

해석모델링 방법에 따른 선체거더의 수중폭발 휘핑응답 비교

권정일^{†*}, 정정훈^{**}, 이상갑^{*}

한국해양대학교 해양시스템공학부^{*}
한국기계연구원 e-엔지니어링 센터^{**}

Comparison of UNDEX Whipping Response of Hull Girder according to Modeling Methods

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

Korea Maritime University, Division of Ocean System Engineering^{*}
Korea Institute of machinery & Materials, e-Engineering Research Center^{**}

Abstract

One and three dimensional whipping response analyses of a naval surface combatant subjected to an underwater explosion bubble pulse were carried out to compare the efficiency and accuracy according to the modeling methods. In 1-D analysis, program UNDEXWHIP developed by KIMM was used, which is based on the thin-walled Timoshenko's beam theory and on the modal analysis method using wetted vibratory modes of the hull girder. In 3-D analysis, three finite element models were suggested using LS-DYNA/USA code, such as 3-D beam model considering geometric shape of wetted side shell, coarse and fine 3-D F.E. models. Through the comparison of results from the 1-D and 3-D analyses, it could be confirmed that 1-D analysis result is in good agreement with 3-D analysis ones, and that fine 3-D F.E. model, shock analysis one, is also used both in the shock response and whipping response analyses for the analyst effort and time savings.

※Keywords: Whipping response(휘핑응답), UNDerwater eXplosion(UNDEX, 수중폭발), Bubble pulse(가스구체 압력파), Shock response(충격응답), Hull girder(선체거더)

1. 서 론

수중폭발 시 생성된 고온·고압의 가스구체는

주위 수압에 대해 주기적인 팽창·수축의 맥동운동과 부력에 의해 수직상승을 하면서 각 맥동주기마다 최소크기가 되는 시점에서 주위 유체에 압력파를 방사한다. 이때, 가스구체 맥동운동의 주기는 함정 선체거더의 저차 상하방향 고유진동 주기와 비슷하다. 이로 인해 가스구체 압력파는 선체거더의 상하방향 보 거동(*beam-like behavior*) 응답

접수일: 2005년 6월 27일, 승인일: 2005년 8월 10일

† 주저자, E-mail: jikweon@bada.hhu.ac.kr

Tel: 051-410-4934

즉, 휘핑응답을 유발시키며, 심한 경우 과도한 휘핑 굽힘모멘트로 인하여 선체거더는 종강도 관점에서 치명적인 손상을 입을 수 있다. 이에 함정의 경우 수중폭발 휘핑에 대한 선체거더의 종강도 안정성을 고려한 설계가 요구된다.

함정 선체거더의 휘핑응답해석은 일반적으로 1차원 보유추 모델과 3차원 유한요소 모델을 이용한다. 이들 중 1차원 보유추 해석은 모델링과 선체거더의 전체 휘핑응답 평가가 용이하지만 해석 정확도의 신뢰성이 높지 않다고 평가되고 있다. 한편, 3차원 유한요소모델은 선체거더는 물론 국부 구조의 응답특성을 모두 파악할 수 있으나 상대적으로 모델링에 많은 시간과 노력이 요구될 뿐만 아니라 일부 국부 구조의 휘핑응답이 과도할 경우 선체거더 전체의 응답특성 파악이 곤란할 수 있다. 이로 인해 수중폭발 충격파로 인한 함정 충격응답 해석용 상세 3차원 유한요소 모델이 있음에도 불구하고 휘핑응답해석을 위한 별도의 3차원 유한요소 모델을 마련해야 되는 불편함이 있다.

본 논문에서는 수중폭발 가스구체 압력파에 의한 선체거더 휘핑응답 해석의 효율성과 정확도 향상 목적으로 접수 외판의 기하학적 형상을 고려한 3차원 보유추 모델을 제시하였다. 또한, 한국해군의 수상함(이하 대상함이라 함)에 대하여 상기 모델과 함께 1차원 보유추 모델, 국부 모드 효과를 가급적 배제한 3차원 전선 모델 및 국부 모드 효과를 고려할 수 있는 수중폭발 충격응답해석용 3차원 상세 전선 모델을 적용한 선체거더 휘핑응답 해석을 수행하고, 모델링 방법에 따른 선체거더 휘핑응답 해석의 효율성과 정확도를 비교·검토하였다.

2. 선체거더의 휘핑응답 평가를 위한 모델 및 해석방법

본 절에서는 대상함 선체거더의 휘핑응답해석을 위한 1차원 및 3차원 해석모델과 해석방법에 대해 상세히 기술하였다. 다만, 대상함의 구체적인 제원과 하중 및 수중폭발 조건은 보안상의 이유로 제시하지 않았다.

1차원 보 유추 해석을 위해 대상함 선체거더를

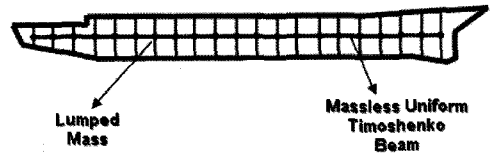


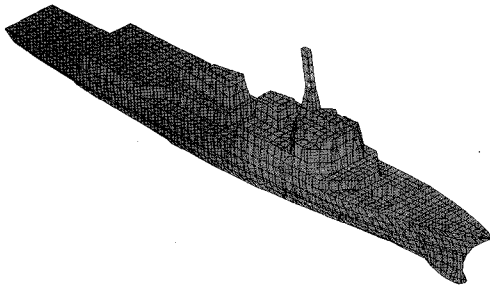
Fig. 1 One dimensional analysis model

양단 자유의 경계조건을 갖는 변단면 Timoshenko 보로 간주하고 Fig. 1에 보인 바와 같이 선체길이를 20등분하여 21개의 절점과 20개의 1차원 Timoshenko 보로 유한요소 모델링 하였다.

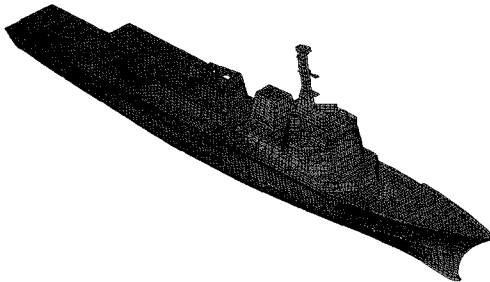
대상함의 하중은 21개의 절점에 집중중량으로 처리하였으며 이들 절점을 연결하는 보(beam) 요소는 질량이 없는 것으로 간주하였다. 각 Timoshenko 보 요소의 2차 단면모멘트와 단면적은 대표적인 선체단면에 대해 대상함을 설계한 조선소에서 계산한 값을 이용하였다. 그리고 유효전단계수, 진동차수에 따른 굽힘강성 수정계수, 하중 상태에 따른 2차원 부가수질량 및 진동차수에 따른 3차원 부가수질량 수정계수는 한국기계연구원 에서 개발한 선체거더 보·유추 진동해석 프로그램인 VIBHUL(정태영 등 1989)를 사용하여 계산하였다. 휘핑응답해석은 한국기계연구원에서 Timoshenko 보 이론과 모드중첩법에 의거하여 개발한 선체거더 보 유추 휘핑응답 해석 프로그램인 UNDEXWHIP(정정훈 등 1997)을 사용하여 선체거더의 상하진동 저차 5개의 고유모드만을 고려하여 수행하였다.

한편, 3차원 유한요소 해석에 있어서는 대상함 선체단면이 상하방향 중심축에 대해 비대칭이기 때문에 대상함 전체에 대해 3가지 종류의 해석모델을 작성하였으며, 해석 프로그램으로는 구조물의 수중폭발 충격응답 해석에 널리 사용되고 있는 상용 프로그램의 하나인 LS-DYNA/USA(Shin and DeRuntz 1996, 이상갑 등 2003, 정정훈 등 2000)를 사용하였다.

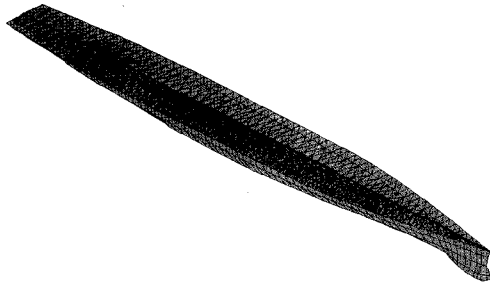
첫 번째 휘핑응답이 선체거더의 보 거동임을 고려하여 3차원 진동해석을 위한 해석모델과 마찬가지로 가급적 국부모드들(local modes)이 나타나지 않도록 Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 작성하였다. 두 번째 해석모델은 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같



(a) coarse F.E. model



(b) fine F. E. model



(c) 3-D beam model

Fig. 2 3-D analysis models

이 수중폭발 충격파에 대한 대상함의 구조안전성을 검토하기 위한 3차원 유한요소 해석모델(이 경우에는 국부모드가 매우 중요함)로서, 첫 번째 해석모델에 비해서 매우 상세한 해석모델이다. 세 번째 해석모델은 3차원 보 유추 해석모델인데, LS-DYNA/USA를 이용한 보 유추 해석을 위해서는 보 요소뿐만 아니라 부가수질량을 계산하기 위한 접수외판의 3차원 기하학적 정보가 반드시 필요하다. 따라서 Fig. 2(c)에 보인 바와 같이 대상함 선체거더는 등가의 3차원 보 요소들로, 하중은 보 요소들의 절점에 집중중량으로 모델링 하였으며, 부가수질량 계산을 위해 작성된 접수외판 요

Table 1 Number of nodes and elements in three kinds of 3-D analysis models

model		3-D beam model	coarse F.E. model	fine F.E. model
node		810	11,248	79,407
element	beam	69	10,708	45,348
	shell (4 node)	652	6,544	53,280
	shell (3 node)	34	467	3,364
	lumped mass	70	660	2,784
	DAA boundary segment	686	691	4,045

소들(물리적 특성을 갖지 않는 일종의 dummy요소 임)을 강체연결(rigid link)요소를 이용하여 보 요소 및 집중질량에 연결되도록 하였다.

3차원 해석에 사용된 유한요소 모델에 있어서 선체구조는 LS-DYNA(LSTC, 2001)에서 제공하는 Belytschko-Schwer 보요소와 Belytschko-Tsay 판(shell)요소로 모델링하였으며, 선체구조 중량을 제외한 탑재장비와 발라스트를 포함한 기타 중량은 해당 위치에 집중질량으로 처리하였다. 또한, 가스구체 압력파에 의한 유체-구조 상호작용을 접수구조 표면에 국한시켜 해석하는 2차 이중점근근사(doubly asymptotic approximation, DAA)방법(Geers 1978)을 사용하여 휘핑응답을 계산하였다. Table 1에는 3차원 해석에 사용된 3가지 해석 모델의 절점과 요소 개수를 나타내었다.

휘핑응답 해석을 위한 폭발위치는 Fig. 3에 나타난 것처럼 가장 큰 휘핑응답을 유발시키는 경우인 대상함 중앙단면 직하에서 폭발이 일어나는 경우를 고려하였다.

한편, 현재 사용되고 있는 가스구체 거동해석 이론(Hicks 1986)은 가스구체의 맥동운동 1차주 기 동안에 대해서만 비교적 정확한 결과를 주는 것으로 알려져 있기 때문에, 본 연구에서도 1차 가스구체 압력파에 의한 충격하중만을 고려하였

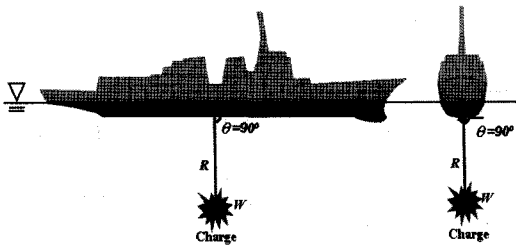


Fig. 3 UNDEX attack geometry

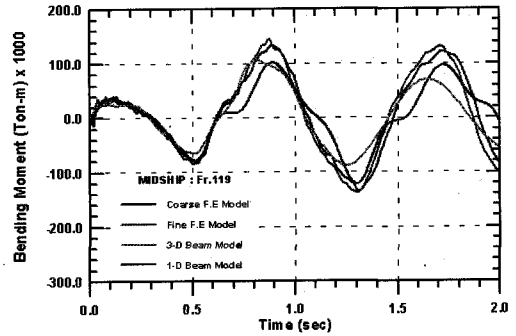
다. 또한, 모든 폭발조건에 대해 계산된 가스구체의 1차 맥동주기가 0.6초 이내임을 감안하여 대상함 선체거더의 휘핑응답 특성을 충분히 파악할 수 있다고 판단되는 2.0초 동안 계산하였다. 그리고 모든 해석에 있어서 감쇠로 인한 영향은 무시하였다.

3. 해석결과 및 고찰

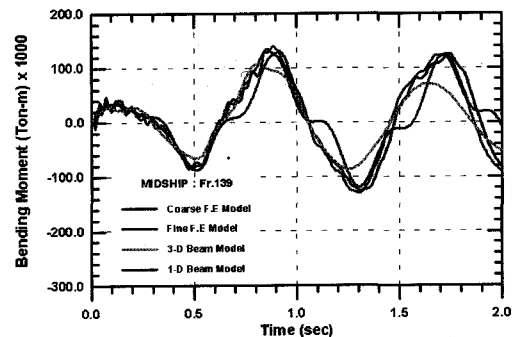
모델링 방법에 따른 대상함 선체거더의 휘핑응답 해석결과를 비교하고자 대상함 중앙부 근방의 선체단면 2곳(Fr. 119 및 Fr. 139)에서 계산된 휘핑 굽힘모멘트 시간이력을 Fig. 4에 나타내었다. 이때, 단면에 작용하는 휘핑 굽힘모멘트를 직접 구할 수 없는 3차원 유한요소 모델을 사용한 경우의 굽힘모멘트는 해당 단면의 주강판과 선저 위치에 있는 유한요소들에서 계산된 법선응력들의 평균값에 해당 단면의 단면계수 값을 곱하여 계산한 결과이다.

Fig. 4에서 보듯이 3차원 보 유추 해석결과가 나머지 3가지 경우와 비교하여 상대적으로 부합성이 다소 떨어지나 전체적으로 본 연구에서 고려한 모든 모델링 방법에 의한 계산결과들 간의 부합성이 양호하다고 판단한다. Fig. 5에는 3가지 종류의 3차원 해석모델을 사용하여 계산된 휘핑응답 변위를 대표적인 시간대별로 나타내었는데 대상함 선체거더의 휘핑응답은 상하방향 2절 고유진동형이 지배함을 확인할 수 있다. 아울러, 수중폭발 충격응답해석용 상세 유한요소모델을 이용한 경우에도 선체 거더의 휘핑거동을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

한편, Table 2에는 3가지 종류의 3차원 해석모



(a) Fr. 119



(b) Fr. 139

Fig. 4 Whipping-induced bending moment responses

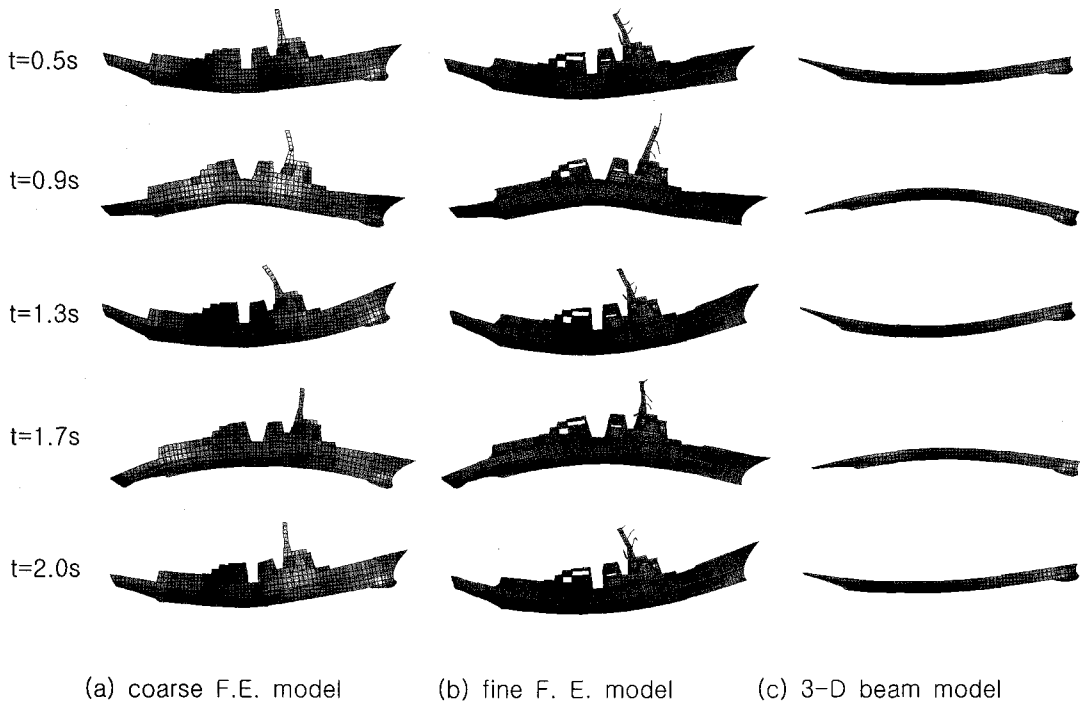
Table 2 CPU time in 3-D analysis

3-D analysis model	CPU time (hr/min/sec)
3-D beam model	00/08/16
coarse F.E. model	01/34/41
fine F.E. model	69/27/38

델을 사용하여 2초 동안의 휘핑응답을 계산하는데 소요된 연산시간(2.8GHz CPU를 갖는 펜티엄4급 PC 기준)을 나타내었는데 해석모델의 절점 개수의 증가에 따라 연산시간이 기하급수적으로 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 수중폭발 가스구체 압력파에 의



(a) coarse F.E. model (b) fine F. E. model (c) 3-D beam model
 Fig. 5 Comparison of the whipping displacements at typical time steps according to 3-D analysis models

한 선체거더의 휘핑응답해석을 위한 4가지 해석모델링 방법을 제시하고, 한국해군의 수상함에 대한 수치계산을 통해 해석모델링 방법에 따른 계산결과들 간의 부합성이 매우 양호함을 확인하였다. 이를 통해 1차원 또는 3차원 보유추 해석만으로도 수중폭발 휘핑에 대한 대상함 선체거더의 종강도 안전성 검토를 위해서 충분히 유용한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한, LS-DYNA/USA를 이용한 3차원 보유추 해석의 경우에는 탄성해석 뿐만 아니라 과도한 휘핑응답에 의한 탄소성 해석에도 적용이 가능하리라 판단된다.

한편, 통상의 진동해석과 전선 구조해석에 있어서 별도의 해석모델을 작성하여 해석을 수행하듯이 현재까지 수중폭발에 의한 3차원 충격응답 상세 해석에 있어서도 가스구체 압력파에 의한 휘핑응답 해석모델과 충격파에 의한 전선 충격응답 해석모델을 개별적으로 작성하여 해석을 수행하여 왔다. 그러나 본 연구에서 확인되었듯이 비록 많

은 계산시간이 요구되지만 전선 충격응답 해석모델을 사용하여 휘핑응답 해석도 병행하는 것이 최종적으로는 해석자의 노력과 시간을 줄여줄 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

- 이상갑, 권정일, 정정훈, 2003, "캐비테이션을 고려한 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회지, 제 40권, 제 6호, pp.1-11.
- 정정훈, 허영철, 김병현, 1997, "수중폭발 휘핑응답해석을 통한 선체거더 종강도 평가." 대한조선학회 춘계 학술대회논문집, pp. 429-433.
- 정정훈, 허영철, 김병현, 2000, "LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 추계 학술대회논문집, pp. 341-344.
- 정태영, 김병현, 김영중, 정정훈, 정종안, 1989, CSDP(I)-진동제어 시스템 개발, 한국기계연구소

선박분소 연구보고서 UCN 174-1320.D.

- 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.
- Hicks, A.N., 1986, "Explosion Induced Hull Whipping," Advances in Marine Structures, Elsevier Science Publishers.
- LSTC, 2001, LS/DYNA3D User's Manual, Version 960, Livermore Soft Technology Corp.

- Shin, Y.S. and DeRuntz, J.A., 1996, USA/LS-DYNA3D Software Training Course, Naval Postgraduate School(U.S.A).



< 권 정 일 >



< 정 정 훈 >



< 이 상 갑 >