

# 수중폭발 충격하중을 받는 잠수함 액화산소 탱크의 구조-유체 상호작용 기법에 관한 연구

김재현\* · 박명규\*\*

\*현대중공업(주) 선박해양연구소 구조연구실

\*\*한국해양대학교 해양시스템공학부

## A Study of Structure-Fluid Interaction Technique for Submarine LOX Tank under Impact Load of Underwater Explosion

JAE-HYUN KIM\* AND MYUNG-KYU PARK\*\*

\*Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

\*\*Div. of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Structure-Fluid Interaction 구조-유체 상호작용, Underwater Explosion 수중폭발, Submarine 잠수함, Liquified Oxygen (LOX) Tank 액화산소 탱크, Shock Factor 충격계수, ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian)

**ABSTRACT:** The authors performed the underwater explosion analysis for the liquified oxygen tank - a kind of fuel tank of a mid-size submarine, and tried to verify the structural safety for this structure. First, the authors reviewed the theory and application of underwater explosion analysis, using a Structure-Fluid Interaction technique and its finite element modeling scheme. Next, the authors modeled the explosive and sea water as fluid elements, the LOX tank as structural elements, and the interface between the two regions as the ALE scheme. The effect on shock pressure and impulse of fluid mesh size and shape are also investigated. Upon analysis, it was found that the shock pressure due to explosion propagated into the water region, and hit the structure region. The plastic deformation and the equivalent stress were apparent at the web frame and the shock mount of LOX structure, but these values were acceptable for the design criteria.

### 1. 서 론

잠수함의 설계에서 수중폭발 시 충격하중에 대한 구조물의 내충격 안전성 평가는 필수적이라 할 수 있다. 미 해군 등의 선진국에서는 실선 실험 등 수중폭발에 대한 연구가 이미 진행되어 실선 설계에 적용되고 있으나 국내 실정상 실선 실험이 어려운 관계로 수치해석 접근이 합리적일 것이다.

수중폭과 현상의 수치해석은 크게 2가지로 분류할 수 있다 (Scavuzzo 2000). 첫째는 충격계수 설계법인데 이는 충격 현상과 이로 인한 유체장의 거동에 대한 고찰로부터 충격파와 백동가스 구체에 의한 유체력을 이론적으로 추정하고 구조-유체 상호 작용을 점수 표면에 국한시켜 구조계의 거동을 수치적으로 해석하는 방법으로써 이중점근근사 기법(DAA : Doubly Asymptotic Approximation) (Geers, 1971)이 있다. 그리고 DAA 방법을 기반으로 유체장과 점수면에 경계요소법을 적용한 방법으로 Lockheed사에서 개발한 USA(Underwater Shock Analysis) code (Derunts et al., 1980)가 있는데, 이는 상용 프로그램인 LS-DYNA (Hallquist, 1999) 등과 연결하여 사용되기도 하며 현재 국내에서도 이를 이용한 활발한 연구가 진행되고 있다 (정정훈 등, 2000; 이상갑 등, 2001).

두 번째 수치해석 방법으로는 직접 해석법이 있는데 이는 구조물과 해수, 공기 등의 유체를 직접 모델링하여 한 영역에 위치시키고 특히 폭발 현상을 폭약 모델의 급격한 팽창에 의한 압력 발생으로 모델링하므로써 폭발 현상을 직접 모사하는 방법이다. 이 방법을 사용하면 폭발 현상, 충격과 전파 등의 실제 현상 모사가 가능하므로 다른 간략화된 근사해법에 비해 가장 엄밀한 해를 제공할 수 있는 장점이 있다. 다만 폭약 모델링이나 유체장의 모델이 매우 세분화되거나 요소의 크기에 민감하여 컴퓨터 수행시간이 아주 길어지는 단점이 있었다. 그러나 현재 컴퓨터의 급속한 발달로 과거에 힘들었던 작업이 손쉽게 수행되고 있는 실정을 감안한다면 이 방법에 대한 적용이 필요할 것이다.

본 연구는 수중폭과 해석의 직접 해석법으로 널리 사용되는 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법 (Yamaguchi, 1996)을 적용하여 수중폭과 현상을 모사하였다. 또한 본 저자는 함정의 공기 중 폭발에 대한 연구를 다수 수행한 바 있으며 (김재현과 박명규, 2003; 김재현 등, 2003) 이를 통하여 폭발 하중에 대한 영향을 설계에 반영할 수 있도록 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 이 기법을 적용하여 중형 잠수함의 연료저장 탱크인 액화산소 탱크에 대한 수중충격해석을 수행하여 구조물의 안전성을 확보하고 그 결과를 설계에 반영할 수 있도록 하고자 한다.

제1저자 김재현 연락처: 울산광역시 동구 전하동 1

052-230-5553 jhkim@hhi.co.kr

이를 위해, 먼저 수중충격해석 이론 및 그 적용성을 검토하고 구조-유체 상호작용 모델링을 이용한 해석 기법을 조사하였다. 또한, 수중충격해석을 위한 모델링 시에 요소 분할의 크기 및 분할 형상이 해석 결과에 미치는 영향을 파악하기 위한 선행 해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 액화산소 탱크의 수중충격해석을 수행하였다.

수중폭발 현상의 모사를 위해 상용 동적 과도응답 해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하였으며 본 연구에서는 폭발물과 주변 유체를 직접 모델링하여 폭발 압력의 전파 및 구조물의 응답을 모사하는 방법 연구에 중점을 두었다.

## 2. 구조-유체 상호작용 기법을 이용한 수중폭발 해석

### 2.1 수중폭발 시나리오 및 하중 산정

폭약 등이 수중에서 폭발할 때는 고온, 고압의 가스 구체가 생성되고 급격한 에너지의 방출을 통해 주위 유체를 교란시킨다. 이런 경우에 물은 상당한 정도의 부피 변화가 생기며 압축성 유동이 발생한다. 수중폭발에 의해 생긴 교란은 구상파(spherical wave)의 형태로 전파해 가는데 이를 충격파(shock wave)라 한다.

수중폭발에 의한 충격하중의 산정을 위해서는 Fig. 1과 같이 폭약과 함정의 위치 관계 및 주위 유체장과 바닥 경계, 자유수면 경계가 고려되어야 하는데, 이러한 기하학적 위치 관계를 'attack geometry'라고 한다. 수중폭발의 일반적인 내용에 대해서는 참고문헌(Scavuzzo, 2000. NAVSEA, 1995) 등의 기술 내용을 참조할 수 있다.

폭발원으로부터 거리  $R$  만큼 떨어진 임의의 한 점에서의 충격파의 압력 시간이력은 Fig. 2와 같이 지수 감소함수의 형태로 나타나며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p(t) = P_{\max} e^{-\frac{t-t_1}{\theta}}, \quad t \geq t_1 \quad (1)$$

최대압력  $P_{\max}$  및 감쇠상수  $\theta$ 는 폭발물의 중량  $W$  [lb] 및 폭발거리  $R$  [ft]의 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$P_{\max} = K_1 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1}, \quad [psi] \quad (2)$$

$$\theta = K_2 W^{1/3} \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2}, \quad [msec] \quad (3)$$

또한, 충격파의 단위 면적당 임펄스  $I$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^t p(t) dt \\ &= K_3 W^{1/3} \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_3}, \quad [psi-sec] \end{aligned} \quad (4)$$

TNT 폭약에 대한 실험상수 값은  $K_1=22505$ ,  $K_2=0.058$ ,  $K_3=1.798$ ,  $A_1=1.18$ ,  $A_2=-0.185$ ,  $A_3=0.98$ 이다(Scavuzzo, 2000).

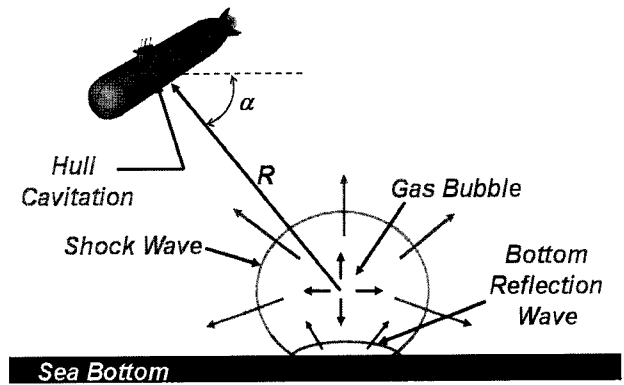


Fig. 1 Underwater explosion phenomena and attack geometry

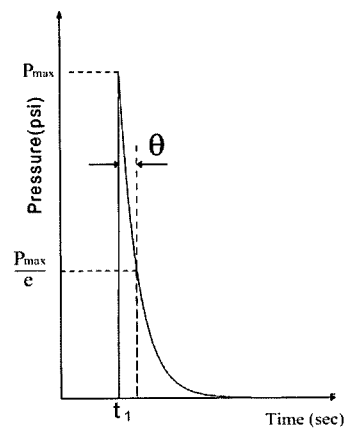


Fig. 2 Time history of a shock pressure

수중폭발에 의한 수중충격압력은 attack geometry에 따른 충격계수(Shock Factor, S.F.), 또는 용골 충격계수(Keel Shock Factor, K.S.F.)로써 평가될 수 있다.

$$S.F. = \frac{\sqrt{W}}{R'} \quad (5)$$

$$K.S.F. = \frac{\sqrt{W}}{R} \left( \frac{1 + \sin \alpha}{2} \right) \quad (6)$$

여기서,  $R'$ 은 폭약에서 선각(hull)까지의 직선 거리,  $R$ 은 폭약에서 용골(keel)까지의 직선 거리,  $\alpha$ 는 공격각도(angle of attack)이다. 본 연구에서는 충격 계수  $S.F. = 1.0$  ( $W = 100\text{kgf}$ ,  $R' = 10\text{m}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )을 선정하였다.

### 2.2 수중폭발해석 기법

본 연구에서 적용하는 수중폭발해석 기법은 앞서 기술한 바와 같이 직접 해석법이며 그 중에서 구조-유체 상호작용(Structure-Fluid Interaction) 기법을 적용한다. 특히 액화산소 탱크의 충격해석에 앞서, LS-DYNA를 이용한 수중폭발 해석 시 프로그램의 신뢰성을 확보하기 위해, 선행 해석을 수행하였다. 즉 구상파 형태의 충격파 전파를 구현하고, 요소 분할 형상에 따른 응답의 변화를 확인하기 위해 3가지 모델에 대

한 해석을 수행하였다. 3가지 모델에 대한 특징 비교는 Table 1과 같고, 각 모델의 형상은 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 모델 I은 유체 영역만 모델링되었으며 크기는 지름 30m이다. 모델 II와 모델 III의 유체 영역 크기는 가로 20.8m, 세로 17.6m, 깊이 10.0m이며, 구조물은 깊이 방향으로 5m에 위치해 있고 폭약과의 거리는 10 m이다. 모든 모델에서 폭약은 100kg이 사용되었다.

Table 1 Characteristics of analysis models

mesh region		Model I	Model II	Model III
sea water mesh	shape	spherical (radiation)	box	box (radiation)
	number	77,000	57,000	510,000
	size[mm]	25-1000	400	25-200
explosive mesh	number	4096	1	4096
	size[mm]	25	400	25

폭약(Explosive)의 상태방정식

폭약의 경우에는 아래 식과 같은 지수 함수 형태의 Johnson-Wilkinson and Lee 상태방정식(EOS JW)을 사용하였다 (Carleone, 1998).

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (7)$$

본 연구에서 사용한 TNT 폭약의 총 중량은 100kgf이다. 식 (7)에서 상대체적  $V = \rho_o/\rho$  이며, 초기 밀도  $\rho_o = 1630 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho$ 는 임의의 시간에서의 밀도이다. JWL 상태 방정식 재료상수는  $A = 3.712 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,  $\omega = 0.3$ ,  $B = 3.231 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $R_1 = 4.15$ ,  $R_2 = 0.95$ , 초기 단위 체적당 내부에너지  $E = 7.0 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ , 그리고 폭발 속도  $d = 6930 \text{ m/sec}$ 이다.

해수(Sea water)의 상태방정식

해수의 경우에는 실험에 의한 선형 다항식(Linear Polynomial Equation) 근사 상태방정식(EOS Polynomial)으로 표현 한다 (Lee et al., 2000).

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (9)$$

본 연구에서 사용된 값은 초기 밀도  $\rho_o = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_0 = 0.0 \text{ Pa}$ ,  $C_1 = 2.036 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $C_2 = 8.432 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $C_3 = 0.14 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $C_4 = 0.4934$ ,  $C_5 = 1.3937$ ,  $C_6 = 0$ ,  $E = 3.84416 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ 이다.

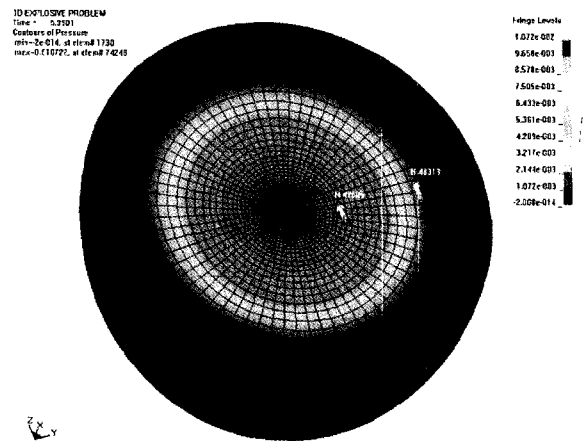


Fig. 3 Modeling scheme of model I and pressure shape of shock wave

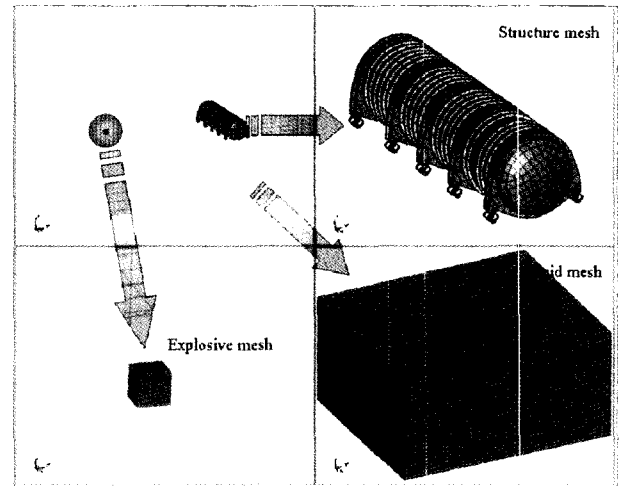


Fig. 4 Modeling scheme of model II

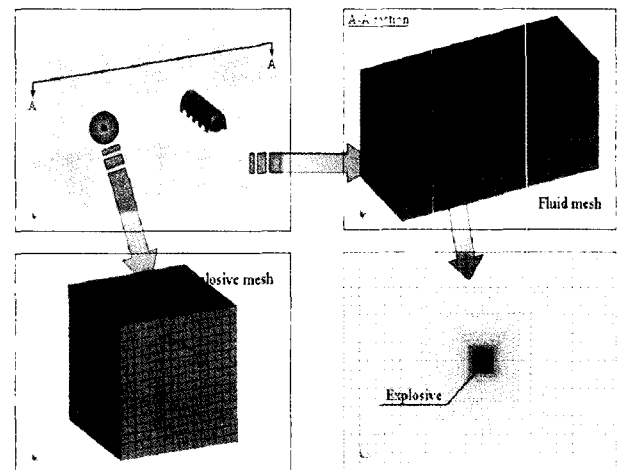


Fig. 5 Modeling scheme of model III

### 3. 액화산소 탱크의 충격강도 평가

본 해석 대상 중형 잠수함은 일반적으로 AIP(Air Independent Propulsion) 시스템의 운용을 위한 액화산소 탱크를 필요로 한다. Fig. 8에서 보이는 바와 같이, 액화산소 탱크는 압력선체 외부의 상부에 설치되어 있다.

이 탱크의 재질은 스테인리스강(stainless steel) 1.3964이다. 이 재료는 파단 연신율(breaking elongation)이 35% 이상이고, 부식에 강하며 저온에서도 좋은 연성(ductility)을 나타내는 기계적 특성을 갖고 있다. 재료 물성치로는 탄성계수 195,000MPa, 포아송비 0.3, 항복응력 430MPa, 최종강도 700MPa이다. Fig. 9는 8 절점 다면체 요소와 4 절점 쉘 요소로 구성된 액화산소 탱크와 충격 받침대의 유한요소 모델이다.

전체 해석 모델은 총 503,984개의 8절점 다면체 요소와 5,950개의 4절점 쉘 요소가 사용되었으며, 유체 영역은 앞의 선형 해석 모델 III를 사용하였다. 액화산소 탱크는 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 깊이 방향으로 5m에 위치해 있으며, 폭발물과의 거리는 10m이다. 구조 영역의 경계조건으로는 10개의 충격 받침대 하부를 모두 고정지지 하였으며, 무한 유체 영역은 주위 경계를 비반사 경계면(non-reflecting boundary surface)으로 설정하였다. 충격하중은 앞장에서 언급한 대로 충격계수 1.0을 사용하였다.

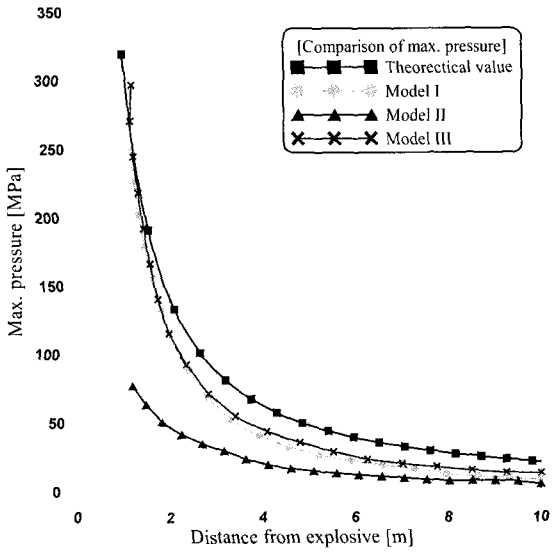


Fig. 6 Peak pressure vs. distance from explosive

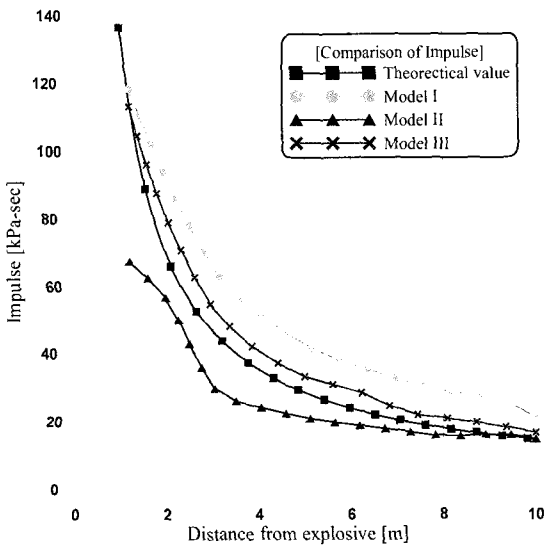


Fig. 7 Impulse vs. distance from explosive

Fig. 6은 폭약 중심으로부터의 거리에 따른 최대 압력  $P_{max}$  값들의 모델별 비교 그림이며, Fig. 7은 폭약 중심으로부터의 거리에 따른 임펄스  $I$ 를 비교한 그림이다. 충격파와 최대 압력의 경우에는 수치 시뮬레이션 결과가 이론치보다 대체로 낮은 경향을 보인다. 최대 압력의 경우, 폭발물을 세밀하게 분할하고 그 주위를 방사형 형상으로 요소 분할한 경우(모델 II, III)에 이론치에 근접하였으며, 폭발물 주위 뿐만 아니라 전 유체 영역에 걸쳐 세밀한 요소 분할이 이루어질 경우(모델 III) 임펄스에 있어서도 이론치에 근접하였다. 그러므로, 수중폭발 해석을 위한 모델링 시에는 특히 폭발물을 요소 크기가 25mm 정도 되도록 세밀하게 분할하고, 폭발물 주위를 포함한 유체 영역 전반에 걸쳐서도 충분한 요소 분할이 이루어져야함을 알 수 있다.

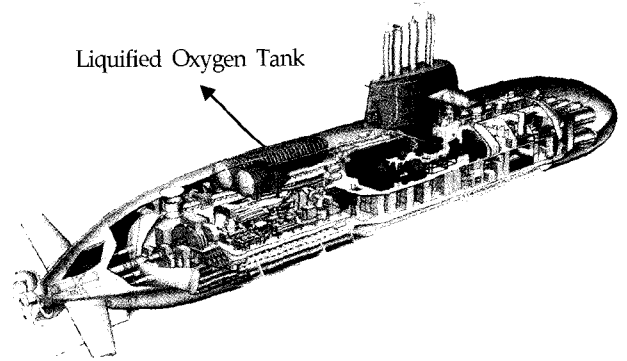


Fig. 8 Configuration of mid-size submarine

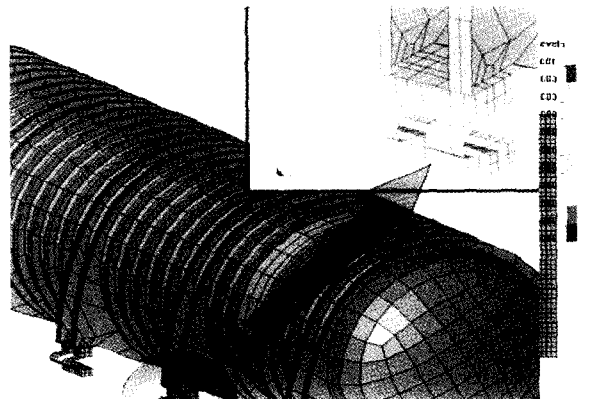


Fig. 9 Finite element modeling of the LOX tank

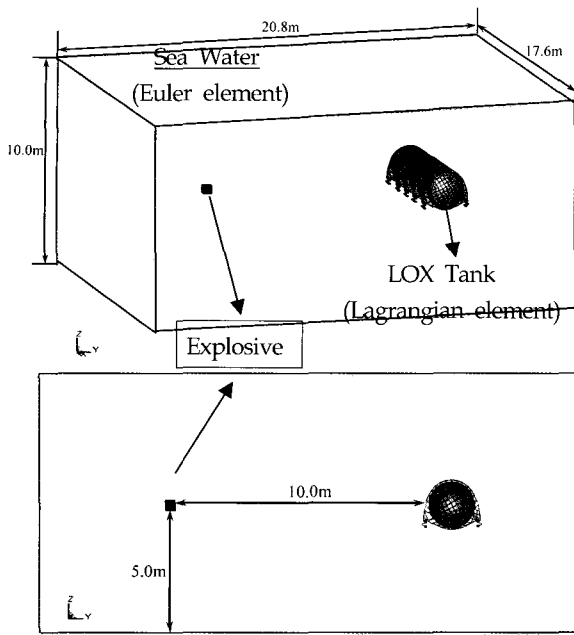
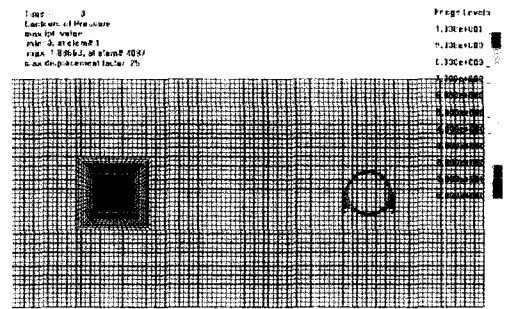


Fig. 10 Structure-fluid interaction modeling of the LOX tank

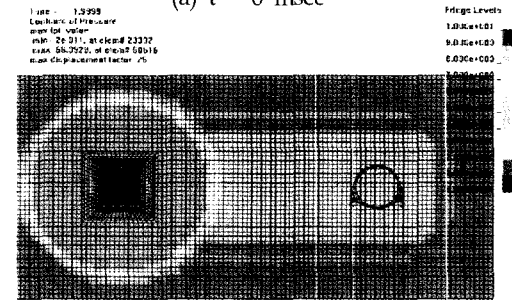
본 해석에서는 깊이에 따른 수압 및 해저면에서의 반사파, 그리고 액화산소 탱크의 자중은 무시하였다. 또한, 액화산소 탱크가 장착되어지는 잠수함의 압력선체도 해석 대상에서 제외되었으며, 탱크 내부의 액화산소는 해석의 편의를 위해 외부 유체와 동일한 것으로 가정하였다.

Fig. 11은 폭발에 의한 충격파가 유체 영역을 전파하여 액화산소 탱크 구조에 의해 산란되는 모습을 보여주고 있다. 그림에서 보면 초기 폭발 후 구상파의 압력파가 발생하여 전파되는 모습을 볼 수 있으며, 음속으로 전파되어 폭발 후 6 msec 때 압력파가 구조물에 전달되고 있다. Fig. 11(d)는 압력파가 구조물에 도달되는 순간의 모습이며 이 때의 압력파는 평면파가 아니고 초기 구상파가 아직 유지되고 있음을 볼 수 있는데 이는 폭발 거리(stand off distance)가 10m 내외의 근접 폭발인 경우는 압력파가 평면파가 아닌 구상파로 적용해야 함을 알 수 있다. 즉 일반적인 수중폭발 해석에서 적용되는 평면파의 가정은 폭발 거리 10m 이상의 원거리에서 적용할 수 있으며, 10m 내외의 근거리 폭발에서는 본 연구에서 적용하는 기법으로 적용해야 정량적으로 정확한 해를 제공할 수 있을 것이다.

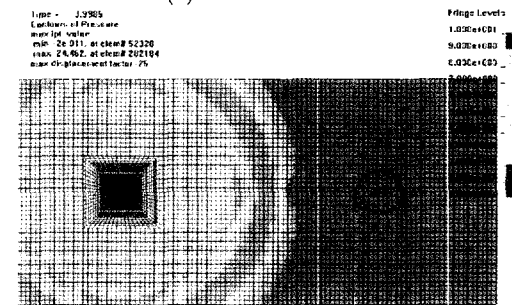
한편 본 해석의 결과에서 액화산소 탱크는 소성 변형의 경우 최대 발생 부위는 보강재 웹과 충격 받침대로서 각각 0.343 %와 1.337 %의 소성 변형률을 나타내었다. 그러나 재료의 파단 변형률이 약 35 %이고, 충격 받침대는 소성 변형을 허용하여 설계된 점을 고려할 때, 수중 폭발에 의한 액화산소 탱크의 소성 변형량은 작다고 볼 수 있다. 동가응력의 경우에도 보강재 웹 및 충격 받침대에서 최대 응력이 발생하였다. 최대 응력값은 충격 받침대에서 약 433 MPa, 보강재 웹에서 424 MPa이며, 재료의 최종강도(700 MPa) 및 소성 설계된 충격 받침대를 고려할 때 강도상의 여유가 있는 것으로 판단된다.



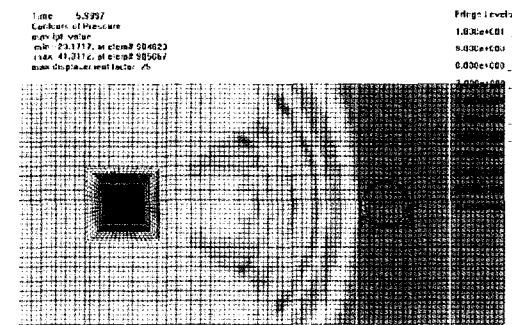
(a) t = 0 msec



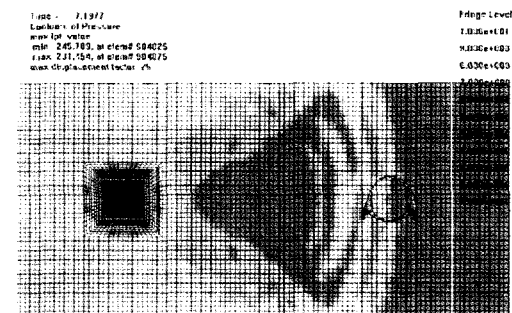
(b) t = 2 msec



(c) t = 4 msec



(d) t = 6 msec



(e) t = 7.2 msec

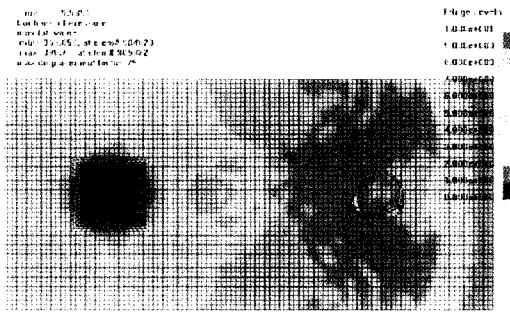
(f)  $t = 10$  msec.

Fig. 11 Propagation of shock wave(unit : MPA)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액화산소 탱크에 대한 수중폭발 해석을 수행하였다. 대상 구조물의 내충격 설계 기준 충격계수에 해당하는 수중폭발 조건에 대해 충격응답 수치 시뮬레이션을 수행하여 충격파에 따른 구조물의 응답 및 장비 받침대에 대한 내충격 안전성을 검토하였다.

수중 폭발물에 의한 충격하중의 영향을 파악하기 위해 수중충격 현상의 모사를 위한 이론 및 해석 방법을 조사하였고, 해석의 신뢰성 확인을 위해 실험 해석을 수행하고 이론식과 비교하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 해석결과를 통해 수치해석 모델 요소 분할시 크기 및 분할 형상에 따른 해석결과와의 차이를 규명하였다. 즉 수중폭발 해석을 위한 모델링 시에는 폭발물 등가 질량 100kgf을 기준으로 폭발물의 요소 크기가 최소 25mm 정도 되도록 세밀하게 분할하고, 폭발물 주위를 포함한 유체 영역 전반에 걸쳐서도 충분한 요소 분할이 이루어져야함을 확인하였다.
- (2) 폭발 거리가 10 m 내외의 근접 폭발인 경우는 압력파를 평면파가 아닌 구상파로 적용해야한다. 즉, 일반적인 수중폭발 해석에서 적용되는 평면파 이론은 폭발물이 원거리인 문제에서만 적용되어야 한다.
- (3) 액화산소 탱크에 대한 충격해석을 통하여 소성 변형 및 발생 응력을 확인한 결과, 소성 설계된 충격 받침대가 소성 변형을 통해 충격 에너지를 흡수하고 액화산소 탱크의 소성 변형량은 파단 기준보다 매우 작다. 따라서, 액화산소 탱크의 설계는 충격 받침대의 설계가 매우 중요한 설계 요소임을 확인하였다.

현재의 해석에서는 수중폭발 현상의 모사에 중점을 두었다.

향후 연구 과제로는 액화산소 탱크의 내부 유체 효과에 대한 고려, 충격 받침대가 부착된 압력 선체의 영향, 충격 하중으로 인한 탑재장비의 손상 발생여부 판단기법 등이 있다.

#### 참 고 문 헌

- 김재현, 박명규 (2003). "합정 설계의 생존성 향상 방안에 대한 연구(I) - Box gider를 고려한 설계 방법", 한국항해항만학회지, 제27권, 제2호, pp 199-207.
- 김재현, 신형철, 이경덕, 변정우, 박명규 (2003). "합정 설계의 생존성 향상 방안에 대한 연구(II) - ALE 기법을 이용한 손상 평가 방법", 대한조선학회추계논문발표집, pp 293-304.
- 이상갑, 권정일, 정정훈 (2001). "수중 구조물의 수중 폭발 충격 응답 해석 기법", 대한조선학회추계논문발표집, pp 289-293.
- 정정훈, 허영철, 김병현 (2000). "LS-DYNA/USA를 이용한 부유 구조물의 수중 폭발 충격 응답 해석", 대한조선학회추계논문발표집, pp 341-344.
- Carleone, J. (1993). Tactical Missile Warheads, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 155, AIAA.
- Deruntz, J.A., Geers, T.L. and Felippa, C.A. (1980). The Underwater Shock Analysis(USA ver. 3.0) Code, A Reference Manual, Lockheed Missiles & Space Co., Inc., Report No. DNA(Defence Nuclear agency) 5615F.
- Geers, T.L. (1971). "The Residual Potential and Approximate Methods for Three Dimensional Fluid-Structure Interaction Problem", J. of Acoustical Society of America, Vol 49.
- Hallquist J.O. (1999). LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Co.
- Lee S.G. Park, M.k. and Kwon J.I. (2000). "Shock Response Analysis under Underwater Explosion considering Cavitation", Proc. SNAK, pp 305-309.
- NAVSEA (1995). Shock Design Criteria for Surface Ships, Report No. 0908-LP-000-3010 Rev 1.
- Scavuzzo R.J. and Pusey H.C. (2000). Naval Shock Analysis and Design, SAVIAC.
- Yamaguchi A. (1996). "SPLASH Program for Three Dimensional Fluid Dynamics with Free Surface Boundaries", J of Computational Mechanics, Vol 18, pp 12-23.

2004년 12월 1일 원고 접수

2005년 2월 1일 최종 수정본 채택