



수중폭발에 의한 함정 충격응답 해석 현황

정 정 훈* 이 상 갑**

1. 서 론

전투라는 특수임무를 수행하는 함정의 생존성(survivability) 확보 측면에서 예상되는 적의 수중폭발 공격에 대한 대상함의 취약성(vulnerability) 평가는 함정 설계 시 고려해야 할 가장 중요한 사항중의 하나이다. 이를 위해서는 수중폭발에 의해 선체에 작용하는 충격하중과 이로 인한 선체의 충격응답을 정확히 예측하여 그 결과를 선체 구조설계 및 주요 탑재장비 선정에 반영하는 내충격 설계기술이 필요하다. 폭약, 핵무기 등이 선체에 직접 접촉 또는 근접하여 폭발하는 접촉성 폭발(contact explosion)의 경우는 선체구조에 치명적인 손상을 발생시켜 실제적인 대책마련이 매우 어렵기 때문에 함정의 내충격 안전성 관점에서 일반적으로 고려하고 있는 수중폭발의 조건은 선체로부터 어느 정도 떨어진 거리에서 일어나는 비접촉성 폭발(non-contact explosion)의 경우이다.

미국 해군의 경우 내충격 안전성이 요구되는 새로운 등급의 모든 수상함 개발에 있어서 시제함에

대하여 실선충격시험(ship shock trial)을 통한 수중폭발 충격에 대한 취약성 평가를 수행할 것을 의무화하고 있다. 그러나 실선충격시험을 수행하기 위해서는 막대한 비용이 소요되며 시험 특성상 재시험이 거의 불가능하고 환경영향의 최소화를 위한 과도한 과외비용 지출 등의 많은 현실적 어려움이 있다. 미국 해군을 비롯한 선진 해군국가에서는 이러한 실선충격시험의 보조자로서, 나아가서는 실선충격시험을 대체할 수 있을 정도로 정확한 충격응답 수치시물레이션 기술개발과 이의 활용에 대한 연구가 현재 활발히 수행되고 있다.

수중폭발에 의한 함정의 선체구조 및 탑재장비의 내충격 설계기술은 국방관련 기술이기 때문에 선진기술의 이전 및 습득이 매우 어렵기 때문에 독자적인 기술개발이 불가피하다. 그 동안 국내의 관련 연구를 통하여 어느 정도 핵심기반기술은 구축되어 있으나 관련 실적자료가 절대적으로 부족하다. 그 이외에도 국내에서 해결하여야 할 문제점들로서는 실험 결과와의 비교를 통한 해석 결과의 신뢰성, 해석결과의 평가 및 내충격 설계로의

* 한국기계연구원 구조시스템연구부, 선임연구원
** 정회원 · 한국해양대학교 해양시스템공학부, 교수

feedback 등을 들 수 있다.

수상함과 같은 부유구조물의 수중폭발 충격파에 의한 충격응답해석을 보다 정확하게 수행하기 위해서는 충격파의 전파 시 인장 반사파(rarefaction wave)에 의해 자유수면과 접수 구조표면에서 각각 발생하는 광역캐비테이션(bulk cavitation)과 선각 캐비테이션(hull cavitation) 현상을 고려하여야 한다. 캐비테이션이 발생하면 순간적으로 유체와 구조가 분리되기 때문에 수중폭발에 의한 유체-구조 상호작용을 접수구조표면에 국한하여 취급하는 이중점근근사(doubly asymptotic approximation, DAA) 방법¹⁾을 원칙적으로는 적용할 수 없다.

이러한 캐비테이션 발생문제를 비교적 정확하게 취급하기 위한 한 방법으로서 Felippa 등²⁾은 캐비테이션이 일어나는 유체 영역에 대해서는 변위포텐셜에 기초한 유한체적요소로 이산화하고 이산화 된 경계면을 DAA 경계면으로 취해 나머지 유체 영역의 영향을 고려하는 방법을 제시하였으며, 이에 근거하여 CFA(cavitating fluid analyser) code를 개발하여 비교적 단순한 수학적 모델에 대해 그 유용성을 검증하였다. 그러나 당시의 전산기 환경으로 인하여 수상함과 같은 실제 구조물에 적용은 거의 불가능하였다.

90년대 중반부터 전산기 환경의 급속한 발전과 함께 explicit hydrocode인 LS/DYNA code와 앞에서 언급한 CFA code 및 DAA code인 USA(Underwater Shock Analysis) code를 연계한 LS-DYNA/USA의 개발을 통해 수상함 충격응답 해석의 새로운 계기를 마련하게 되었다. 최근 Shin³⁾은 LS-DYNA/USA를 이용하여 실선 충격시험 수치 시뮬레이션을 수행하고 실선 충격시험 결과와의 비교를 통해 본 해석 code의 유용성을 검증하였다. 한국기계연구원과 한국해양대학교에서도 충격응답 해석 고도화의 일환으로 LS-DYNA/USA를 함정 충격응답 연구에 활용하고 있다.^{4,5)}

여기서는 수중폭발 현상과 이로 인해 선체구조에 작용하는 충격하중 특성 및 LS-DYNA/USA의 이론적 배경과 사용 방법을 간략히 살펴보고, 이를 이용하여 자유수면에 떠 있는 비교적 간단한 3차원 Box-Girder에 대하여 일련의 수치계산을 통해 충격응답 특성을 검토하고자 한다.

2. 수중폭발 충격하중

2.1 수중폭발 현상⁶⁾

폭약, 핵무기 등의 수중에서의 폭발은 고온·고압의 가스구체(gas bubble)의 생성과 급작스런 에너지의 방출을 통하여 주위의 물에 교란을 발생시킨다. 이 경우 상당한 물의 파괴변화가 생기고 압축성 유동이 발생한다. 수중폭발에 의하여 야기된 교란은 폭발원 근방에서는 음속의 3~5배의 속도로, 그러나 어느 정도 거리를 통과하면서부터는 대략 음속으로 물 속을 구상파(spherical wave)의 형태로 전파해 가는데 이를 충격파(shock wave)라 한다. 충격파는 백색스펙트럼(white spectrum)을 갖는 충격하중으로 선체에 작용하여 고차모드의 과도응답(transient responses)을 발생시키며, 심한 경우 선체 국부구조 및 주요 탑재장비에 치명적인 손상을 입히게 된다.

충격파가 전파해 가는 동안 폭발 시 생성되어 주위 수압에 대해 주기적인 팽창·수축의 맥동(pulsating)운동과 부력에 의해 수직상승(migration)하는 가스구체는 맥동운동 각 주기마다 최소크기가 되는 시점에서 붕괴되며 이 때 가스구체 압력파(bubble pulse)를 반복적으로 발생시킨다. 가스구체의 맥동주기가 통상 함정 선체거더 상하방향 처차 고유주기와 비슷하기 때문에 가스구체 압력파는 함정 선체거더의 상하방향 보거동 운동 즉, 휘핑(whipping)을 유발시키며, 심한 경우 과도한 휘핑 굽힘모멘트로 인하여 함정 선체는 종강도를 상실할 수 있다.

Fig. 1은 폭발원으로부터 일정거리 떨어진 임의의 한 점에서 수중폭발에 의한 유체압력과 폭발 시 생성된 가스구체의 반경 및 수직상승 이동량의 시간이력을 개략적으로 보여주고 있다. Fig. 2는 수중폭발 시 자유수면 위에서 일어나는 물리적 현상을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 수중폭발 직후 발생한 충격파가 먼저 수면에 도달하면 스프레이 돔(spray dome)이 형성되고, 이어서 가스구체 압력파가 수면에 도달하면 스프레이 돔을 관통하는 물기둥(plume)이 형성된다.

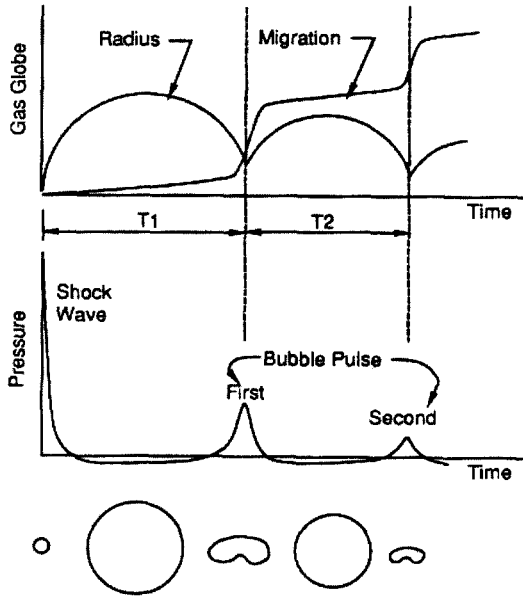


Fig. 1 Time history of pressure and gas bubble under UNDEX

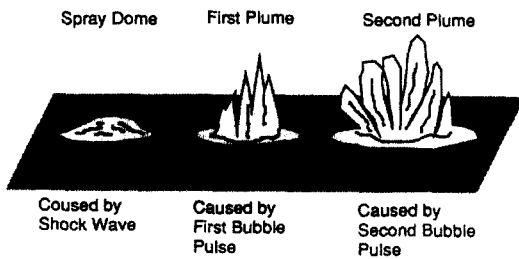


Fig. 2 Surface phenomena under UNDEX

2.2 충격파

폭발원으로부터 거리 R 만큼 떨어진 무한수역 내 임의의 한 점에서 충격파에 의한 유체압력의 시간이력은 다음과 같은 지수감소 함수의 형태로 표현된다.

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

여기서 P_{max} 는 폭발 시 최대압력, t_1 은 폭발원으로부터 이 지점까지 충격파의 도달시간, θ 는 감쇠상수(decay constant)이며, P_{max} 및 θ 는 폭약의 중량 $W(lb)$ 및 폭발거리(stand-off) $R(ft)$ 의 함수

로서 다음과 같이 주어진다.

$$P_{max} = K_1 \left(\frac{W}{R} \right)^{A_1} (psi)$$

$$\theta = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W}{R} \right)^{A_2} (msec) \quad (2)$$

여기서 K_1, K_2, A_1, A_2 는 폭약의 종류에 따른 실험상수이다.

충격파에 의한 물의 유동은 압축성이며 폭발원으로부터 일정거리를 통과하면서 음속으로 전파해 가므로 음향파 이론에 의해 기술될 수 있다. 따라서 압력 $p(t)$ 를 갖고 구상파의 형태로 전파에 가는 충격파에 의한 물입자의 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$u(t) = \frac{p(t)}{\rho c} + \frac{1}{\rho R} \int_0^t p(t) dt \quad (3)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, c 는 물 속에서의 음속이다.

한편, 물 속을 전파해 가는 충격파가 해저면 또는 자유수면과 같은 경계면에 도달하면 반사 또는 굴절하게 되며 경계면 근방에서의 유동을 기술하기 위해서는 이들 경계면의 효과를 고려하여야 한다. 특히, 수상함의 충격응답 해석을 정확히 수행하기 위해서는 자유수면의 영향을 고려하여야 하며, 이 문제에 대해서는 3장에서 상세히 기술한다.

2.3 가스구체 압력과

충격파가 지나간 후에는 방사속도를 갖는 후류(afterflow)가 발생하며 이후의 가스구체의 거동에 의한 유동은 비압축성 이상유체로서 취급할 수 있다. 자유수면의 영향을 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 image 가스구체를 도입하면 가스구체의 거동에 의한 임의의 점 P 에서의 속도포텐셜 ϕ 는 다음과 같이 주어진다.⁷⁾

$$\phi = \frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_1^2} \cos \theta_1 - \frac{e_1}{r_2} - \frac{e_2}{r_2^2} \cos \theta_2$$

$$e_1 = \frac{\dot{v}}{3}, \quad e_2 = -\frac{v}{2} \left(u_m + \frac{\dot{v}}{12d^2} \right) \quad (4)$$

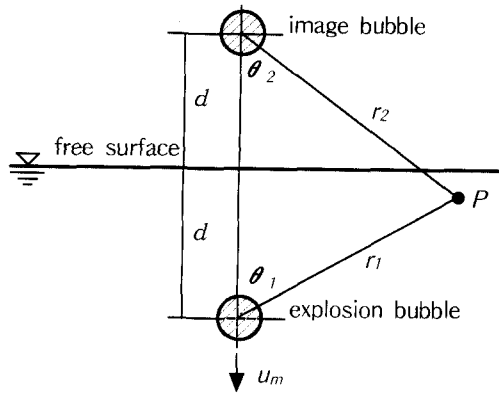


Fig. 3 Gas bubble under UNDEX

여기서 v 및 u_m 은 각각 가스구체의 부피 및 수직상승속도이며, 기타 기호는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다.

선체가 가스구체의 거동에 의한 유동에 영향을 주지 않는다고 가정하면 가스구체 반경방향으로의 유체압력 p_I 및 유체가속도 \dot{u}_I 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} p_I &= \rho \phi \\ \dot{u}_I &= -\nabla \phi \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 상첨자 (\cdot)는 시간에 대한 전미분(total derivative)으로서 $d/dt = \frac{\partial}{\partial t} + u_m \frac{\partial}{\partial y}$ 로 계산된다.

3. LS-DYNA/USA code

3.1 이론적 배경²⁾

LS-DYNA/USA를 이용하여 캐비테이션을 고려한 부유구조물의 수중폭발 충격응답해석을 위해 Fig. 4와 같이 3개의 연성계 즉, 구조계(S), 캐비테이션이 일어나는 유체영역(V)과 유체영역의 경계 즉, DAA 경계를 고려한다.

유한요소로 이산화 된 구조계의 지배방정식을 다음과 같은 행렬형태로 표시할 수 있다.

$$M_s \ddot{x}^s + C_s \dot{x}^s + K_s x^s = -G_s A_s (p_I + p_S) \quad (6)$$

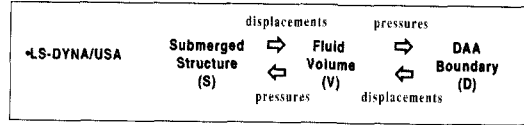
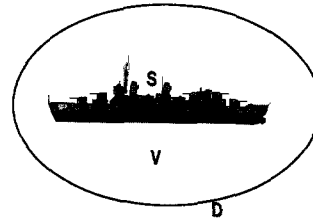


Fig. 4 Coupled problem in UNDEX shock response analysis of floating structures

여기서 M_s , C_s 및 K_s 는 각각 구조계의 질량, 감쇠 및 강성행렬, x^s 는 구조계의 변위벡터, p_I 및 p_S 는 각각 기지의 입사충격파에 의한 압력 및 미지의 산란파(scattered wave)에 의한 압력, G_s 는 구조계의 접수표면 자유도를 유체계의 유한체적요소의 표면자유도로 변환하는 행렬이고 A_s 는 구조계의 접수표면의 면적행렬이다.

캐비테이션을 고려하기 위해 캐비테이션이 일어난 유체영역이 거시적으로 균일하며 캐비테이션 발생시의 절대압력이 0이라고 가정하면 유체영역은 다음의 구성방정식을 만족한다.

$$\begin{aligned} p &= \begin{cases} p^H + c^2 s, & \text{if } s > -p^H/c^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ s &= -\rho \nabla d = \nabla^2 \Psi \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 p 및 p^H 는 각각 유체영역의 절대압력 및 정수압, ρ 및 c 는 각각 유체밀도 및 유체영역에서의 음속, d 는 유체입자의 정수압 변위에 대한 상대변위이고, s 및 Ψ 는 각각 densified relative condensation 및 변위포텐셜이다. 변위포텐셜을 미지변수로 하여 유한요소 정식화하면 유체영역에 대한 지배방정식을 다음과 같은 행렬형태로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_s + H\Psi &= b \\ \Psi &= p - p^H \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 Q 및 H 는 capacitance 및 reactance 행렬

로서 구조계의 질량 및 강성행렬 역할을 한다. 한편, b 는 3개의 연성계의 경계면에서의 상호작용을 나타내는 벡터로서 다음과 같이 주어진다.

$$b = b_s + b_d \quad (9)$$

여기서 b_s 및 b_d 는 각각 구조계 및 DAA 경계의 기여분으로서 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} b_s &= \rho A_s G_s^t x^s \\ b_d &= \rho A_d G_{dc} \Gamma_{dc} x^c \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 G_{dc} , A_d 및 x^c 는 접수구조요소와 유체 유한요소의 경계면에서와 같은 의미의 유체유한요소와 DAA 경계요소의 경계면에서의 값이고, Γ_{dc} 는 DAA 경계요소의 법선방향 방향여현 행렬이다.

한편, 식 (10)의 DAA 경계면에서의 변위 x^c 는 다음과 같이 계산된다.

$$x^c = x^{cl} + x^{cs} \quad (11)$$

여기서 x^{cl} 및 x^{cs} 는 각각 입사파 및 산란파의 기여분으로서 입사파가 구상파인 경우 x^{cl} 는

$$\Gamma_j x^{cl} = \frac{1}{\rho c} \Gamma_j p^{*cl} + \frac{1}{\rho} R^{-1} \Gamma_j p^{**cl} \quad (12)$$

으로 계산되며, x^{cs} 는 1차 이중점근근사 방법에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$\Gamma_j x^{cs} = \frac{1}{\rho c} p^{*cs} + M_c^{-1} A_c p^{**cs} \quad (13)$$

여기서 Γ_j 는 DDA 경계면에서 입사파 전파방향과 경계면 법선방향이 이루는 각의 방향여현 행렬, R 은 폭약과 DAA 경계면의 최단거리 행렬, M_c 및 A_c 는 각각 DAA 경계면에서의 부가수질량 및 면적 행렬이고, *는 시간적분을 나타낸다.

이상의 3개의 연성계의 지배방정식의 해를 구하기 위해 LS-DYNA/USA에서는 상호교환 해석방

법(staggered solution scheme)을 사용한다. 즉, 연성방정식을 동시에 푸는 것이 아니라 각각의 계가 독립적이라 가정하고 3개의 미지변수 x^s , p_s 및 x^c 중 하나를 전 시간단계의 값으로부터 외삽하여 가정해 다른 미지변수들을 계산하고 이로부터 가정해 미지변수를 계산하여 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 계산해 간다. 구조계 및 유체계의 해는 LS/DYNA3D에서, DAA 경계면의 해는 USA에서 풀어 간다. 구조계 및 유체계의 시간적분방법은 양해법(explicit method)을 사용하고, DAA 경계면의 해는 음해법(implicit method)를 사용한다. 유체영역에 케비테이션이 발생하면 유체계의 해가 불안정할 수 있기 때문에 LS/DYNA에서는 식(8)의 두 번째 식 대신에 가상의 감쇠를 도입한 다음의 식을 이용하고 있다.

$$\dot{\psi} = p - p^H + \beta h c^2 \dot{s} \quad (14)$$

여기서 h 는 시간적분을 위한 증분, β 는 가상감쇠계수로서 0에서 1사이의 값이다.

한편, 양해법을 이용하여 유체계의 해를 구하기 때문에 LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 충격응답해석에 있어서 안정된 해를 보장하기 위해서는 접수구조표면과 만나는 유체 유한체적요소의 크기가 매우 중요하며, 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{2\rho D}{\rho_s t_s} \leq 5 \quad (15)$$

여기서 D 는 유체 유한체적요소의 깊이, ρ 는 유체밀도이고, ρ_s 및 t_s 는 각각 접수 구조계의 밀도 및 두께이다.

3.2 LS-DYNA/USA code의 구성

LS-DYNA/USA code에서는 유체영역을 유한체적요소(Acoustic 요소)로 사용하는데 압력만을 변수로 하는 음파전달 요소로서 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 요소보다 계산 시간을 상당히 단축시킨다. 그러나 USA code로 인하여 영국

단위계(in, sec, lb)만을 사용하여야 하며, 해석시간의 대부분을 DAA 경계요소수가 지배하므로 이들 요소의 사용 개수의 제한 등이 있다. USA code는 크게 3개의 모듈(module)로 이루어져 있다.

- FLUMAS : 경계요소법에 의한 접수구조물의 부가질량 계산 모듈
- AUGMAT : FLUMAS의 계산 결과를 이용하여 1, 2차 DAA 방법으로 주어지는 상호교환 해석을 풀기 위한 augmented equation의 계수행렬을 계산하는 모듈
- TIMINT : 수중폭발에 의해 구조물에 작용하는 충격하중과 DAA 경계요소의 거동을 해석하는 모듈로서 LS-DYNA와 상호 연계하여 해석

4. 수치계산 예

자유수면에 떠 있는 비교적 간단한 3차원 Box-Girder를 수치계산 예로 택하였다. Fig. 5는 수치계산 모델의 특성치와 유한요소 모델을, Fig. 6은 수치계산을 위한 수중폭발 기하학적 조건을 나타내었다. Fig. 7에서와 같이 Box-Girder는 4절점 shell 요소(LS/DYNA3D의 Material Type 1 : Mat_Elastic)로, 유체영역은 8절점 solid 요소(LS/DYNA3D의 Material Type 90 : Mat_Acoustic)를 사용하였다. Fig. 7에서 보듯이 수치계산 대상 수중폭발 조건에 대해 계산된 광역케비테이션 영역이 수평방향으로 매우 넓기 때문에 이 영역을 모두 유한요소 모델링 하는 것은 매우 많은 계산시간이 요구된다. 여기서는 길이방향으로는 Box-Girder의 2배, 폭방향으로는 약 3.3배만큼 모델링 하였으나, 부유구조물의 수중폭발 충격응답은 수직방향이 매우 중요함을 고려하여 수직방향으로는 케비테이션 영역을 포함하도록 하였다. 또한 3.1절에서 언급한 바와 같이 해의 안정성을 보장하기 위해 Box-Girder의 접수표면과 만나는 유체 유한요소의 크기(이 경우 $D \leq 4.8in$) 4.0in로 택하여 접수구조표면과 만나는 지점에서부터 3개의 유체유한요소 층에 대해 모델링 하였으며, 나머지 영역의 유체 유한요소 크기는 8.0in로 택하였다. 해석은 10msec동안 수행하였으며 시간적분을 위한 증분은 1×10^{-5} 로 취하였다.

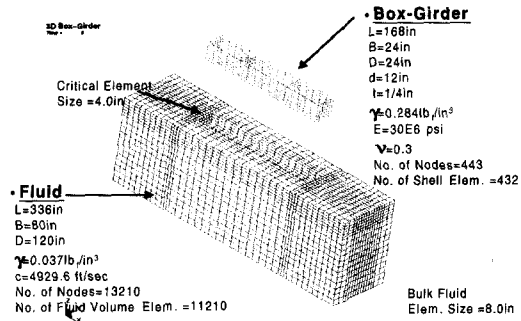


Fig. 5 Numerical example : 3-D Box-Girder

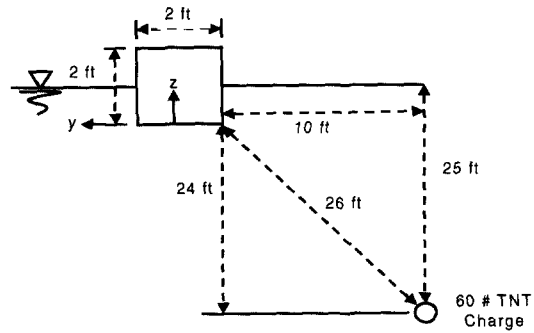


Fig. 6 UNDEX attack geometry

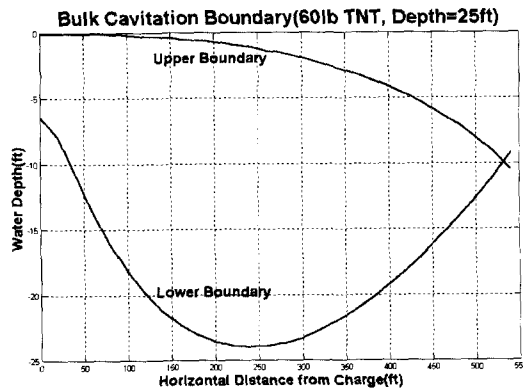


Fig. 7 Calculated bulk cavitation envelope

계산은 미국 실리콘 그래픽사의 Octane 워크스테이션(Dual CPU-10000 255MHz)을 사용하였다.

케비테이션이 충격응답 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이를 고려한 경우(cav on)와 고려하지 않은 경우(cav off)에 대하여 대표적인 유체영역(요소번호 278, Box-Girder 중앙부 바로 아래 요소)의 압력 시간이력과 구조계(절점번호 216,

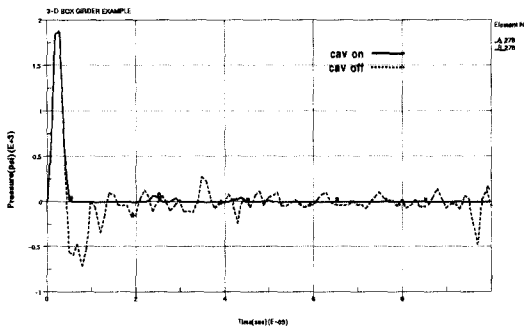


Fig. 8 Time history of pressure at fluid element 278

중양부 선저중양)의 수직방향 속도 시간이력을 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 도시하였다. 이들 그림에서 보듯이 0.5msec에서 캐비테이션이 발생하며, 이로 인해 선체와 유체가 순간적으로 분리되는 kick-off 현상이 발생하기 때문에 캐비테이션을 고려한 경우에 선체는 더욱 큰 수직속도를 얻게 되며, 캐비테이션을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 응답특성이 매우 다름을 알 수 있다.

5. 결 론

수중폭발 현상과 이로 인해 선체구조에 작용하는 충격하중 특성과 한국기계연구원과 한국해양대학교에서 충격응답 해석 고도화의 일환으로 현재 활용중인 LS-DYNA/USA를 이용한 수상함의 수중폭발 충격응답 해석방법에 대한 이론적 배경과 본 code의 구성요소를 검토하였다. 또한 비교적 단순한 3차원 Box-Girder에 대한 LS-DYNA/USA를 이용한 수치계산을 통하여 수상함과 같은 부유구조물의 수중폭발 충격응답해석을 위해서는 캐비테이션을 반드시 고려해야 되며, 이를 위해 LS-DYNA/USA는 매우 유용한 해석수단으로 판단된다.

현재 수행중인 함정 충격응답 해석연구에 이를 활용하고 있으며, 이를 위해 해석 모델링 기법 특히, 유체영역 모델링에 있어서 truncation의 영향 및 실제 함정의 매우 복잡한 선저 형상에 대한 효율적인 유체 모델링 방법에 대해 중점적으로 연구를 수행하고 있다.

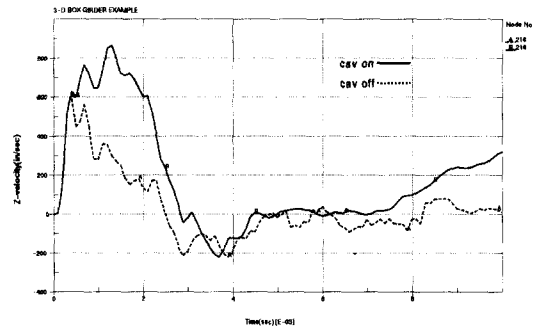


Fig. 9 Time history of vertical velocity at structural node 216

참 고 문 헌

1. Geers, T. L., "Doubly Asymptotic Approximations for Transient Motions of Submerged Structures", *J. of the Acoustical Society of America*, Vol. 64, No. 5, 1978
2. Felippa, C. A. and Derunz Jr., J.A., "Finite Element Analysis of Shock-Induced Hull Cavitation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 44, 1984
3. Shin, Y. S., "Total Ship Shock Modeling and Simulation Using LS-DYNA/USA", Proceeding of LS-DYNA User Conference 2000, Osaka, Japan, 2000
4. 정정훈, 허영철, 김병현, "LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석", 대한조선학회 추계 학술발표회 논문집, 2000
5. 이상갑, 권정일, 정정훈, "수상선의 수중폭발 충격응답에 대한 유체 모델링의 영향", 한국전산구조공학회 2001년도 봄 학술발표회 논문집, 2001
6. Cole, R. H., *Underwater Explosions*, Princeton University Press, 1948
7. Derunz Jr., J. A., Geers, T.L. and Felippa, C. A., "The Underwater Shock Analysis Code Version 3-A Reference Manual", Lockheed Missiles & Space Co., Inc., Report No. DNA5615F, 1980