

캐비테이션을 고려한 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석

이상갑^{†*}, 권정일^{*}, 정정훈^{**}

한국해양대학교 해양시스템공학부^{*}, 한국기계연구원 구조연구부^{**}

3-Dimensional Underwater Explosion Shock Response Analysis of a Floating Structure considering Cavitation Effects

Sang-Gab, Lee^{*}, Jung-Il, Kwon^{*} and Jung-Hoon, Chung^{**}

Division of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University^{*}
Department of Structural Engineering, Korea Institute of Machinery & Materials^{**}

Abstract

For an accurate shock response analysis of a floating structure such as a naval surface ship subjected to an UNDEX(UNDERwater EXplosion), the cavitation effects due to reflected wave at free surface and wetted structural surface should be considered. In this study, for the consideration of cavitation effects an effective method using LS-DYNA/USA and its theoretical background were presented. Through the application of the analysis of bulk cavitation phenomena in the free field, it could be confirmed that almost the same results were obtained between LS-DYNA/USA code and the analytical method. For the investigation of cavitation effects from the structural shock response characteristics, three dimensional UNDEX shock response analysis of an idealized ship model was also carried out. It could be found that the cavitation phenomena gave significant effects on the structural shock response characteristics, and especially that the shock loadings calculated at the installed location of shipboard equipment were underestimated in the case of no consideration of the cavitation effects, which might cause the severe mistake in its shock-resistance design.

※Keywords: UNDERwater EXplosion(수중폭발), shock response analysis(충격응답 해석), bulk cavitation(광역 캐비테이션), hull cavitation(선각 캐비테이션), floating structure(부유구조물), LS-DYNA/USA(범용 구조물 수중폭발 충격해석 프로그램)

접수일:2003년 10월 21일, 승인일:2003년 11월 21일

† 주저자, E-mail: sglee@mail.hhu.ac.kr

Tel:051-410-4306

1. 서론

전투라는 특수임무를 갖는 함정의 설계 및 건조에 있어서 예상되는 적의 비접촉(noncontact) 수중폭발 공격에 대한 함정 선체구조 및 탑재장비의 내충격 안전성 확보는 함정의 생존성(survivability) 관점에서 고려해야 할 중요한 사항들 중의 하나이다. 함정 선체구조 및 탑재장비의 내충격 안전성 확보를 위해서는 수중폭발 충격하중에 의한 이들의 충격응답 특성을 정확히 예측하여 내충격 설계에 반영할 수 있는 정확한 충격응답 해석방법이 요구된다.

수상함과 같은 부유구조물의 수중폭발 충격파에 의한 충격응답 해석을 보다 정확하게 수행하기 위해서는 압축파인 충격파가 자유수면과 접수구조표면에 반사되어 생기는 인장파(rarefaction wave)에 의해 각각 발생하는 광역 캐비테이션과 선각 캐비테이션 현상을 반드시 고려하여야 한다. 현재까지 수중폭발에 의한 유체-구조 상호작용 해석방법으로써 가장 널리 사용되고 있는 이중점근근사(DAA, Doubly Asymptotic Approximation) 해석방법(Geers, 1978)은 캐비테이션이 발생하면 원칙적으로 적용될 수 없다. 캐비테이션 발생 순간부터 종료(closing)될 때까지는 유체와 구조가 분리되어 이들 사이에는 상호작용이 일어나지 않게 되는데, 유체-구조 상호작용을 접수구조표면에 국한하여 취급하는 DAA 해석방법으로는 이러한 캐비테이션 현상을 정확히 고려할 수 없기 때문이다.

Felippa and DeRuntz(1984)는 캐비테이션 발생 예상영역을 포함한 일부 유체영역에 대해서는 변위포텐셜에 기초한 유체유한체적요소로 이산화하여 캐비테이션을 고려할 수 있게 하고, 유한요소 모델링에 포함되지 않은 나머지 유체영역에 대해서는 이산화 된 유체경계면을 DAA 경계면으로 취하여 기존 DAA 해석방법을 적용하는 혼합방법을 제시함으로써 기존 DAA 방법의 제약성을 해결하였다. 이를 근간으로 캐비테이션을 해석할 수 있는 유한요소 유체해석 프로그램인 CFA(Cavitating Fluid Analyzer)를 개발하여 유한요소 구조해석 프로그램의 하나인 STAGS와 DAA 해석방법에 의거한 수중폭발 충격응답 해석 프로그램

인 USA(Underwater Shock Analysis)(Deruntz et al., 1980)를 연계한 STAGS-CFA-USA를 접수평판의 선각 캐비테이션 문제에 적용하여 제시한 방법의 유용성을 검증하였다. 그러나 당시의 전산기 환경으로 인하여 수상함과 같은 실제 구조물에의 적용은 불가능하였다.

90년대 중반부터 전산기 환경의 급속한 발전과 함께 상용 비선형 유한요소 구조해석 프로그램의 하나인 LS/DYNA(LSTC, 2001)에 CFA 프로그램의 기능이 추가되고 USA 프로그램을 연계한 LS-DYNA/USA(Shin and DeRuntz, 1996)가 개발되어 활용됨으로써 수상함 수중폭발 충격응답 해석에 새로운 전기를 마련하게 되었다. 최근 미국 해군의 경우, NAVSEA(NAVal SEA system command) 주관 하에 AEGIS급 함정인 DDG53의 실선충격시험과 동일한 수중폭발 조건에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하고 시뮬레이션 결과와 시험 결과의 비교를 통해 LS-DYNA/USA를 이용한 수상함 충격응답 해석방법의 유용성을 검증하였다(Shin, 2000). 국내에서도 2000년부터 LS-DYNA/USA를 도입하여(정정훈 등, 2000) 함정 시제함의 내충격 설계를 위한 충격응답 해석에 활용하고 있다(정정훈 등, 2001).

본 논문에서는 첫째, LS-DYNA/USA를 사용하여 캐비테이션을 고려한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석방법 및 관련 기본이론을 제시하였다. LS-DYNA/USA의 관련 매뉴얼들에는 이에 대한 설명이 거의 기술되어 있지 않기 때문에 이 분야에 관심 있는 연구자들에게 많은 도움을 주리라 생각된다. 둘째, LS-DYNA/USA의 유용성 검증의 한 예로써 구조물이 없는 즉, 자유필드(free field)에서 광역 캐비테이션 현상을 해석하고 그 결과를 기존의 해석적 방법(analytical method)으로 구한 결과(Costanzo and Gordon, 1983)와 비교하였다. 끝으로, 실제 함정과 거의 유사한 재원을 갖는 이산화된 부유구조물을 수치 계산 예로 택하여 캐비테이션을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 3차원 수중폭발 충격응답 해석을 수행하고, 캐비테이션이 충격응답 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 캐비테이션을 고려한 구조물의 수중 폭발 충격응답 해석방법 및 이론적 배경 고찰

LS-DYNA/USA를 이용하여 캐비테이션을 고려한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석을 수행하기 위해서는 Fig. 1과 같이 3개의 연성계 즉, 구조계(S), 캐비테이션 발생이 예상되는 영역을 포함하는 유한요소 모델링 대상의 유체영역(V)과 이 영역의 경계면, 즉 DAA 경계면(D)을 고려해야 한다.

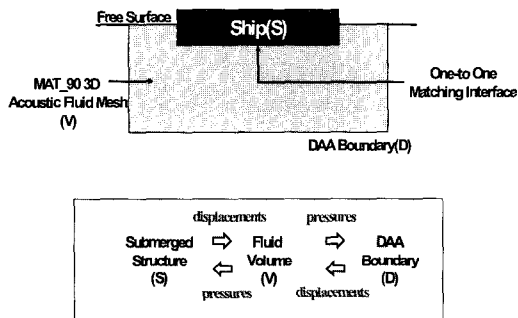


Fig. 1 Three coupled systems in the UNDEX shock response analysis of a floating structure using LS-DYNA/USA

유한요소로 이산화 된 구조계의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M_s \ddot{x}^s + C_s \dot{x}^s + K_s x^s = -G_s A_s (p_I + p_S) \quad (1)$$

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 점수구조표면 자유도를 유체유한체적요소의 표면 자유도로 변환하는 행렬, 그리고 A_s 는 점수구조표면의 면적행렬이다.

캐비테이션이 발생하여도 유체영역은 거시적 관점에서 균일하며 유체영역 내 한 지점의 절대압력이 0일 때 이 위치에서 캐비테이션이 발생한다고 가정하면 유체영역의 구성방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

$$s = -\rho \nabla d = \nabla^2 \psi$$

여기서 p 및 p^H 는 각각 유체영역의 절대압력 및 정수압, ρ 및 c 는 각각 유체밀도 및 유체영역에서의 음속, d 는 유체입자의 정수변위에 대한 상대변위, 그리고 s 및 ψ 는 각각 상대응축밀도(densified relative condensation) 및 변위포텐셜이다.

변위포텐셜을 미지변수로 하여 유한요소 정식화 하면 유한요소로 이산화 된 유체영역에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_s + H \Psi = b$$

$$\tilde{\Psi} = p - p^H \quad (3)$$

여기서 Q_s 및 H 는 각각 유체계의 질량 및 강성에 해당하는 행렬이다. 한편, b 는 3개 연성계의 경계면에서의 상호작용을 나타내는 벡터로서 다음과 같이 주어진다.

$$b = b_s + b_d \quad (4)$$

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

$$b_s = \rho A_s G_s^t x^s$$

$$b_d = \rho A_d G_{dc} \Gamma_{dc} x^c \quad (5)$$

여기서 G_{dc} , A_d 및 x^c 는 점수구조표면요소와 유체유한요소의 경계면에서와 같은 의미의 DAA 경계면에서의 값이고, Γ_{dc} 는 DAA 경계면 요소의 법선방향 방향여현 행렬이다.

한편, 식 (5)의 DAA 경계면에서의 변위 x^c 는 다음과 같이 계산된다.

$$x^c = x^{cl} + x^{cs} \quad (6)$$

여기서 x^{cl} 및 x^{cs} 는 각각 입사파 및 산란파의

기여분으로서 입사파가 구상파(spherical wave)인 경우 x^{cl} 는 식 (7)과 같이, 그리고 x^{cs} 는 1차 DAA 해석방법에 따라 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\Gamma_c x^{cl} = \frac{1}{\rho c} \Gamma_f p^{*cl} + \frac{1}{\rho} R^{-1} \Gamma_f p^{**cl} \quad (7)$$

$$\Gamma_c x^{cs} = \frac{1}{\rho c} p^{*cs} + M_c^{-1} A_c p^{**cs} \quad (8)$$

여기서 Γ_f 는 DDA 경계면에서의 입사파 전파방향과 경계면 법선방향이 이루는 각의 방향여현 행렬, R 은 폭약과 DAA 경계면의 최단거리 행렬, M_c 및 A_c 는 각각 DAA 경계면에서의 부가수 질량 및 면적행렬이고, *는 시간적분을 나타낸다.

이상의 3개 연성계의 해를 구하기 위해 LS-DYNA/USA에서는 상호교환 해석기법(staggered solution scheme)을 사용한다. 즉, 연성방정식을 동시에 푸는 것이 아니라 각각의 계가 독립적이라 가정하고 3개의 미지변수 x^s , p_s 및 x^c 중에서 하나를 전 시간단계의 값으로부터 외삽하여 가정한 후 다른 미지변수들을 계산하고, 이로부터 가정한 미지변수를 계산하여 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 계산한다. 구조계 및 유체계의 해는 LS/DYNA에서, DAA 경계면의 해는 USA에서 구한다.

유체영역에 캐비테이션이 발생하면 유체계의 해가 불안정할 수 있기 때문에 실제 해를 구하는 데 있어서는 식 (3)의 두 번째 식 대신에 가상의 감쇠를 도입한 다음의 식을 사용한다.

$$\dot{\Psi} = p - p^H + \beta h c^2 \dot{s} \quad (9)$$

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

또한 LS-DYNA에서는 양해법(explicit method)을 사용하기 때문에 안정된 해를 보장하기 위해서는 점수구조표면을 둘러싸는 첫 번째 층의 유체유한체적요소의 크기가 매우 중요하며, 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{2\rho D}{\rho_s t_s} \leq 5 \quad (10)$$

여기서 D 및 ρ 는 각각 유체유한체적요소의 깊이 및 밀도, ρ_s 및 t_s 는 각각 점수구조표면요소의 밀도 및 두께이다. 또한, 첫 번째 층의 유체유한체적요소의 표면은 점수구조표면과 1대1 대응이 되도록 모델링 하여야 한다.

LS-DYNA/USA를 이용한 충격응답 해석에서는 유체유한체적요소로써 각 절점의 압력만을 미지변수로 갖는 음향요소(acoustic element)를 사용하기 때문에 절점 당 6 방향의 변위를 미지변수로 갖는 일반적인 유체유한체적요소들을 사용하는 경우보다 해석에 소요되는 계산시간을 상당히 단축시킨다. 그러나 DAA 경계면의 해를 구하기 위한 USA에서는 음해법(implicit method)을 사용하기 때문에 충격응답에 필요한 전체해석시간은 DAA 경계면의 요소 수에 지배되며, 현재의 전산기 환경에서는 이들 요소 수가 5,000개 이내가 되도록 유체영역의 유한요소 모델링에 있어서 각별한 노력이 요구된다.

3. 자유필드에서의 광역 캐비테이션 현상 해석 및 고찰

선각 캐비테이션 문제와는 대조적으로 광역 캐비테이션 현상을 유한요소 해석방법을 적용한 연구사례는 저자들이 아는 범위 내에서 찾아보기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 LS-DYNA/USA를 사용하여 구조물이 없는 즉, 자유필드에서의 광역 캐비테이션 현상 해석을 수행하였다. 해석결과와의 비교·검토를 위해 Costanzo and Gordon(1983)의 연구에서 수치계산 예로 사용한 수중폭발 조건을 고려하였으며, Fig. 2에서와 같이 50,000lb HBX-1 폭약이 수심 300ft에서 폭발하는 경우이다.

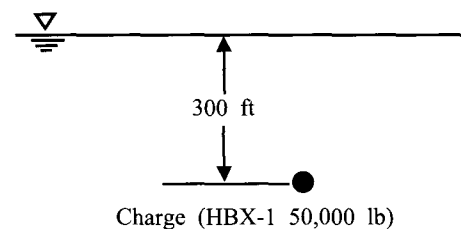


Fig. 2 UNDEX geometry for the analysis of bulk cavitation phenomena

앞에서 고려한 수중폭발 조건에 대해 Costanzo and Gordon(1983)이 제시한 해석적 방법에 따라 저자들이 계산한 광역 캐비테이션 발생영역의 상·하 경계선 위치와 캐비테이션이 종료되는 수심 및 시간을 각각 Fig. 3(a) 및 (b)에 도시하였다. 여기에서 알 수 있듯이 고려한 수중폭발 조건의 경우 자유수면과 폭약을 잇는 수직축에 대해 수평 방향으로 약 ±3,100ft, 수면 아래로는 약 110ft의 매우 큰 영역에 걸쳐 캐비테이션이 발생함을 알 수 있으며(실제 영역의 크기는 자유수면과 폭약을 잇는 수직축에 대해 상·하 경계선으로 둘러싸인 면적을 360° 회전시켜 얻어지는 부피만큼이 된다), 폭약으로부터 수평방향으로 850ft 떨어진 위치에서 캐비테이션이 가장 빨리 종료됨을 알 수 있다.

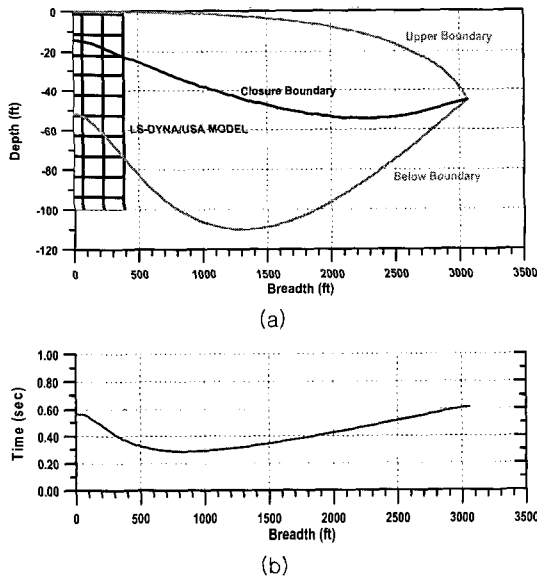
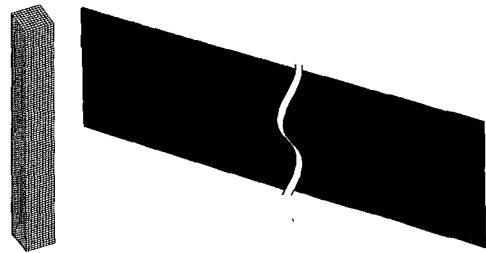


Fig. 3 Bulk cavitation envelope/cavitation closing depth and time for an UNDEX of 50,000lb HBX-1 explosive

LS-DYNA/USA를 사용하여 캐비테이션 발생영역이 모두 포함되도록 유체영역을 유한요소 모델링하여 해석하기에는 매우 많은 계산시간이 요구되기 때문에 본 논문에서는 Fig. 3(a)와 Fig. 4에서와 같이 캐비테이션 발생영역 중 일부분에 대해서

만 1차원 및 2차원 해석을 수행하였다. 1차원 해석에서는 폭약의 수직상방으로 가로와 세로의 길이가 10ft, 깊이가 100ft인 직육면체 모양의 유체영역에 대해 2장에서 설명한 8절점 정육면체 음향요소(크기 1ft×1ft×1ft)를 사용하여 유한요소 모델링하였다. 2차원 해석에서는 폭 800ft, 두께 1ft, 깊이가 100ft 크기의 유체영역에 대해 1차원 해석과 동일한 크기의 8절점 정육면체 음향요소를 사용하여 유한요소 모델을 생성하였다. 모델링 범위 내에서의 캐비테이션 하 경계선의 깊이를 충분히 포함할 있도록 하기 위해서 수심 100ft까지를 고려하였다.



(a) 1D Model (b) 2D Model
Fig. 4 Fluid finite element model for the analysis of bulk cavitation phenomena

Fig. 5에는 LS-DYNA/USA를 사용한 2차원 해석을 통해 계산된 광역캐비테이션 영역과 해석적 방법으로 계산된 영역을 함께 도시하였다. Fig. 5에서 보듯이 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

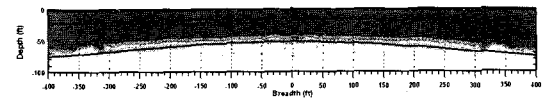


Fig. 5 Comparison of bulk cavitation zones between LS-DYNA/USA and analytical method

Fig. 6에는 2차원 해석을 통해 계산된 유체영역의 압력분포를 대표적인 시간대 별로 도시하였다. Fig. 6에서 보듯이 LS-DYNA/USA를 사용함으로써 광역 캐비테이션의 발생, 종료 및 종료 때 발생하는 폐쇄압력(closing pulse)의 생성 과정을 가시적으로 파악할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

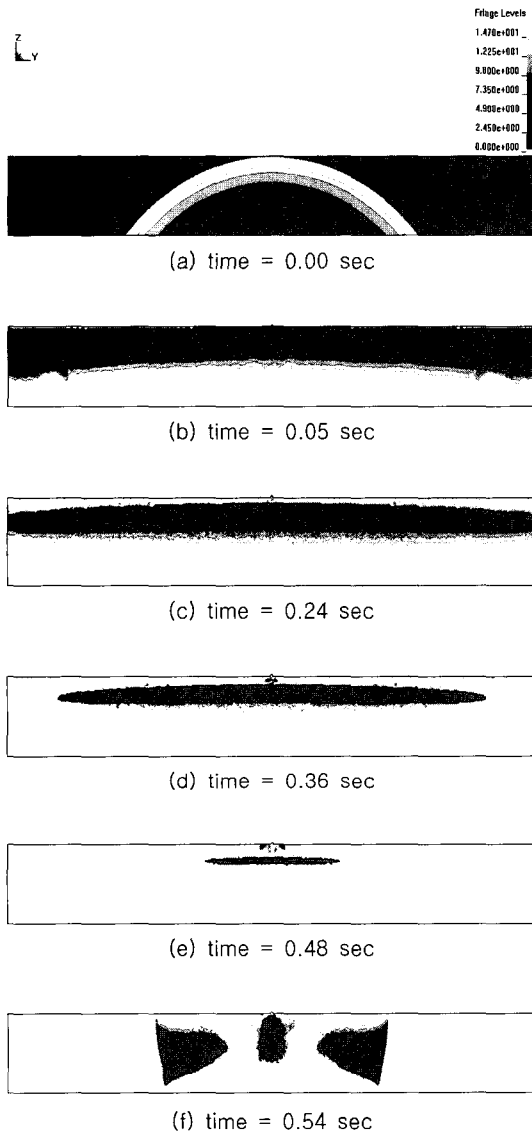


Fig. 6 Visualization of bulk cavitation phenomena using LS-DYNA/USA

Fig. 7에는 1차원 해석과 2차원 해석을 통해 폭약 수직상방의 수심 5ft 위치에서 계산된 압력시간이력을 함께 도시하였다. Fig. 7에서 보듯이 1차원 해석결과와 2차원 해석결과가 거의 같음을 알 수 있다. 또한, 0.565sec 때 광역 캐비테이션이 종료하는 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 3(b)에서의 해석적 방법으로 구한 결과와 일치함을 알 수 있다.

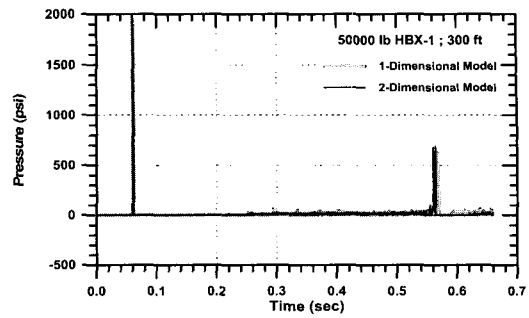


Fig. 7 Comparison of pressure time history at 5ft depth between 1-D and 2-D analysis

4. 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석 및 고찰

광역 캐비테이션이 구조물의 충격응답 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 실제 함정과 거의 유사한 재원을 갖는 이상화된 부유구조물에 대하여 광역 캐비테이션을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 3차원 수중폭발 충격응답 해석을 수행하고, 해석결과를 시간영역과 주파수영역에서 비교, 검토하였다.

해석을 위한 수중폭발 조건은 Fig. 8에 보인 바와 같이 15,000lb TNT 폭약이 대상구조물 중앙부 직하와 45° 경사각을 갖고 폭발하는 두 가지 경우를 고려하였다. 두 가지 폭발조건에 대한 용골충격계수(Keel Shock Factor, KSF) 값이 0.30이 되도록 폭약으로부터 구조물 용골까지의 최단거리(stand-off distance)를 결정하였다. 용골충격계수 값은 다음과 같이 계산 된다.

$$KSF = \frac{\sqrt{W(lb)}}{R(ft)} \times \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \quad (11)$$

여기서 w 는 TNT 폭약의 중량, R 은 stand-off distance, θ 는 Fig. 8에 보인 바와 같다.

대상구조물은 실제 함정과 거의 유사한 재원과 부재치수를 갖으며, 단면형상이 좌우대칭이고 길이방향으로 균일하도록 이상화시켰다. 이러한 단면특성을 고려하여 해석에 있어서는 길이방향으로 1/2 부분만 모델링하고 중앙단면 위치에 대칭조건을 부가하였다.

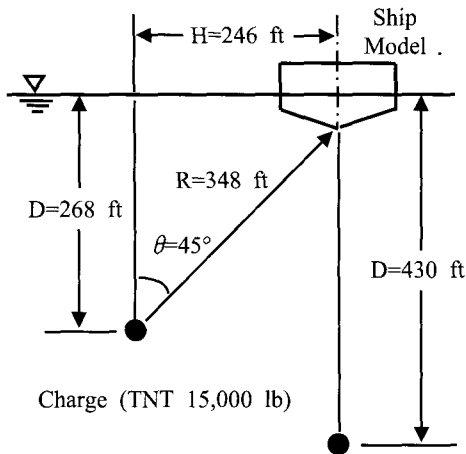
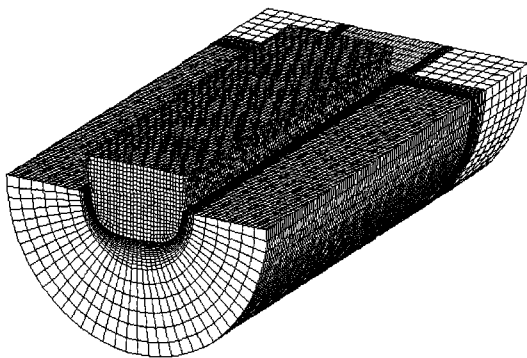
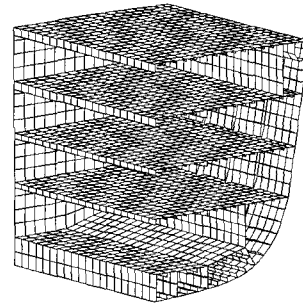


Fig. 8 UNDEX geometry for shock response analysis of idealized ship model

한편, 캐비테이션을 고려하기 위해 2장에서 설명한 바와 같이 주변유체를 포함하여 유한요소 모델링을 하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 이 경우에도 고려한 두 가지 수중폭발조건에 대한 광역캐비테이션의 상·하 경계선의 위치를 계산하여 광역 캐비테이션의 하 경계선의 깊이를 충분히 포함할 수 있도록 모델링에 포함할 유체영역의 범위를 결정하였다(이상갑 등, 2002). 캐비테이션을 고려하지 않은 경우는 주변유체를 모델링에 포함시키지 않고 접수구조표면을 DAA 경계면으로 하여 해석을 수행하였다. 모든 경우의 해석에 있어서 구조물의 감쇠는 무시하였다.



(a) Finite element model for consideration of cavitation effects

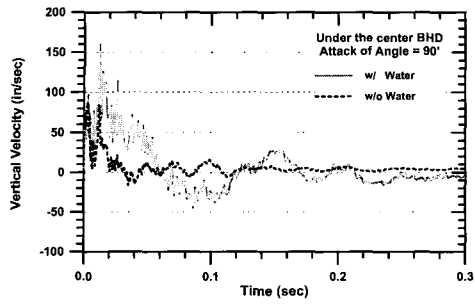


(b) Section of idealized ship model

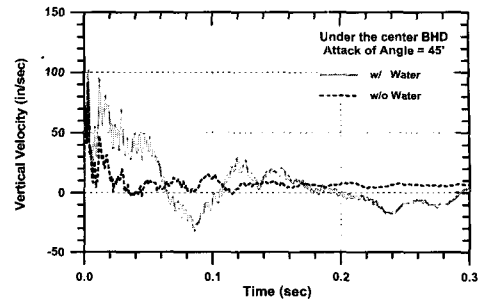
Fig. 9 3D UNDEX shock response analysis model of idealized ship model

Fig. 10 및 11에는 대상구조물의 대표적인 위치에서 계산된 수직방향 속도 시간이력을 도시하였다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 캐비테이션을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 수직방향 속도 시간이력이 매우 다름을 알 수 있다. 캐비테이션을 고려하지 않은 경우 구조물의 수직방향 속도는 입사충격파가 도달한 직후 최대가 되며, 이후 중력가속도보다 훨씬 큰 가속도로 급격히 감소한다. 반면, 캐비테이션을 고려한 경우에는 약 10msec에서 발생한 캐비테이션으로 인해 순간적으로 구조물과 유체가 분리되면서 추가의 수직방향 킥오프(kick off) 속도를 얻게 된다. 캐비테이션이 지속되는 동안에 구조물은 유체충격하중을 받지 않고 중력의 지배만을 받기 때문에 캐비테이션을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 천천히 속도가 감소한다(거의 중력가속도의 크기로 감속운동하게 된다). 한편, 동일한 용골충격계수 값을 갖는 경우 직하에서 폭발하는 경우가 경사를 갖고 폭발하는 경우보다 전체적으로 큰 충격응답을 발생시킴을 알 수 있다.

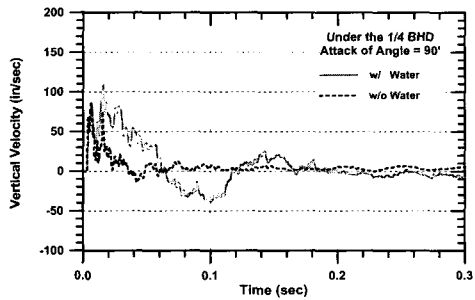
Fig. 12 및 13에는 Fig. 10 및 11과 동일한 위치에서 계산된 가속도 시간이력을 지지부(base) 기진력으로 하여 주파수 범위 1~1000Hz에서 계산된 의사속도(pseudo-velocity) 응답스펙트럼을 도시하였다. 응답스펙트럼을 계산하기 위해 모달 감쇠비는 2%로 가정하였다. 이들 그림에서 보듯이 캐비테이션을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 의사속도 응답스펙트럼은 특히, 20Hz 이하의



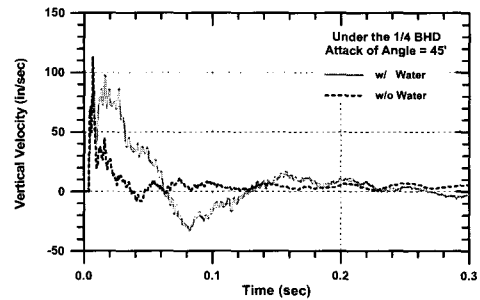
(a) under the center bulkhead



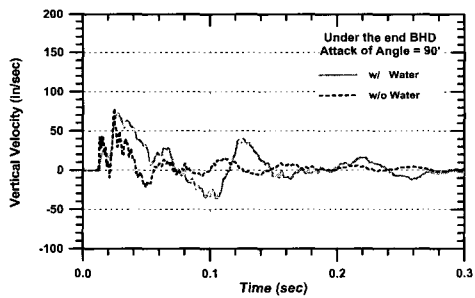
(a) under the center bulkhead



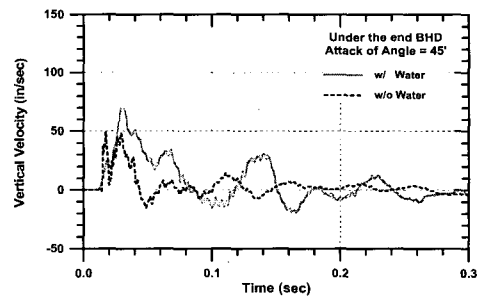
(b) under the 1/4 bulkhead



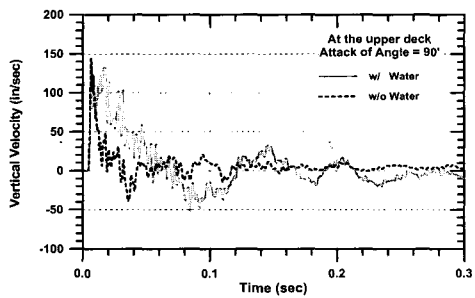
(b) under the 1/4 bulkhead



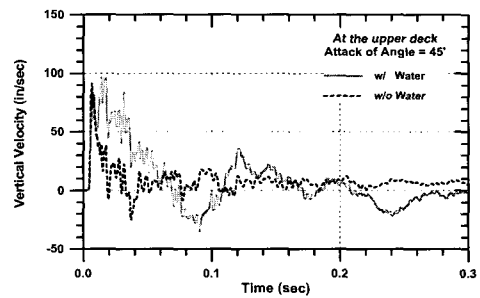
(c) under the end bulkhead



(c) under the end bulkhead



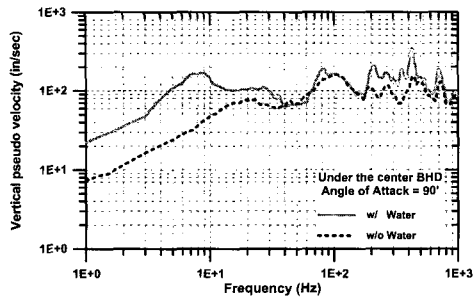
(d) at the upper deck



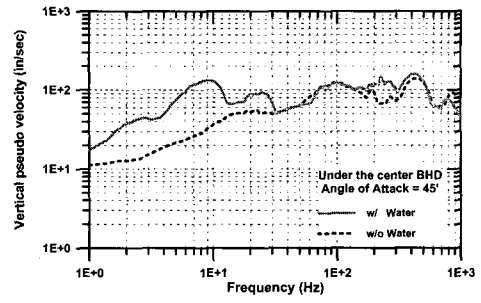
(d) at the upper deck

Fig. 10 Comparison of vertical velocity responses under the bottom attack

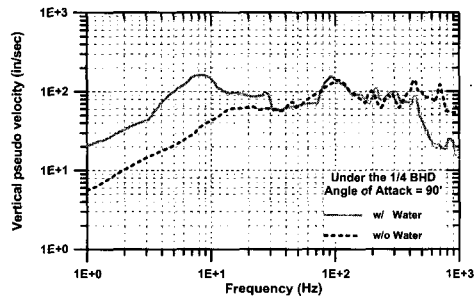
Fig. 11 Comparison of vertical velocity responses under the side attack



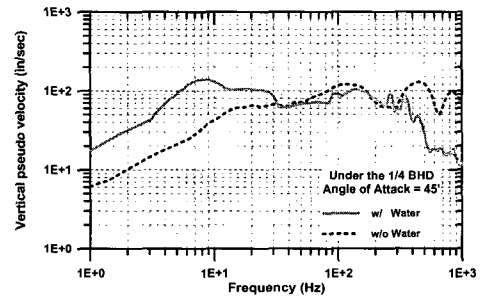
(a) under the center bulkhead



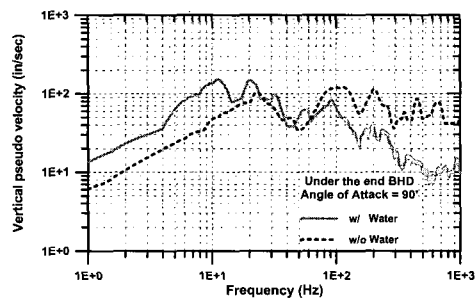
(a) under the center bulkhead



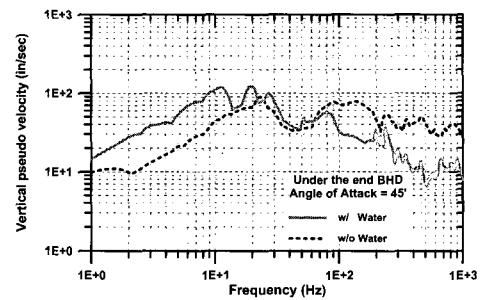
(b) under the 1/4 bulkhead



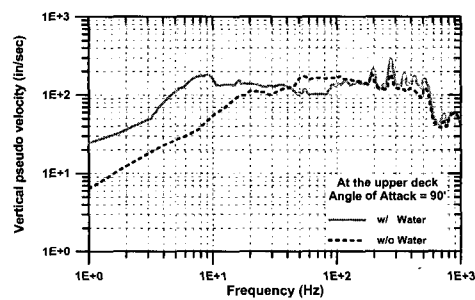
(b) under the 1/4 bulkhead



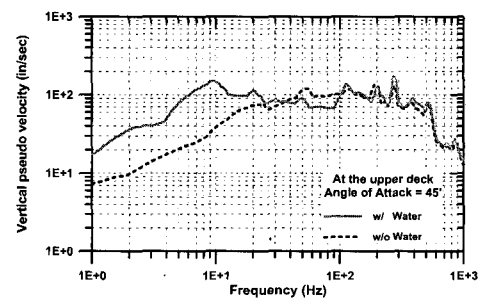
(c) under the end bulkhead



(c) under the end bulkhead



(d) at the upper deck



(d) at the upper deck

Fig. 12 Comparison of pseudo-velocity response spectrum under the bottom attack

Fig. 13 Comparison of pseudo-velocity response spectrum under the side attack

주파수 범위에서 많은 차이를 보이고 있다. 이 구간은 일정한 크기의 변위(의사속도 응답스펙트럼을 log-log 스케일로 표현했을 때 양의 기울기를 갖는 직선으로 표현된다) 지배하는 구간으로써, 캐비테이션을 고려한 경우에는 캐비테이션에 의한 추가의 수직방향 킥오프 속도로 인해 캐비테이션을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 큰 변위가 발생하게 된다. 따라서 20Hz 이하의 수직방향 고유진동수를 갖는 탑재장비가 받게 될 충격하중을 예측하는 데 있어서 캐비테이션을 고려하지 않으면 실제로보다 훨씬 작게 충격하중을 평가하게 되며, 이는 탑재장비의 내충격 설계관점에서 매우 위험한 결과를 초래할 수 있다. 특히, 진동/소음/충격 절연(isolation)을 위해 탄성마운트에 지지된 함정용 장비시스템의 경우 통상 최저차 수직방향 고유진동수가 10Hz 이내가 되도록 탄성마운트를 선정하게 되는데, 캐비테이션을 고려하지 않은 충격응답 해석결과를 바탕으로 탄성마운트의 허용변위를 결정한다면 실제 발생하는 충격변위가 허용변위를 초과하여 대상 장비시스템에 손상을 초래할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 LS-DYNA/USA를 사용하여 캐비테이션을 고려한 수상함과 같은 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석방법 및 관련 기본이론을 제시하고, 일련의 수치계산을 통하여 LS-DYNA/USA의 유용성 검토와 캐비테이션이 구조물의 충격응답 특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

자유필드에서의 광역 캐비테이션 현상 해석문제에 적용하여 기존 연구 결과와의 비교를 통해 LS-DYNA/USA가 선각 캐비테이션 문제뿐만 아니라 광역 캐비테이션 문제도 정확하게 해결할 수 있음을 확인하였다.

실제 함정과 거의 유사한 재원을 갖는 이상화된 부유구조물에 대해 3차원 수중폭발 충격응답 해석을 수행한 결과, 대상구조물의 충격응답 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 반드시 캐비테이션의 영향을 고려해야 함을 확인하였다. 특히, 본 수치계산의 경우 캐비테이션을 고려하지 않으면 20Hz 이하의 수직방향 고유진동수를 갖는 장

비시스템이 받게 될 충격하중의 크기를 과소평가하는 결과를 초래할 수 있음을 확인하였다.

끝으로, LS-DYNA/USA와 이를 이용한 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석방법은 함정 내충격 설계를 위한 충격응답 해석뿐만 아니라 엄청난 비용과 노력이 요구되며 시험 특성상 재시험이 거의 불가능한 실선충격시험의 시뮬레이션에 매우 유용하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원이 현대중공업(주)으로부터 위탁받아 수행 중인 "KDX-III 수중폭발 충격응답 수치시뮬레이션" 연구내용의 일부분임을 밝혀둔다. 이 기회를 빌어서 현대중공업(주) 관련 실무진과 한국해군에 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- 이상갑, 권정일, 정정훈, 2002, "구조물의 수중폭발 충격응답 해석을 위한 모델링 파라미터에 관한 연구," 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 507-513.
- 정정훈, 허영철, 김병현, 2000, "LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 341-344.
- 정정훈, 권정일, 이상갑, 이민형, 주용택, 2001, "주변 유체를 포함한 3차원 전선 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 390-392.
- Costanzo, F. A. and Gordon, J. D., 1983, "A Solution to the Axisymmetric Bulk Cavitation Problem," Shock and Vibration Bulletin, No. 53, pp. 33-51.
- DeRuntz, J. A., Geers, T. L. and Felippa C. A., 1980, "The Underwater Shock Analysis (USA-Version 3) Code, a Reference," LMSC-D633873, Lockheed Palo Alto Research Laboratory.
- Felippa, C. A. and DeRuntz, J. A., 1984,

- "Finite Element Analysis of Shock-Induced Hull Cavitation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 44, pp. 297-337.
- Geers, T. L., 1978, "Doubly Asymptotic Approximations for Transient Motions of Submerged Structures," J. of the Acoustical Society of America, Vol. 64, No. 5, pp. 1500-1508.
 - LSTC, 2001, LS/DYNA3D User's Manual, Version 960, Livermore Soft Technology Corporation.
 - Shin, Y. S. and DeRuntz, J. A., 1996, "Lecture Note : USA/LS-DYNA3D Software Training Course," Vol. V.
 - Shin, Y. S., 2000, "Total Ship Shock Modeling and Simulation using LS-DYNA/USA," Proceeding of LS-DYNA User Conference 2000, Osaka, Japan.



< 이 상 갑 >



< 권 정 일 >



< 정 정 훈 >