 수중 폭발을 가정하여 일차 충격파의 경험식을 제시하였다. 이후 Geers and Hunter (2002)는 체적 가속도(volume acceleration)를 이용하여 일차 충격파를 제시하였다. 이차 구상파의 경우에도 많은 이론 연구가 진행되었지만, Geers and Hunter (2002)가 제시한 이중 점근 근사법(Doubly Asymptotic Approximation, DAA)이 최근 널리 적용되고 있다. DAA는 변형체와 유체장 사이의 과도 상호 작용을 단순화한 형태의 미분 방정식 형태로 제공되며, 경계 요소법(Boundary Element Method, BEM)을 이용하여 구조물에 입사하는 압력을 결정한다.

일차 충격파와 이차 구상파는 합체에 상당한 압력을 작용시킨다. 또한 빠르게 방사된 일차 충격파는 자유 수면에 반사되어 광역 공동(bulk cavitation)을 생성한다. 또한 선체에 입사한 일차 충격파는 반사되어 합체 공동(hull cavitation)을 발생시킬 수도 있다. 이러한 입력장은 전산 유동 해석(Computational Fluid Dynamics, CFD) (Mair, 1999)과 유체 요소(Eulerian element)를 적용한 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 이용해서 구현이 가능하다. 특히 유체 요소를 적용한 FEA는 구조 요소(structural element)를 동시에 해석하므로 CEL 해석(coupled Eulerian Lagrangian analysis) 또는 ALE 해석(arbitrary Lagrangian Eulerian analysis)의 범주에 속한다. 이러한 해석법을 통하여 광역 공동(bulk cavitation)과 선체 공동(hull cavitation)을 구현할 수 있는 장점이 있고, 유체 영역을 모델링하여 직관적인 반면, 오랜 해석 시간을 요구하는 단점이 있다.

압력장은 DAA를 구현할 수 있는 BEM의 적용을 통해서도 가능하다. USA (DeRuntz, 1996)는 DAA BEM 전용 코드로서 가장 널리 사용되어 오고 있다. 압력장을 별도로 계산하기 때문에 빠른 해석 시간이 장점이다. 압력장에 반응하는 구조 응답 해석을 위하여 상용 유한 요소 해석 코드인 LS-Dyna (LSTC, 2020)가 널리 적용되고 있다. LS-Dyna는 USA와 물리적으로 연동(LS-Dyna/USA)되어 사용이 가능한 것으로 알려져 있다.

Lee et al. (2003)은 광역 공동이 수중 폭발 응답에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 LS-Dyna/USA에 실린더형 유체 영역을 포함한다. Kwon et al. (2005a), Kwon et al. (2005b) 등은 모드 중첩법과 LS-Dyna/USA에 기반한 합체의 수중 폭발 해석을 수행하고 휘핑을 예측한 바 있다. 이들은 BEM에 기반한 폭발 하중을 이용하였기 때문에 유체 영역에 대한 연구를 포함하지 않았다. Lee et al. (2007)은 이차 구상파에 대하여 Hicks 모델 (Hicks, 1970)과 Geers-Hunter 모델을 비교하는 연구를 수행한 바 있다. 이 연구도 LS-Dyna/USA에 기반하였기 때문에 유체 영역에 대한 연구는 포함되지 않았다. Lee et al. (2019)는 CFD기법을 이용하여 3차원 수치 수조에서의 발파 시뮬레이션을 수행한 바 있다. Kim et al. (2014)은 수중 폭발로 인한 파이프의 동적 응답 해석을 수행한 바 있다. 이들은 DAA BEM 기법을 이용하여 폭발 압력장을 생성하였지만, 유체 영역의 형상이나 요소의 크기에 대한 영향 평가를 수행하지 않았다. Kim (2007)은 ALE 기법을 활용하여 수중합의 수중 폭발 하중을 생성하였고, 폭약의 모델링 방법 및 요소 크기

민감도에 대한 연구를 수행하였다. 2010년대 해양 플랜트 산업의 활성화에 따라 국내에서는 주로 가스 폭발에 관한 연구도 수행된 바 있다 (You et al., 2018).

문헌 조사에서 나타낸바와 같이 DAA BEM은 비교적 널리 알려진 방법임에도 압력장을 생성하기 위한 유체 영역 요소의 크기, 유체 영역 형상 등에 관한 연구는 거의 수행된바가 없다. 이러한 상황은 본 연구를 수행하게 된 동기가 되었다.

전술한 바와 같이 수중 폭발 시뮬레이션은 동적 비선형 유한 요소 해석을 공통 요소로 하여 하중을 구현하는 방법에 따라 BEM, CFD, CEL 등과 같이 다양한 기법이 활용 가능하다. 본 연구에서는 BEM 기반의 수중 폭발 압력을 비교하는 연구를 수행하고자 한다.

이를 위한 본 연구의 첫 번째 단계는 비압축성 유체를 가정한 Geers-Hunter의 일차 충격파 및 이차 구상파 미분 방정식에 대한 기준해(reference solution)를 도출하여 이를 정해로 간주한다. 두 번째 단계는 BEM 해석을 위한 주요 파라미터로서 유체 요소 크기, 유체 영역 형상을 선정하였고, 이에 대한 수렴도 및 민감도를 수치 해석적으로 검토하는 것이다. 이를 미분 방정식의 기준해와 비교함으로써 수중 폭발 해석을 위한 최적의 유체 요소 크기 수렴도, 유체 영역 형상을 결정하는 것이다. 세 번째 단계는 압력장 구현을 위한 유체 영역의 존재 효과를 분석하는 것이다. 즉, 유체 영역의 존재 유무에 상관없이 유사한 구조 거동이 발생하는지 관찰하는 것이다.

## 2. 수중 폭발 모델

### 2.1 수중 폭발 개요

가스 구체(gas bubble)는 이동 과정 중에 정수압과의 균형을 유지하기 위하여 내부 압력이 감소하는 동안 체적이 증가한다. 가스 구체의 수축/팽창(oscillation) 및 이동(migration) 과정은 Fig. 1에 제시되었다 (Hamashima et al., 2010). 이 그림은 구상파 압력 변화가 가스 구체의 수축/팽창 및 이동 현상과 밀접하게 관련되어 있음을 보여준다.

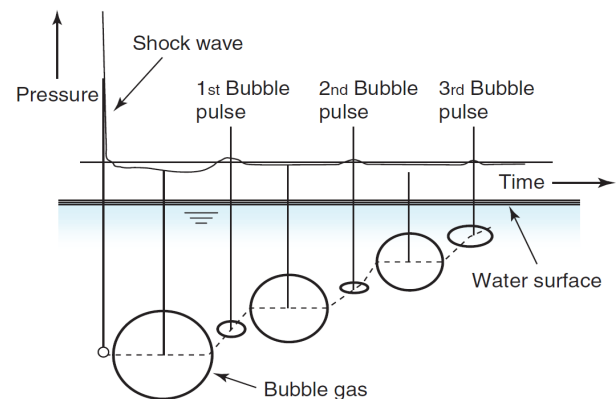


Fig. 1 Underwater explosion phenomenon (Hamashima et al. (2010))

폭약(charge)이 폭발할 때, 고압의 작은 가스 구체(bubble)가 발생한다. 이와 동시에 비선형 지수 감소 함수로 나타낼 수 있는 일차 충격파가 매우 짧은 시간 내에 발생한다. 그 후 가스 구체의 체적은 최대로 팽창하고, 정수압 수압과 균형을 이룬 후에 감소하기 시작한다. 가스 구체 체적이 최솟값에 도달할 때마다 압력파(이차 구상파)가 생성된다 (Snay, 1956). 따라서 일차 충격파 및 이차 구상파를 수중 폭발 함정 응답 해석에 고려한다.

## 2.2 일차 충격파

일차 충격파 압력은 식 (1)을 이용하여 계산이 가능하다. 여기서 체적 가속도  $\ddot{V}$ 는 식 (2)의 경험식을 이용하여 계산한다. 식 (2)에서 사용된 시간 상수  $T_c$  및 압력 상수  $P_c$ 는 식 (3) 및 (4)에 제공되었다. 이격 거리  $R$ 은 폭약 중심점(charge point)과 타격점(standoff point) 사이의 거리를 의미한다 (Geers and Hunter, 2002).

$$P(R;t) = \frac{\rho_f}{4\pi R} \left(\frac{a_c}{R}\right)^A \ddot{V} \left(\left(\frac{a_c}{R}\right)^B t\right) \quad (1)$$

$$\ddot{V} \left(\left(\frac{a_c}{R}\right)^B t\right) = \frac{4\pi a_c P_c}{\rho_f} \left\{ 0.8251 \exp\left(-1.338 \frac{t}{T_c}\right) + 0.1749 \exp\left(-0.1805 \frac{t}{T_c}\right) \right\} \quad (2)$$

$$T_c = \frac{a_c}{v_c} = k \sqrt[3]{m_c} \left(\frac{a_c}{\sqrt[3]{m_c}}\right)^B \quad (3)$$

$$P_c = K \left(\frac{\sqrt[3]{m_c}}{a_c}\right)^{1+A} \quad (4)$$

$\ddot{V}$  체적 가속도

$R$  이격 거리

$\rho_f$  폭약의 밀도

$a_c$  폭약의 초기 반지름

$k$  폭약 상수

$K$  폭약 상수

$P_c$  폭약의 종류에 따른 압력 상수

$V_c$  폭약의 속도 상수

$m_c$  폭약의 질량

$A$  폭약에 따른 무차원 상수

$B$  폭약에 따른 무차원 상수

## 2.3 이차 구상파

수중 폭발에 의해 생성된 가스 구체의 위치와 크기를 모니터링하는 것은 극히 어렵다. 가스 구체 반지름 및 수직 이동 이력을 예측하기 위한 운동 방정식(Equation of Motion, EOM)이 유도되어왔다. 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 Geers and Hunter 모델을 사용하였으며, 식 (5)-(18)에 정리하였다.

Geers and Hunter (2002)가 초기에 제안한 EOM은 2계 미분 방정식이었으나, 이를 1계 미분으로 적분한 가스 구체의 크기( $a$ ) 및 이동( $u$ )에 대한 EOM은 식 (5) 및 (6)과 같다. 가스 구체의 이동은 상방(자유 표면으로 이동하는 방향)이 음수로 간주된다. 여기서  $\Phi_{f0}$  및  $\Phi_{f1}$ 은 각각 유체의 속도 포텐셜(식 (7)-(8) 참조)이며,  $\Phi_{g1}$ 은 가스 구체의 속도 포텐셜이다(식 (9) 참조). 유체의 속도 포텐셜에 포함된 계수  $Z$ 는 운동 방정식의 우변 항을 나타낸다. 즉 식 (10)을 이용하여  $Z$ 를 구하기 위해서는 식 (11)-(16)이 요구된다.

$$\dot{a} = -\frac{\Phi_{f0}}{a} - \frac{1}{c_f} \left( \dot{\Phi}_{f0} - \dot{a}^2 - \frac{\dot{u}^2}{3} - 2 \frac{\dot{u}^2}{3} \frac{\Phi_{f1}}{a} \right) \quad (5)$$

$$\dot{u} = -2 \frac{\Phi_{f1}}{a} - \frac{1}{c_f} (\dot{\Phi}_{f1} - 2\dot{a}u) \quad (6)$$

$$\dot{\Phi}_{f0} = \frac{1}{1+\zeta} \left\{ \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\rho_g}{\rho_f} + \zeta \right) \left( \dot{a}^2 + \frac{1}{3} \dot{u}^2 \right) - \frac{\rho_g}{\rho_f} c_g \frac{\Phi_{f0}}{a} \right\} + \frac{2}{3} (1+\zeta) \dot{u} \frac{\Phi_{f1}}{a} - Z \quad (7)$$

$$\dot{\Phi}_{f1} = \frac{1}{1+\zeta} \left\{ \left( 1 + \frac{\rho_g}{\rho_f} + 2\zeta \right) \dot{a}u - \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) ga \right\} - \frac{\rho_g}{\rho_f} c_g \left( 2 \frac{\Phi_{f1}}{a} + \frac{\Phi_{g1}}{a} \right) \quad (8)$$

$$\dot{\Phi}_{g1} = \frac{1}{1+\zeta} \left\{ \left( 2 + \frac{c_g}{c_f} + \zeta \right) \dot{a}u - \frac{c_g}{c_f} \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) ga \right\} - c_g \left( 2 \frac{\Phi_{f1}}{a} + \frac{\Phi_{g1}}{a} \right) \quad (9)$$

$$Z = \frac{1}{\rho_f} (P_g - p_I + \rho_f g u) + \frac{1}{3} \left\{ \left( \frac{\Phi_{f1}}{a} \right)^2 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \left( \frac{\Phi_{g1}}{a} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$\zeta = \frac{\rho_g c_g}{\rho_f c_f} \quad (11)$$

$$P_g = K_c \left( \frac{V_c}{V} \right)^\gamma \quad (12)$$

$$\rho_g = \rho_c \left( \frac{V_c}{V} \right) \quad (13)$$

$$c_g = c_c \left( \frac{V_c}{V} \right)^{0.5(\gamma-1)} \quad (14)$$

$$c_c = \sqrt{\frac{\gamma K_c}{\rho_c}} \quad (15)$$

$$p_I = p_{atm} + \rho_f g u(0) = p_{atm} + \rho_f g d_I \quad (16)$$

$a$  가스 구체의 반지름 (크기)

$u$  가스 구체의 수직 위치

$P_g$  가스 구체의 압력 상수

- $p_{atm}$  대기압
- $m$  가스 구체의 발생 차수 (초기  $m=0$ )
- $\rho_g$  가스 밀도 (폭약과 가스의 체적비에 비례)
- $\rho_f$  유체 밀도
- $c_g$  가스 음속
- $c_f$  유체 음속
- $\gamma$  가스 구체의 비열비
- $V_c$  가스 구체의 초기 체적 ( $V_c=V(0)$ )
- $K_c$  폭약의 단열 압력 상수
- $d_i$  가스 구체의 초기 위치 ( $d_i=z(0)$ )
- $\zeta$  가스 버블과 유체의 임피던스 비

비압축성 유체를 가정하면 가스 구체의 수축/팽창에 따른 에너지 손실이 발생하지 않는다. 이 경우  $1/c_f = 0$ ,  $\rho_f/\rho_g = 0$ ,  $c_g = 0$ 이 성립한다. 이를 적용하면 식 (5)-(6)은 식 (17)-(18)과 같이 간단한 형태의 미분 방정식으로 변경된다. 본 연구에서는 식 (17)-(18)을 수치 적분하여 기준해를 구한 후에 여러 가지 수치 해석에 대한 정량성을 논의하고자 한다.

$$\dot{a} = -\frac{\Phi_{f0}}{a} \tag{17}$$

$$\dot{u} = -2\frac{\Phi_{11}}{a} \tag{18}$$

### 3. 수중 폭발 해석법 정립

#### 3.1 폭약 정의

본 연구에서는 폭약의 각종 상수 및 초기 위치를 Table 1에 정리하였다.  $K_c$ 와  $\gamma$ 의 경우 TNT 1.63 g/cc에 상응하는 값을 적용하였다 (Geers and Hunter, 2002).  $P_c$ ,  $v_c$ , A, B의 경우 참고 문헌 (Price, 1979; Geers and Hunter, 2002)으로부터 결정하였다. 폭약의 질량은 300kg을 가정하였다. 또한  $\rho_c$ ,  $\rho_f$ ,  $c_f$ ,  $p_{atm}$ 은 일반적인 값을 적용하였다. BEM 기반 수중 폭발 해석은 상용 유한 요소 코드인 Abaqus/Explicit (Simulia, 2018)을 이용하여 수행되었다.

Table 1 Charge information

item	value	item	value
$P_c$ (Pa)	1.67E9	$m_c$ (kg)	300.00
$v_c$ (m/s)	1010.00	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	1630.00
A	0.18	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	1025.00
B	0.185	$c_f$ (m/s)	1550.00
$K_c$ (Pa)	1.045E9	$p_{atm}$ (Pa)	101,325.0
$\gamma$	1.30		

#### 3.2 유체 요소 크기

수중에서 폭발 압력의 전달을 위하여 유체를 삼각뿔 음향 요소(acoustic element, AC3D4 요소)로 모델링하였다. 폭발 압력의 자연스러운 전파를 위하여 통상적으로 구형(sphere) 또는 실린더형(cylinder) 유체 영역을 사용한다. 이러한 형상은 임피던스같은 유체 도메인 경계 조건에도 영향을 준다. 즉 구형이나 반구로 막힌 실린더형은 코너가 존재하지 않기 때문에 자연스러운 임피던스의 구현이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 구형의 유체 요소 영역을 가정하였으며, 압력 이력의 비교를 목적으로 하므로 해석 모델에 구조 요소를 포함하지 않았다. 반지름이 1m인 구형 유체 도메인을 대상으로 3가지 요소 크기(0.5m, 0.1m, 0.05m)를 가정하여 Fig. 2에 제시하였다. 구의 중심을 자유 수면에서 1m 아래에 위치시켰다. 타격 점은 구의 중심으로 가정하였다. 폭약을 수심 100m에 위치시킨 후 폭발 압력을 도출하였다. 또한 3가지 모델의 절점 및 요소 개수와 해석 시간을 정리하여 Table 2에 제시하였다. 요소 크기의 감소에 따라 절점 및 요소의 개수가 기하급수적으로 증가했으며, 해석 시간 또한 현저하게 증가했음을 확인 가능하다.

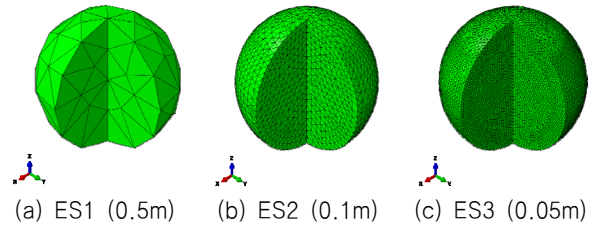


Fig. 2 FEA models for element size study

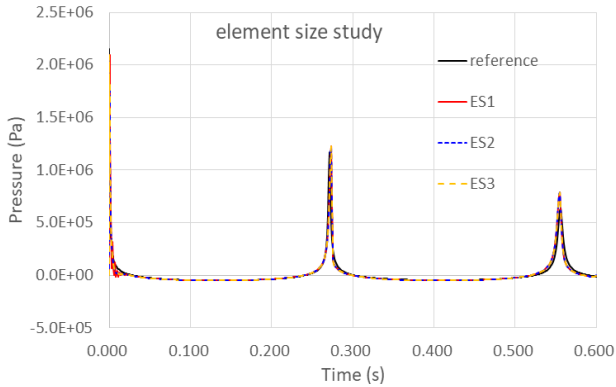
Table 2 Information of finite elements and computing costs for element size convergence study

Case	number of nodes	number of elements	computing duration (h)
ES1	6,449	34,711	1.0
ES2	41,372	233,716	5.0
ES3	207,074	1,185,445	100.0

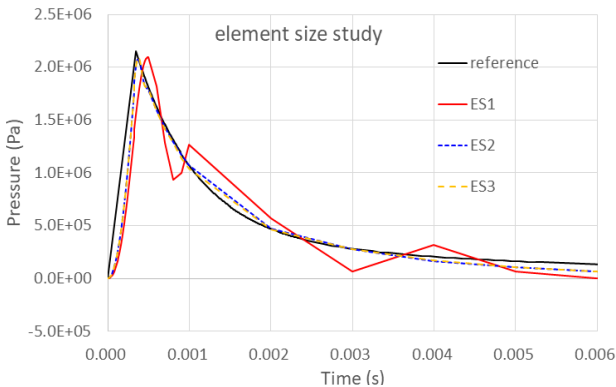
수치 해석 결과의 정량적 비교를 위하여 Geers and Hunter (2002) 미분 방정식의 수치해를 도출하였다. 이를 기준으로 정의하였다(Fig. 3 참조). 기준해는 0.001초의 시간 증분을 4차 Runge-Kutta 양해법에 적용하여 계산되었다.

요소 크기 수렴도 평가를 위하여 타격점에서의 47가지 압력 이력 (이론해 및 3가지 수렴도 케이스)을 Fig. 3에 제시하였다. 전체 시뮬레이션 시간에 대하여 거시적으로 보자면 모든 케이스에서 일차 충격파와 이차 구상파가 정상적으로 발달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 3가지 수렴도 케이스 모두 기준해에 근사하는 것으로 보여진다. 그러나 Fig. 3(b)에서 같이 1차 충격파를 좀 더 확대해서 관찰하면, 요소 크기에 0.1m 이하일 경우에만 1차 충격파가

이론해와 유사하다는 사실을 관찰할 수 있었다. 따라서 유체 요소 크기 수렴도 해석을 통하여, 유체 요소 크기는 0.1m보다 작아야 안정적인 충격파 압력 이력을 얻을 수 있다는 것이다. 그러나 본 결과를 일반화하기 위해서는, 좀 더 다양한 유체 영역 크기와 이격 거리를 감안하여 수치 해석이 수행될 필요가 있다.



(a) Entire time



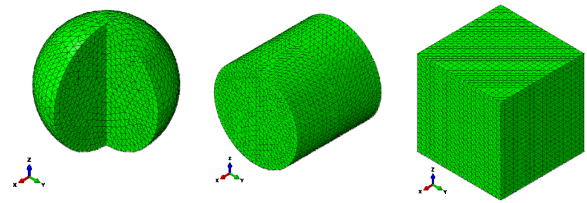
(b) Time for primary shock phase

Fig. 3 Pressure history comparison from element size convergence study

### 3.3 유체 영역 종류

유체 영역의 형상을 결정하기 위하여 Fig. 4에 보인바와 같은 3가지 유체 영역(구, 실린더, 정육면체)을 준비하였다. 3가지 모델의 반지름 또는 변 길이의 절반은 모두 1.0m로서 동일하게 설정하였다. 이러한 이유로 도메인별 체적 및 사용된 요소의 개수가 약간씩 차이가 있다(Table 3 참조). 또한 3가지 모델은 요소 크기 수렴도에서 결정된 0.1m 요소 크기를 가진다. 3가지 모델의 타격점 위치 및 폭약의 위치도 수렴도 해석과 동일하다. 유체 요소의 종류도 AC3D4로 동일하다.

Fig. 5는 세가지 모델에 대한 타격점에서 압력 이력을 나타낸다. 유체 영역이 구 또는 실린더일 경우, 기준해와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 반면, 정육면체 영역은 일차 충격파 이후 2차 구상파가 생성되기 전까지 음압에서 큰 차이를 보인다. 일차 충격파에 의한 거동에서는 유체 영역 형상에 따른 차이가 크지 않기 때문에 일차 충격파가 중요한 문제에서는 어떤 형상도 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

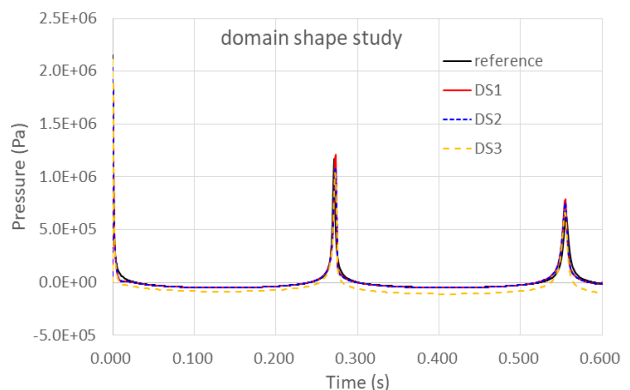


(a) DS1 (SPH) (b) DS2 (CYL) (c) DS3 (CUB)

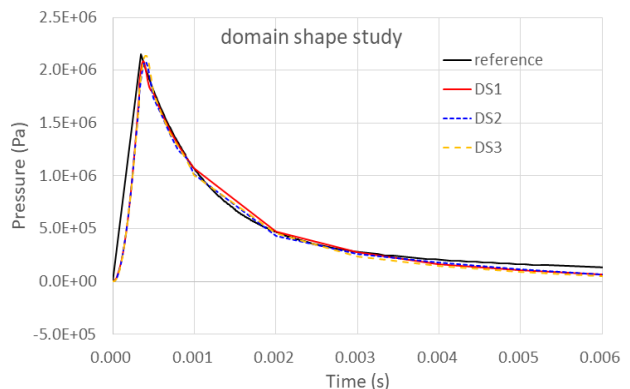
Fig. 4 FEA models for fluid domain shape study

Table 3 Information of finite elements for fluid domain shape study cases

Case	number of nodes	number of elements	volume (m <sup>3</sup> )
DS1	6,449	34,711	4.189
DS2	8,513	45,019	6.283
DS3	10,182	53,913	8.000



(a) Entire time



(b) Time for primary shock phase

Fig. 5 Pressure history comparison from fluid domain shape study cases

### 3.4 유체 영역 유무

유체 요소 수렴도에 대한 연구 결과로부터 유체 요소의 크기는 양질의 압력 이력을 얻는데 매우 중요한 인자임을 확인할 수 있었다. 대형 구축함의 경우 선장, 선폭, 흘수는 대략 150m,

20m, 10m 내외이다. 유체 영역의 체적은 36,000m<sup>3</sup>이고, 요소 길이 0.1m의 삼각셀 요소 1개의 체적은 대략 1.667E-4m<sup>3</sup>이므로, 대략 2억 개 이상의 음향 요소가 요구된다. 컴퓨터 환경에 따라 다를 수 있지만, 예를 들어 중앙 처리 장치 40코어 및 256GB 메모리를 장착한 최신형 서버 환경에서 2억 개의 요소 개수는 현실적으로 실행 불가능한 숫자로 간주된다.

본 연구에서는 이 기능을 이용하여 유체 영역이 있는 경우 (fluid-y)와 없는 경우(fluid-n)에 대하여 수중 폭발 해석을 수행하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 가상의 세장한

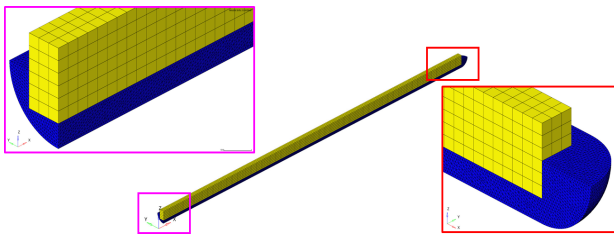
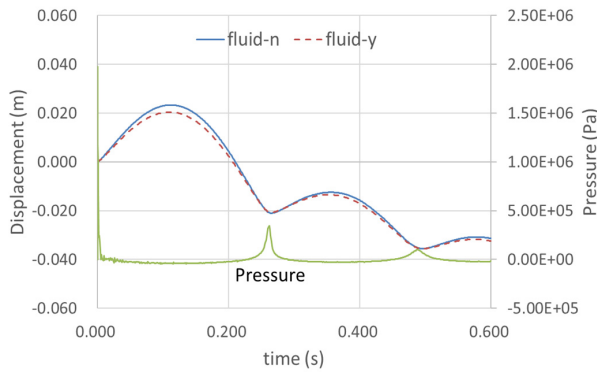


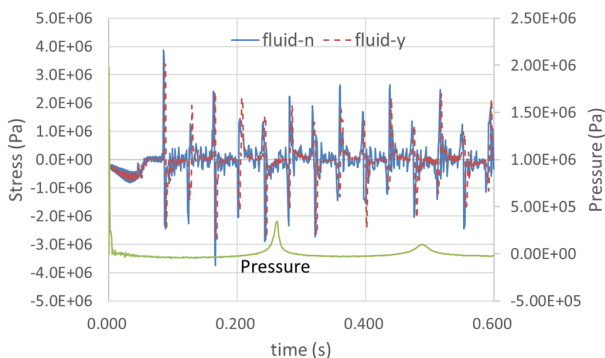
Fig. 6 Pressure history comparison from fluid element domain study

Table 4 Information of finite elements for simple beam case

Domain	number of nodes	number of elements	Volume (m <sup>3</sup> )
Beam	7,028	4,500	36.0
Fluid	213,174	1,062,066	57.8



(a) Whipping deformation



(b) Whipping-induced longitudinal stress

Fig. 7 Pressure history comparison from fluid domain shape study cases

사각 단면 중실보(길이 100m, 폭 1.2m, 폭 1.2m, 흡수 0.6m)에 대하여 유한 요소 모델링을 수행하였다. 해석 시간의 효율을 높이기 위하여 보의 길이 및 폭 방향에 대한 대칭 모델을 사용하였다. 이러한 대칭 모델에 사용된 보 및 유체 모델의 체적, 절점수, 요소수를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 수중 폭발에 사용된 파라미터는 Table 1과 같다. 보 요소에는 별도의 경계 조건이 주어지지 않았다.

Fig. 7(a)는 타격점에서 변위 이력을 압력 이력과 같이 나타낸 그림이다. 여기서 타격점은 보의 길이 중앙에 설정되었다. 유체 영역이 없는 경우와 있는 경우의 타격점에서 변위는 상당히 유사한 것으로 계산되었다. 또한 Fig. 7(b)는 타격점의 상부(갑판부)에서의 종방향 응력 이력을 나타낸다. 유체 영역이 없을 경우 약간의 고주파수 진동이 보이긴 하지만, 응력 이력은 서로 유사한 경향을 보인다.

최종적으로 유체 영역의 유무에 따른 해석 결과에 큰 차이가 없으며, 유체 도메인을 포함하지 않아도 충분히 정도 높은 해석 결과를 도출할 수 있음을 증명하였다. 유체 영역이 없을 경우 해석 시간은 4분 50초, 있을 경우 13시간 20분 4초가 소요되어 해석의 효율면에서 서로 비교가 거의 불가능한 수준임을 확인할 수 있었다.

## 4. 결론

본 논문은 함정의 취약성 및 회복성 평가를 위해서 필수적으로 요구되는 수중 폭발의 정량적 평가 기법 정립을 목적으로 한다. 이를 위하여 수중 폭발 현상에 대한 이론적 배경을 고찰하였다. 그리고 일차 충격파 및 이차 구상파에 대한 Geers-Hunter 체적 가속도 모델의 수학적 모델에 대하여 고찰하였다.

가정한 폭약 상수를 대상으로 비압축성 유체를 가정하여 Geers-Hunter 체적 가속도 모델에 대한 기준해를 도출하였다. BEM 기반의 수중 폭발 해석법을 정립하기 위하여 입력 전달을 담당하는 유체 요소(음향 요소)의 크기에 따른 수렴도 해석을 실시하였다. 그 결과를 기준해와 비교한 결과 유체 요소의 크기는 최소 0.1m 이하가 되어야 안정적인 압력 이력을 얻을 수 있었다. 유체 영역의 형상을 구, 실린더, 육면체로 가정하여 수중 폭발 해석을 수행한 결과, 구와 실린더의 경우 안정적인 압력 이력을 도출하였으며, 육면체의 경우 부정확한 압력 이력을 도출할 수 있음을 확인하였다. 결정된 유체 요소 크기는 100m 이상의 함정에 적용하기엔 너무 작은 요소 크기였기 때문에 유체 영역 유무에 따른 수중 폭발 해석을 진행하였다. 즉 중실 사각 단면을 가지는 세장한 보에 대하여 유체 영역의 유무에 따른 수중 폭발 해석을 진행하였다. 그 결과 유체 영역이 없는 경우에도 유체 영역이 있는 경우에 비하여 매우 유사한 응답 이력을 확인할 수 있었다. 즉 유체 영역의 유무에 관계없이 매우 유사한 변형을 얻을 수 있었으며, 진동으로 인한 응력의 이력도 서로 유사함을 확인할 수 있었다.

좀 더 다양한 폭약 상수 및 이격 거리에 대하여 BEM 기반의

요소 크기 수렴도, 유체 영역 형상 등에 대한 연구가 요구된다. 또한 CFD를 이용한 가스 생성과 발달을 모사하여 좀 더 실제와 유사한 수중 폭발 거동을 모사하는 후속 연구가 요구된다.

## 후 기

본 연구(논문)는 산업통상자원부 산업소재핵심기술개발사업 “극한환경용 ICE 내충돌, 고인성 해양플랜트 강재 및 적용 기술 개발” 과제와 산업통상자원부 산업전문인력양성사업 “미래 해양플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업”의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 포스코의 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Coles, J.S. et al., 1946. Shock-wave parameters from spherical TNT charges detonated underwater. *in Underwater Explosion Research Office of Naval Research*, Washington D.C., 1, pp.1085-1105.
- DeRuntz, J.A., 1996. *The Underwater Shock Analysis (USA) Manual*. Unique Software Applications, Colorado Spring.
- Farley, T.E. & Snay, H.G., 1978. Unclassified data from classified source. *in Explosion Effects and Properties: Part II, Explosion Effects in Water*, NSWC/WOL TR 76-116.
- Geers, T.L. & Hunter, K.S., 2002. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble. *Journal of Acoustic Society of America*, 111(4), pp.1584-1601.
- Hamashima, H., Shibuta, M., Nishimura, Y. & Itoh, S., 2010. Behavior of bubble pulse in food processing using underwater shock wave. *International Journal of Multiphysics*, 4(2), pp.113-124.
- Hicks, A.N., 1970. *Effect of bubble migration on explosion-induced whipping in ships*. Naval Ship Research and Development Center Technical Report No. 3301.
- Kim, J.H., 2007. Shock response analysis under underwater explosion for underwater ship using ALE Technique. *Journal of the Korean Society for Marine Environment Engineering*, 10(4), pp.218-226.
- Kim, S.B., Lee, K.J., Jung, D.H. & Park, T.H., 2014. Dynamic response analysis of pipe subjected to underwater explosion. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 34(1), pp.9-16.
- Kwon, J.I., Chung, J.H. & Lee, S.G., 2005a. Comparison of UNDEX whipping response of hull girder according to modeling method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp.631-636.
- Kwon, J.I., Chung, J.H. & Lee, S.G., 2005b. Whipping factor - a measure of damage potential of an UNDEX bubble pulse. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp.637-643.
- Livermore Software Technology (LSTC), 2020. *LS-Dyna Theory Manual*, URL: <https://www.lstc.com/products/lstc-dyna>. [Accessed 일, 월, 년]
- Lee, S.G., Kwon, J.I. & Chung, J.H., 2007. Integrated structural dynamic response analysis considering the UNDEX shock wave and gas bubble pulse. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.148-153.
- Lee, W.D., Jeong, Y.M., Choi, K.N. & Hur, D.S., 2019. Water wave propagation caused by underwater blasting in a 3D numerical wave tank. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(4), pp.364-376.
- Mair, H.U., 1999. Review: Hydrocodes for structural response to underwater explosions. *Shock and Vibration*, 6(2), pp.81-96.
- Price, R.S., 1979. *Similitude equations for explosives fired underwater*. Technical Report NSWC TR 80-299, NSWC.
- Snay, H.G., 1956. Hydrodynamics of underwater explosions. *in Symposium on Naval Hydrodynamics*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 325-352.
- Simulia, 2018. Abaqus User Manual.
- You W., Chae M., Park J., & Lim, Y., 2018. Potential explosion risk comparison between SMR and DMR liquefaction processes at conceptual design stage of FLNG. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(3), pp.213-214.

