

# 수상함 내충격 수치해석기술

이민형\*

## Full Surface-Ship Shock Modeling and Simulation

M. Lee

### Abstract

최근에 미국에서는 실선에 대한 충격과 실험의 제약으로 인하여 수치시뮬레이션의 필요성이 더욱 야기되어 1996년도부터 수상함에 대한 실험대체용 수치계산의 가능성에 대한 연구가 시작되었다. 잠수함등과 같이 잠겨진 구조물에 대한 연구는 활발히 이루어 졌으나 수상함에 대한 연구는 단순 구조물을 대상으로한 제한적 연구가 이루어져왔다. 특히 본 연구에서는 아주 복잡한 수상함 구조물을 최대한 정확히 유한요소법으로 모델링하였다. 이러한 실선 충격연구는 실제 실선에 마운트되는 주요 장비의 안정성평가에 아주 중요한 자료를 제공하여주므로 시급한 과제이다. 하지만 수상함의 경우 유체-구조물 상호작용, 자유표면, cavitation등과 같은 해석상의 어려움과 복잡한 구조물의 모델링시 나타나는 현 단계에서의 계산상의 한계 등등 여러 가지 난제가 존재하고 있는 것도 사실이다. 본 논문에서는 수상함 내충격 수치해석의 현기술을 알아보고 수치계산의 발전방향을 제시하고자 한다.

### 1. 서론

1950년대 이후 수중폭발현상과 이로 인한 수중 구조물의 거동현상 설명에 많은 연구가 진전되었다. 현재로는 육지 근해에서의 활동이 많은 관계로 구축함의 역할이 많아졌다. 특히 걸프전에서는 수중 폭발물에 노출되어있는 수중 및 수상구조물의 국부적인 피해뿐만 아니라 부수적인 whipping현상으로 인하여 주요 전자장비들이 무력화되기도 하였다 [1]. 이후로 마인 제거를 위한 여러 방편으로의 연구가 곳곳에서 활발히 다루어졌다. 또한 full scale의 수상함 수치계산기술의 발전이 요구되어졌다 [1].

수중폭발에 의한 잠수함과 같은 수중 구조물의 거동을 설명하기 위하여 우선 잠겨진 탄성의 이차원 실린더 또는 구의 거동 설명이 오래전부터 시도되었다 [2~5]. 이러한 연구결과는 복잡한 수치계산기법의 개발단계에서 검정자료로 활용된다 [6,7].

무한 유체를 가정하기 때문에 자유표면의 영향을 고려해야하는 수상구조물에 비해 해석시 상대적 간편성을 가진다. 또한 간단한 수상 구조물에 대한 공동 (cavity)운동에 의한 whipping현상의 해석이 시도되기도 하였다 [8].

Full scale 실선 충격실험은 경제적 그리고 환경적인 관점에서 여러 가지 장애요인을 많이 내포하고 있으나 현재에도 국부적으로 실시되어지곤 한다. 하지만 미래적인 관점에서 현 수치계산기술을 한단계 높여 장애요인이 많은 실험을 대체하는 기술로 발전시킬 필요가 있다. 이러한 맥락과 학문적인 근거로부터 미국에서부터 USA (Underwater Shock Analysis)프로그램이 구조해석 프로그램과 연계되어 70년대부터 사용되어지고 왔으며 많은 발전이 이루어졌다. 또한 최근의 빠른 컴퓨터 하드웨어의 발전은 수치계산가능성을 더욱 보여주고 있다.

이러한 배경에서 최근에 미 해군연구소와 해군 대학원에서 본 연구자가 참여하였던 구축함 전선 수치계산 프로젝트의 진행과정을 알아보면서 현

\* 세종대학교 공과대학 기계공학과

수치계산기술의 위치와 또한 발전이 요구되는 분야를 고찰해본다.

## 2. 수치계산방법

크게 수중 구조물의 내충격 해석에는 세가지 방법이 존재한다. 첫째로는 경계요소법으로 주위 유체를 모델링하지 않는다. 구조물과 충격파의 생성지가 큰 거리로 떨어져 있는 경우 매우 유효한 방법이다. 대표적인 방법으로 USA/LS-DYNA3D 프로그램인데 본 연구에서도 다루어졌었다. LS-DYNA3D는 잘 검증된 유한요소법을 사용하는 구조해석 프로그램이며 USA는 유체의 영향을 구조물에 가하는 interface 프로그램이다. 본 수치프로그램을 검증으로 엄밀해가 주어져있는 plane 입력파와 무한 실린더 또는 구형 탄성셀의 상호작용해석이 (참조 그림 1.) 시도되어 좋은 결과를 제시하였다 [9]. 또한 일차원 Bleich-Sandler Plate 문제가 해석되기도 하였다.

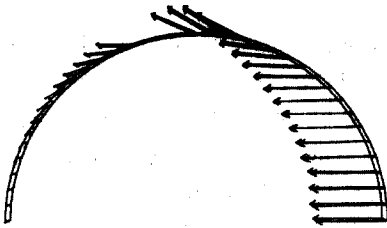


그림 1. 충격파에 의한 속도벡터, 무한 실린더.

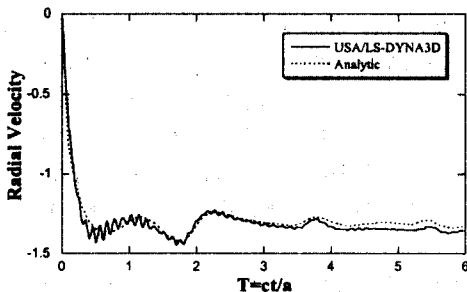


그림 2. 반경방향 속도 비교, 무한 실린더.

두 번째 방법으로는 cavitation과 같은 유체의 비선형 영향을 고려하기 위하여 구조물 주위에 유한한 영역의 유체 요소를 만들며 그 바깥 경계에 USA interface를 작동시킨다. 본 interface는 외부에서 생성된 파를 구조물에 전달시키며 구조물에 의한 반사파에는 non-reflecting 경계조건을 유지한다. LS-DYNA3D에는 유체를 MAT90 요소로 모델링하는데 이 요소는 수중에서의 음파전달요소 (acoustic element)로서 단지 압력만이 미지수이므로 계산시간을 단축시킨다. 본 요소는 압력이 음수가 되면 cavitation이 발생한 것으로 간주하며 cutoff시킨다. 프로그램에서는 단지 on/off 옵션으로 사용이 간편한 반면 다양한 cavitation 조건을 부과할 수 없다. USA는 NASTRAN에도 연계되어 있는데 유체를 모델링하기 위하여 복잡한 CFA 프로그램이 요구된다 [9]. 유체요소 또한 구조물과 같은 Lagrangian으로 기술되기 때문에 구조물과 유체의 경계에서 모든 node 점들이 일치시켜야 하는 (one-to-one match) 구조물 모델링 작업상 어려움이 있다.

마지막 방법은 General-Coupling기법인데 유체는 Eulerian으로 구조물은 Lagrangian으로 기술하여 이들을 연계한 상호작용해석 기법이다. 이는 상당히 효율적인 접근방법인데 특히 복잡한 수상함과 주위유체를 모델링시 매우 효율적이다. 본 기법은 MSC/DYTRAN 또는 AUTODYN 프로그램들에 구현되어 있으며 LS-DYNA3D에도 최근에 첨가되었다. 하지만 앞 두가지 프로그램과는 기법에서 다르며 결과는 아직 검증이 되지 않았다.

무한 실린더 또는 구형 탄성셀과 충격파의 상호작용 benchmark 문제들에 대한 검증된 수치기법들을 토대로 복잡한 실선 구조물의 수중 폭발 내충격 거동을 본 연구에서 수치해석적으로 기술하고자 한다. 수치해석결과는 수년전에 얻어진 실험자료와 비교하여 그 정확도를 조사함으로써 현 수치기술을 알아보고 발전이 요구되는 분야를 조사한다. 특히 중요한 연구내용으로는 수상함의 cavitation 영향이다. 그 영향은 실험치와 cavitation을 on 또는 off 시켜서 나온 수치결과를 비교함으로써 얻어지리라 본다.

### 3. 수상함 모델링 및 검정방법

수상함 (DDG53 class) 전선의 유한요소모델링이 (FEM) Gibbs & Cox, Inc.에서 만들어졌다. 결과 파일은 NASTRAN 입력파일의 형태로 만들어져 전달되었다. Electric Boats에서 만들어진 FEM을 검정하는 역할을 담당하였다. 만들어진 FEM의 입력 파일은 내충격 수치계산을 수행하는 Naval Postgraduate School (NPS)과 WAI 두 연구집단에 전달되었다. NPS에서는 USA/LS-DYNA3D 기법을 사용하며 WAI는 NASTRAN을 기초로한 자체개발 내충격 수치프로그램을 사용하였다.

전선 FEM은 약 35,000개의 grid로 이루어졌으며 각각 다음과 같은 요소들을 가진다. 보요소는 약 40,000개, 판요소 약 40,000개, 스프링요소 약 200개, 그리고 lumped 질량이 약 22,000개 만들어졌다. 4개의 국소좌표계가 사용되었으며 총 배의 무게는 약 5만 파운드정도이다. 우선 NASTRAN modal analysis을 수행하여 모델을 분석하였다.

충격파에 의한 수상함 내충격 수치해석은 구조물과 유체의 interface에서 일어나는 유체-구조물 상호작용을 해석하기 위한 어려운 해석기법이 요구된다. 본 해석에 선행하여 WAI이 선택한 수치기법과 NPS가 선택한 수치기법을 초기단계에서 비교하기 위하여 배의 바닥에 단순한 압력을 가하는 계산을 수행하였다. 즉 유체구조물 상호작용이 없는 즉 USA 도입없이 순수하게 LS-DYNA3D, NASTRAN과 그리고 WAI의 수치해석결과를 비교하는 작업이다. 부과하는 압력파를 그림 3에 나타내었는데 되도록 충격파와 유사한 형태로 지정하였다.

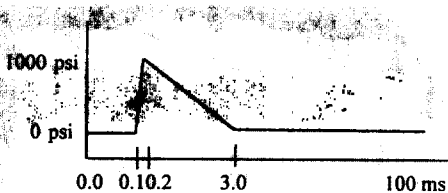


그림 3. Loading pressure.

그림 4에 대표적인 keel 위치에서 계산된 수직방향 속도성분을 나타내었다. LS-DYNA3D결과와 NASTRAN 선형 및 비선형결과를 제시하였다. LS-DYNA3D는 비선형 프로그램이므로 기본적으로 비선형 NASTRAN결과와의 비교가 보다 타당함을 보여주고있다. 전체적인 반응결과는 비슷하나 NASTRAN의 결과가 보다 고주파수의 빈용을 나타내고 있다. 그 이유로는 단지 두 프로그램의 기법이 다른 관계로만 현재로는 설명된다. WAI의 결과는 여기 제시되지 않았으나 제법 차이를 보이고 있다. 특히 WAI 프로그램은 최대 node수의 제한으로 많은 부분에서 Semaring Technique을 사용하였는데 이 또한 극복되어야하는 분야이다.

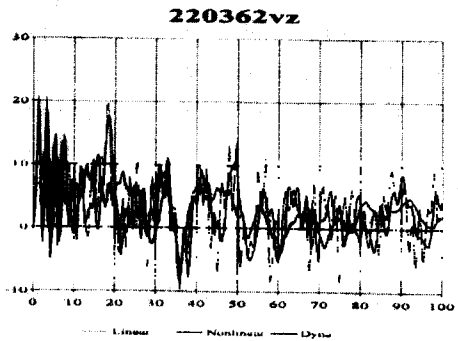


그림 4. 수직방향 속도성분

### 4. 수치기법

이제 실제 실험결과와 비교를 위한 내충격 해석 방법을 논하고자한다. G/C에서 만들어진 구조물 유한 요소모델에 대한 유체구조물 상호작용을 이용한 내충격해석은 다음의 3가지 방법으로 접근이 가능하다. 첫째, 유체모델이 없이 검정된 DAA 경계를 구조물의 접수된 부분에 작용한다. 이 방법은 가장 해석상 간단하나 중요한 영향으로 여겨지는 cavitation을 조사 할 수가 없다. 두 번째 방법으로는 주위유체를 모델링하여 DAA를 바깥 유체부분에서 작동시킨다. 유체는 LS-DYNA3D에 기존재하는 MAT90 요소를 사용한다. 앞에서 언급하였듯

이 이 경우 실선 구조물과 유체경계에서의 모든 node를 일치시켜야 하므로 복잡한 수상함주위의 유체모델링의 상당한 어려움이 있다. 마지막 세 번째 방법은 General-Coupling 기법이다. Eulerian기법으로 기술되는 직사각형 유체블록을 만들고 그 위에 별개의 FEM 구조물을 접수시킨다. 계산사이클마다 두 모델의 경계는 General-Coupling으로 찾아낸다. 본 기법은 현재 LSTC에서 LS-DYNA3D 프로그램에 구현중이므로 현재로는 적용이 불가능하다. 따라서 첫 번째와 두 번째 방법이 현재 본 연구에서 고려되고 있다. 그림 5에 기술한 두 기법을 표시하였다.

두 번째 기법에서는 유체의 모델링때 node가 일치하여야하는 제약조건 때문에 True-Grid라는 pre-processor를 사용한다. 그 이유로는 True-Grid 전처리기는 구조물의 node로부터 유체부분의 메쉬를 뽑아낼 수 있기 때문이다. True-grid를 사용한 유체-구조물의 초기단계의 메쉬를 그림 6에 나타내었다. 복잡한 전선구조물을 유한요소법으로 정확히 모델링하기 위하여 상당히 많은 메쉬가 hull에 만들어져 결국 약 백만이 넘는 메쉬가 전체적으로 요구되어졌다. 따라서 수치계산상의 어려움이 야기되었다.

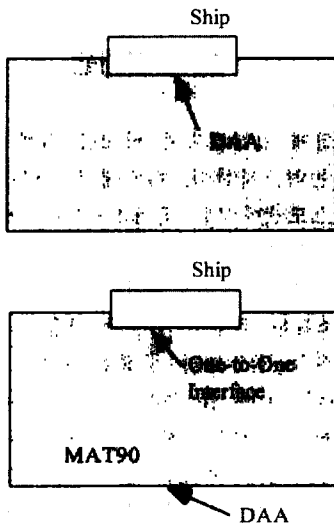


그림 5. 내충격 해석방법.

G/C에서 만들어진 FEM 파일은 NASTRAN 입력파일은 NPS에서 LS-DYNA3D 입력파일로의 변환작업이 요구된다. 많은 부분에서 쉽게 변환이 가능하나 특히 보요소 변환에 많은 어려움이 따른다. 대부분의 node 좌표가 쉽게 변환되나 국소자표제로 정의된 node는 LS-DYNA에서는 전체 자표제로 변환이 되어야한다. 특히 어려운 과정은 보요소의 방향을 정의할 때 NASTRAN에서는 사용하기 쉬운 벡터로 만들어졌으나 LS-DYNA3D에서는 보의 방향을 두질점과 세 번째 질점의 자표를 사용하다는 사실이다. 또한 보의 평형면을 설정하기에 어려움이 있다.

마지막으로 접수부분의 판요소 (wet element)들을 찾아내어 USA 프로그램과 연결시키는 작업이 부수적으로 요구된다. 본 작업에서는 모든 접수요소를 MSC/PATRAN을 사용하여 찾았다.

우선 상대적으로 단순한 기법으로 DAA면을 구조물에 정의한 수치계산을 수행하였다. 본 방법으로는 cavitation의 영향이 무시되나 자유표면의 영향은 image 기법을 사용한 압력과 cutoff로 계산에 고려가된다. 본 논문에서는 계산결과를 제시하지 않았으나 실험결과와의 비교에서 만족스럽지 못하였다. 가능한 이유로는 본 계산에 cavitation이 무시되었기 때문이거나 또는 더욱더 설득력이 있는 이유로는 USA 프로그램의 불완전도 때문이라고 여겨진다. USA/LS-DYNA3D 프로그램은 아직 떠 있는 부유체에 대한 정확한 검정 작업이 이루어지지 않았던 것도 사실이다. USA/NASTRAN 계산이 수행되었으나 또한 실험치와의 검정이 이루어지지 않았으며 그 또한 2차원 계산이 전부이다.

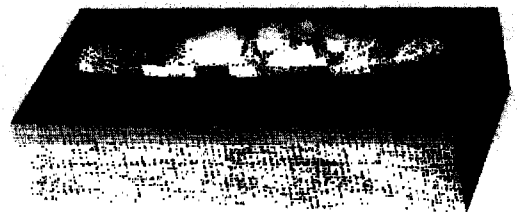


그림 6. DDG53 수상함 전선 Finite Element Model과 주위 유체 Modeling.

결론적으로 수상함 내충격 계산을 위하여 정확한 수치 모델링과 기법의 검정에 의한 기술의 보완이 필요한 실정이다. 또한 중요한 현상인 bubble 운동에 의한 whipping 해석을 USA/LS-DYNA3D를 사용함에도 어려움을 내재한다. 이러한 사실에 비추어 볼 때 국내에서 이러한 유체-구조물 상호작용 interface 프로그램을 개발한다면 충분히 몇 년 내로 선진국수준의 만족스러운 결과를 얻을 수 있으리라 여겨진다.

Cavitation 영향을 알아보기 위하여 전선 구조물 및 유체 FEM 모델링 및 이들의 수치계산은 현재 진행중이다.

### 후기

본 연구는 미 해군대학원에서 신영식 교수님의 도움으로 수행하였음에 감사를 드립니다.

### 5. 토론 및 결론

본 연구에서는 비용이나 환경적인 관점등으로 앞으로 어려움이 있는 수상함에 대한 실선 내충격 실험을 수치계산으로의 대체 가능성을 조사하고자 한다. 즉 복잡한 실선 구조물을 유한요소법으로 구체적으로 모델링하여 각 주요부분에서의 충격자료를 획득하여 실험자료와 비교하여 수치기술의 정확도를 확인한다. 최근의 컴퓨터 하드웨어의 발전에도 불구하고 복잡한 구조물 그리고 인접한 주위 유체를 대상으로한 수치계산은 현재에도 많은 시간이 요구되는 실정이다. 효율적인 3차원 General Coupling 기법이 개발된다면 Finite Element Modeling 단계에서 많은 시간과 인력을 절감할 수 있다.

수상함의 side-attack 문제에서 USA 수치프로그램의 개선이 요구된다. 또한 bubble의 운동에 의한 whipping 계산능력의 보완이 요구된다. 따라서 이러한 현실에서 우리 자체의 유체-구조물 상호작용 계산을 수행할 수 있는 interface 프로그램의 개발이 필요하다. 상세한 유한요소 모델링 기술과 이의 내충격 해석기술은 본 연구뿐만 아니라 파생되는 문제와 학문적인 발전도 도모할 수 있다.

### References

- [1] Santiago, L.D., "Fluid-Interaction and Cavitation Effects on a Surface Ship Model due to an Underwater Explosion," Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, USA, 1996.
- [2] Huang, H., "Transient interaction of acoustic plane waves with a spherical elastic shell," *The J. of the Acoustical Society of America*, Vol. 45, 661-670, 1969.
- [3] Huang, H., "An Exact Analysis of the Transient Interaction of Acoustic Plane Waves with a Cylindrical Elastic Shell," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 37, 1091-1106, 1970.
- [4] Geers, T. L., "Residual Potential and Approximate Methods for Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Problems," *The J. of the Acoustical Society of America*, Vol. 49(5), 1505-1510, 1970.
- [5] Geers, T. L., "Doubly Asymptotic Approximations for Transient Motions of Submerged Structures," *The J. of the Acoustical Society of America*, Vol. 64(5), 1500-1508, 1978.
- [6] Swegle, J. W. & Attaway, S. W., 1995, On the Feasibility of Using Smoothed Particle Hydrodynamics for Underwater Explosion Calculations, Sandia National Laboratory report, SAND95-0311, UC-705.
- [7] Chisum, J. E, and Shin, Y., Modeling and Simulation of Underwater Shock Problems Using a Coupled Lagrangian-Eulerian Analysis, *J. of Shock and Vibration*, Vol. 4 (1), 1-10, 1997.
- [8] Hicks, A.N., "Explosion Induced Hull Whipping," *Advances in Marine Structures, Elsevier Applied Science*, 390-406, 1986.
- [9] DeRuntz, J.A., "The Underwater Shock Analysis code and Its Applications," *Proceedings of 60th Shock and Vibration Symposium*, Vol. I, 89-107, 1989.