

수중폭발 충격응답 시뮬레이션 기술현황 및 발전방향



이 상 갑

- 1955년 5월 6일생
- University of Illinois at Urbana & Champaign, 1990년
- 현 재 : 한국해양대학교 해양시스템공학부, 교수
- 관심분야 : 수중폭발 내충격 해석, 내충돌 및 내좌초 구조설계, 파랑충격 하중 내충격 구조설계
- 연 락 처 : 051) 410-4306
- E-mail : sglee@hanara.kmaritime.ac.kr



정 정 훈

- 1962년 7월 12일생
- 1991년 8월 서울대학교 대학원 조선공학과 박사
- 현 재 : 한국기계연구원 구조연구부 선임연구원
- 관심분야 : 진동/충격 해석 및 시험평가, 진동/충격 절연장치 설계 및 특성평가
- 연 락 처 : 042-868-7423
- E-Mail : jhchung@kimm.re.kr

1. 서론

함정의 생존성(survivability) 확보 측면에서 예상되는 적의 수중폭발(underwater explosion, UNDEX) 공격에 대한 대상함의 취약성(vulnerability) 평가는 함정 설계 시 고려되어야 할 가장 중요한 사항중의 하나이다. 미국 해군의 경우 내충격 안전성이 요구되는 새로운 등급의 모든 수상함 개발에 있어서 시제함에 대하여 실선충격시험(ship shock trial)을 통해 수중폭발 충격에 대한 취약성 평가를 수행할 것을 의무화하고 있다(LFT&E (Live Fire Test & Evaluation) Legislation(1986) 및 OPNAV Instruction 9072. 2 - "Shock Hardening of Surface Ship"(1987)). 그림 1은 이 규정에 따라 처음으로 1987년에 실시한 실선충격시험 USS Mobile Bay Trial 장면을 보여주고 있다. 그러나 실선충격시험을 수행하기 위해서는 막대한 비용이 소요되며 시험 특성상 재시험이 거의 불가능하고 환경영향의 최소화를 위한 과도한 과외비용 지출 등의 많은 현실적 어려움이 있다. 한가지 예로서 미국에서 1994년 6월에 수백만 달러를 들여 수행한 USS John Paul Jones(DDG53) 실선충격시험의 경우 4년여간의 준비기간과 50여 개의 정부기관 관련인원 300여명이 참가하였으나, 환경단체의 소송제기로 인한 시험실시의 3개월 지연과 가혹한 해상상태 및 인도기간 문제로 인해 계획된 4회 시험 중 2회만 실시하는 등의 많은 난관이 있었다.

미국 해군을 비롯한 선진 해군국가에서는 90년대 들어오면서 전산기 환경의 급격한 발전과 고도의 충격응답 수치 시뮬레이션 도구의 개발에 발맞춰 실선충격시험의 보조자로서 궁극적으로는 실선충격시험을 대체할 수 있을 정도로 정확한 충격응답 시뮬레이션 기술개발에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 수중폭발에 의한 함정의 선체구조 및 탑재장비의 내충격 설계 기술은 국방관련 기술임으로 선진국으로부터의 기술 이전 및 습득이 거의 불가능하기 때문에 독자적인 기술개발이 불가피하다. 국내에서도 그 동안의 관련연구를 통하여 구축된 핵심기반기술을 토대로 산·학·연의 역량을 결집하여 집중 투자한다면 가까운 시일 내에 선진국 수준의 충격응답 시뮬레이션 기술을 확립할 수 있다고 사료된다. 이를 위해서는 첨단기 환경 및 시뮬레이션 도구 구축, 시뮬레이션 모델링 기법의 고도화, 모형 및 실

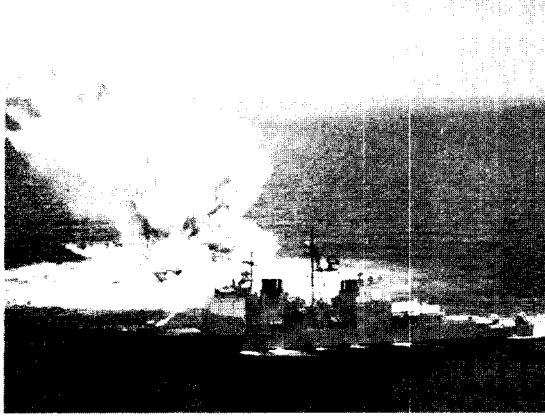


그림 1. USS Mobile Bay Trial, 1987

선충격시험 결과와의 비교를 통한 시뮬레이션 결과의 신뢰성 검증 등의 심도 있는 연구의 수행이 절실하다.

본 고에서는 수중폭발 현상을 개략적으로 살펴보고, 현재 널리 사용되고 있는 대표적인 충격응답 시뮬레이션 code들과 이를 이용한 시뮬레이션의 국내외 기술현황을 개괄하고자 한다. 아울러 이 분야에 대한 국내에서 수행되어야 할 향후 중점 연구방향에 대해서도 언급하고자 한다.

II. 수중폭발 현상

폭약, 핵무기 등의 수중에서의 폭발은 고온·고압의 가스구체(gas bubble) 생성과 급작스런 에너지 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 물속을 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 response)을 발생시키며, 심한 경우 선체 국부구조 및 주요 탑재장비에 치명적인 손상을 입히게 된다.

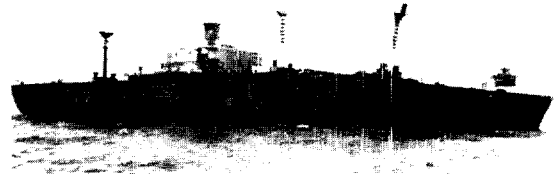


그림 2. Hull girder damage caused by UNDEX whipping

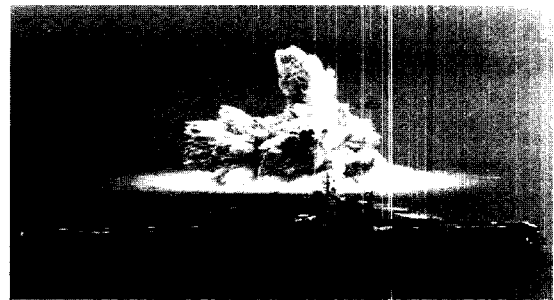


그림 3. Surface phenomena of an UNDEX

충격파가 전파해 가는 동안 폭발 시 생성되어 주위 수압에 대해 주기적인 팽창·수축의 맥동(pulsating)운동과 부력에 의해 수직상승(migration)하는 가스구체는 맥동운동의 각 주기마다 최소크기가 되는 시점에서 붕괴되며 이때 가스구체 압력파(bubble pulse)를 반복적으로 발생시킨다. 가스구체의 맥동주기가 통상 함정의 선체 거더(hull girder) 상하방향의 저차 고유주기와 비슷하기 때문에 가스구체 압력파는 함정의 선체 거더 상하방향의 보 거동 운동 즉, 휘핑(whipping)을 유발시키며, 심한 경우 과도한 휘핑 굽힘모멘트로 인하여 그림 2와 같이 함정의 선체는 종강도를 상실할 수 있다. 한편 그림 3은 수중폭발에 의해 발생하는 수면 위에서의 현상을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 수중폭발 직후 발생한 충격파가 먼저 수면에 도달하여 스프레이 돔(spray dome)이 형성되고, 이어서 가스구체 압력파가 수면에 도달하면 스프레이 돔을 관통하는 물기둥(plume)이 형성된다.

수중폭발에 의해 물속을 전파하는 충격파가 해저면 또는 자유수면과 같은 경계면에 도달하면 반사 또는

굴절하게 되므로 경계면 근방에서의 유동을 기술하기 위해서는 이들 경계면의 효과를 고려하여야 한다. 특히, 수상함의 충격응답해석을 정확히 수행하기 위해서는 자유수면(free surface)의 영향을 고려하여야 한다. 충격파가 자유수면에 도달하면 음압을 갖는 인장반사파(rarefaction wave)가 발생하여 자유수면 아래 근방에는 순간적으로 넓은 영역에 걸쳐 광역케비테이션(bulk cavitation)이 발생할 수 있다. 이러한 케비테이션이 발생하면 유체와 구조가 순간적으로 분리되며, 케비테이션이 닫히면서 폐쇄압력파(closing pulse)가 발생하여 또 다른 충격하중으로 선체구조에 작용하게 된다. 이러한 광역케비테이션 현상은 수상함의 충격파에 의한 초기 전체거동(bodily response)을 파악하는데 있어서 매우 중요한 물리적 현상이다. 또한 선체 외판에 충격파가 도달하면 이 경우에도 음압을 갖는 인장반사파가 발생하여 선체 외판 주위에 국부적인 선각케비테이션(hull cavitation)이 발생할 수 있다.

III. 충격응답 시뮬레이션 Code

수중폭발에 의한 두 가지 충격하중 즉, 충격파와 가스구체 압력파에 의한 선체구조의 충격응답 특성이 상이하므로 일반적으로 별도로 구분하여 합정의 충격응답 해석은 수행된다. 충격파에 의한 선체 충격응답 해석은 선체 국부구조의 충격손상 파악 및 주요 탑재장비 위치에서의 충격하중 산정 관점에서 수행되며, 가스구체 압력파에 의한 선체 거더 휘핑응답 해석은 중강도 안전성평가 관점에서 수행된다.

본 절에서는 합정의 수중폭발 충격응답 시뮬레이션에 널리 사용되고 있는 대표적인 code들에 대하여 살펴보고자 한다. 이들 code들은 수중폭발에 의한 유체-구조 상호작용 해석방법에 따라 Hydrocode(또는 Wave code라고도 함)와 DAA (Doubly Asymptotic Approximation, 이중점근근사) code로 대별할 수 있다.

3.1 Hydrocode

연속체 역학에 바탕을 두고 구조, 유체 및 유체-구조

연성의 동적 비선형 거동을 해석하는 code들로서 대표적인 상용 code로서 LS/DYNA3D, MSC/DYTRAN 등이 90년대부터 많이 활용되기 시작하였다. 유체-구조 상호작용 해석기법으로서 ALE(Arbitrary Lagrangian/Eulerian) 기법과 CLE(Coupled Lagrangian/Eulerian) 기법이 사용되고 있다. ALE 기법에서는 유체와 구조물의 연성면(coupled surface)에서의 유한요소들이 합병(merge)되어 Eulerian 요소가 그 자체를 통해 유동하는 재료와 관련되어 이동하는 알고리즘을 사용하고, 이와는 달리 CLE 기법에서는 Eulerian 요소가 공간 내에 고정된 상태로 남아있고 그 자체를 통해 재료의 유동은 Euler equation의 해에 근거하여 이동하는 알고리즘을 사용한다.

Hydrocode들은 폭발현상, 충격파 전파, 케비테이션, 3차원 가스구체의 거동 등을 고려하여 해석할 수 있다. 국내에서는 주로 선박·해양구조물의 충돌 시뮬레이션에 이들 code들을 사용해 왔으며, 1997년부터 수중폭발 충격응답 시뮬레이션에 적용되기 시작하였다. DAA code와는 달리 Hydrocode를 사용하여 충격응답을 시뮬레이션하기 위해서는 폭약을 포함한 유체영역을 모두 해석 모델링에 포함하여야 하기 때문에 합정 내충격 설계 기준으로 고려하고 있는 원거리 수중폭발 조건에 대해서 전선(whole ship) 충격응답 시뮬레이션을 수행하기에는 엄청난 시간과 노력이 요구되어 현재의 전산기 환경에서는 아직까지는 시기상조라 판단된다.

3.2 DAA Code

최근 합정의 수중폭발 충격응답 시뮬레이션에 가장 많이 활용되고 있는 code로서 LS-DYNA/USA, USA-NASTRAN 및 EPSA-II 등이 국내외에서 대표적으로 활용되고 있다.

LS-DYNA/USA code

90년대 중반부터 전산기 환경의 급속한 발전과 함께 Hydrocode인 LS/DYNA3D code와 USA(Underwater Shock Analysis) code를 연계한 LS-DYNA/USA의 개발을 통해 수중폭발 충격응답 시뮬레이션의 새로운 계기를 마

련하게 되었다. 국외에서는 LS-DYNA/USA를 이용한 DDG53의 충격응답 시뮬레이션을 수행하여 실선충격 시험 결과와의 비교를 통해 code의 유용성을 검증하였다. 국내에서는 비교적 최근에 들어서 함정 내충격 성능평가에 활용하고 있다.

LS-DYNA/USA에서는 Hydrocode와는 달리 유체영역을 케비테이션이 일어나는 영역과 일어나지 않는 영역으로 분리하고 케비테이션 발생영역은 유한요소 모델링하고 기타 영역의 영향은 DAA 경계로서 취급한다. 충격응답을 구하기 위해 상호교환 해석방법(staggered solution scheme)을 사용한다. 구조계 및 유체계의 해는 LS-DYNA/USA에서, DAA 경계면의 해는 USA code에서 풀어난다. 구조계 및 유체계의 시간적분방법은 양해법(explicit method)을 사용하고, DAA 경계면의 해는 음해법(implicit method)을 사용한다. 유체영역의 유한요소 모델링을 위해 압력만을 미지수로 하는 음파전달요소(acoustic element)를 사용하는데 ALE 요소보다 계산시간을 상당히 단축시킨다. 이 code는 비선형 충격응답 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

USA-NASTRAN code

USA-NASTRAN code는 수중폭발 충격하중에 대한 구조물의 선형 충격응답시뮬레이션을 위해 개발된 code로서 NASTRAN code의 DMAP(Direct Matrix Abstraction Program)을 통하여 USA와 NASTRAN code가 연계된다. 이 code에서는 유체-구조 상호작용을 점수구조표면의 문제로 국한시켜 취급하기 때문에 케비테이션이 발생하는 경우에는 원칙적으로 적용할 수 없다. 케비테이션을 고려하기 위해 LS-DYNA의 음파전달요소와 같은 역할을 하는 CFA(Cavitating Fluid Analyzer) code를 연계한 USA-NASTRAN-CFA code를 사용한다.

EPSA- II

EPSA(Elastoplastic Shell Analysis) code는 1976년 잠수함과 같은 수중구조물의 대변형 및 재료의 탄소성 영역까지를 고려한 충격응답 시뮬레이션을 위하여

Weidlinger Associates Inc.에서 개발되었다. 역시 유체-구조 상호작용 해석방법으로 DAA 방법을 사용하고 있다. 정확도를 보장하면서도 효율적인 계산을 수행할 수 있도록 탄소성 셸(shell) 이론을 합응력(stress resultants)으로 정식화하였고, 각 절점의 회전성분을 제거하고 병진성분만을 고려한 사각형 셸 유한요소(12 절점, 20 자유도)를 사용하였다. 1994년에 EPSA-II로 갱신되었다.

3.3 기타 code

수상함의 충격응답해석을 위해 Weidlinger Associates Inc.에서 개발된 FUSE/SRUE code에 대해 소개한다.

FUSE/SRUE code

FUSE/SRUE(Far field Underwater Shock Effects/Surface ship Response to Underwater Explosions) code는 수상선의 수중폭발 충격응답 시뮬레이션을 위해 개발된 code이다. 먼저 FUSE를 통해 구조물이 없는 상태(free field)의 유체 압력 및 입자 속도를 2차원 축대칭 미소 변형률에 따라 계산하도록 되어 있다. FUSE는 자유수면으로 인한 효과, 다층구조의 바닥경계면 효과를 고려하도록 되어 있고 케비테이션이 닫히면서 발생하는 폐쇄 압력파의 영향까지 계산이 가능하다. 또한 폭발 시 발생하는 가스구체의 효과로 인한 영향도 살펴 볼 수 있다. FUSE는 폭약의 위치가 축대칭 문제에만 국한되어 계산 가능하므로 다양한 폭발원의 위치에 따른 응답을 얻기는 부적합하다. SRUE code는 FUSE에서 계산된 구조물이 없는 상태의 유체 압력 및 입자 속도를 이용하여 유체-구조 연성문제를 점수구조표면에서의 연성 문제로 근사하고 충격응답을 계산하는 선형 시뮬레이션 code로서 SAP IV를 이용하여 개발되었다.

IV. 국내외 충격응답 시뮬레이션 기술현황

전술한 바와 같이 미국 해군을 비롯한 선진 해군국가에서는 실선충격시험의 보조자로서 궁극적으로는 실선충격시험을 대체할 수 있을 정도로 정확한 충격응답 시뮬레이션 기술 개발에 대한 연구가 활발히 수행되고

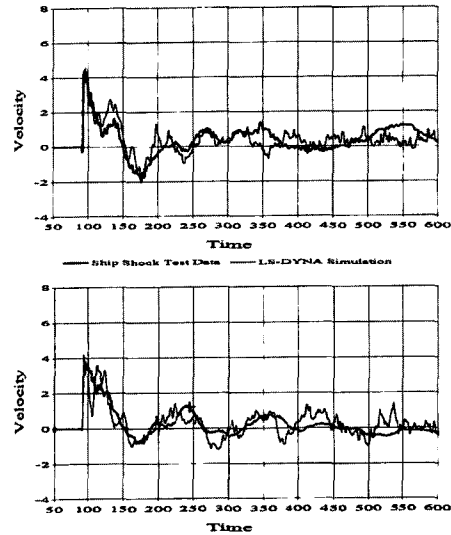
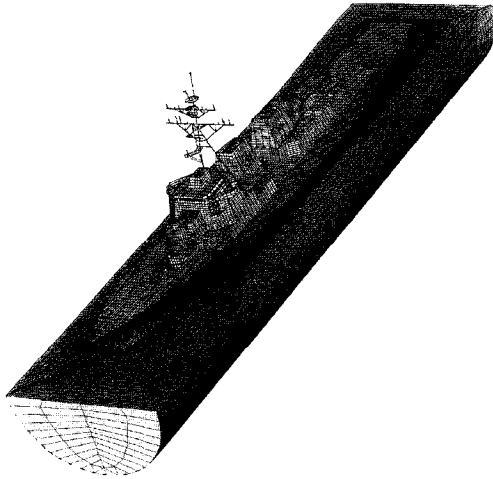


그림 4. UNDEX simulation model and results of DDG53 using LS-DYNA/USA

있다. 한가지 예로서 미국 해군에서는 NAVSEA(Naval Sea System Command)의 주관 하에 1996년부터 3년간 6백만 달러 이상의 연구비를 투자하여 DDG53 실선충격시험 시뮬레이션을 위한 산·학·연 협동연구를 수행하였다. 본 연구의 참여기관과 그 역할을 살펴보면, Gibbs & Cock Inc.는 시뮬레이션의 모델링 개발을, Electric Boat Co.와 NSWC/UERD(Naval Surface Warfare Center/Underwater Explosion Research & Development Division)는 시뮬레이션의 모델링 검증 및 결과 검증을, 그리고 Weidlinger Associates Inc.와 Naval Postgraduate School에서는 시뮬레이션을 수행하여 시험결과와 비교·검토를 통해 시뮬레이션 기법의 신뢰성을 검증하였다. 그림 4에는 시뮬레이션을 위한 모델과 Naval Postgraduate School에서 LS-DYNA/USA code를 사용하여 시뮬레이션 한 결과와 시험결과를 비교한 예를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 상당히 정확한 시뮬레이션 결과를 얻었음을 알 수 있다.

국내의 경우에도 90년대 초반부터 함정의 수중폭발 충격응답 해석에 관한 기본이론의 정립, 자체 code의 개발, 상용 code의 확보 및 활용기술 개발 등 이 분야에 대한 활발한 연구가 수행되고 있으며, 이를 통해 핵

심기반기술은 상당부분 구축되어 있다고 판단된다. 특히, 한국 해군에서는 90년대 중반부터 함정 시제함 설계단계에서 수중폭발 충격응답 시뮬레이션을 통한 대상함의 내충격 안전성 평가를 기술용역 수행항목으로 제시함으로써 이 분야에 대한 국내 연구진의 활발한 연구기반 조성에 많은 지원을 하고 있다. 국내의 연구 결과의 한 예로서 그림 5에는 한국기계연구원에서

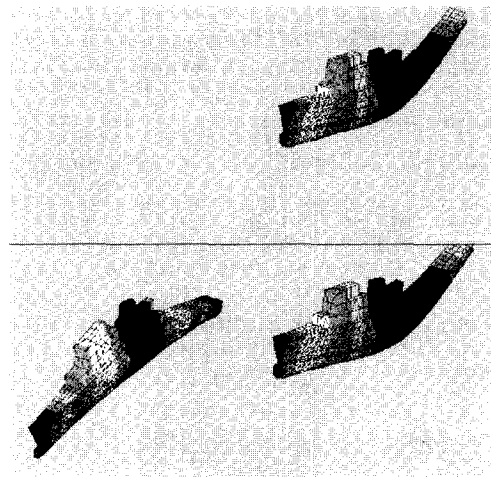


그림 5. Whipping response simulation of a hull girder

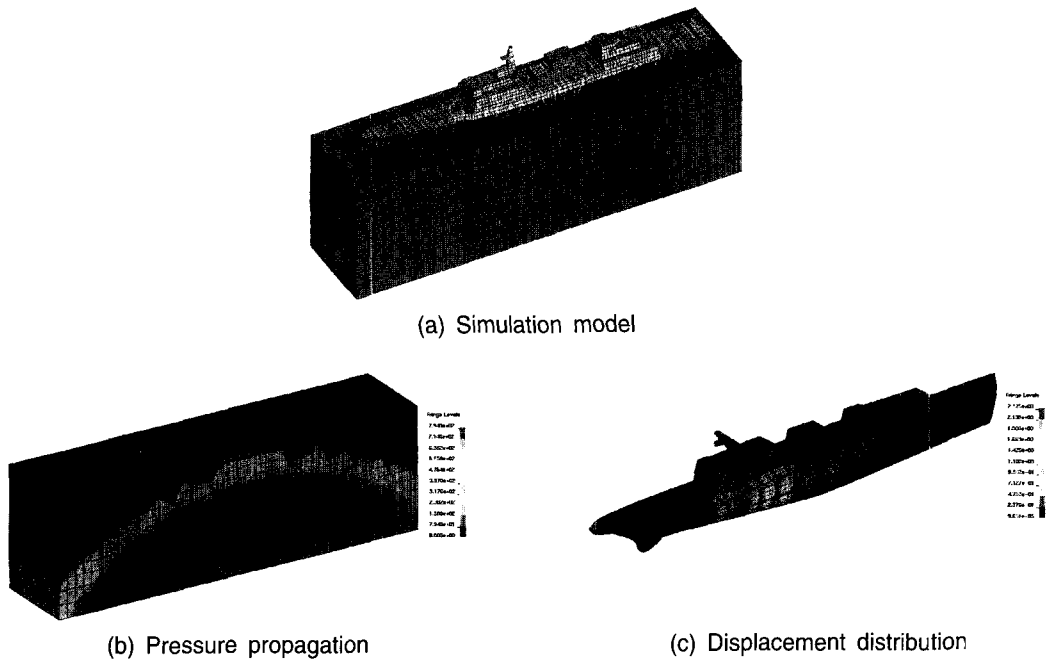


그림 6. Model and results of ship shock response simulation

USA-NASTRAN code를 이용하여 수행한 수상함의 3차원 선체 거더 휘핑응답 시뮬레이션 결과를, 그림 6에는 한국기계연구원, 한국해양대학교 및 세종대학교가 공동으로 LS-DYNA/USA code를 이용하여 수행한 수상함의 충격응답 시뮬레이션의 모델과 결과의 일부를 보여주고 있다.

VI. 향후 중점 연구방향

함정의 수중폭발 충격응답 시뮬레이션 기술은 국방 관련 기술임으로 선진국으로부터의 실적자료에 대한 이전 및 습득이 거의 불가능하고, 함정 자체 역시 보안상 국내 기술을 통한 국산화가 필요하기 때문에 독자적인 기술개발을 통한 실적 데이터 구축이 체계적으로 이루어져야 한다.

수중폭발 충격하중에 대한 충격응답 시뮬레이션 기술 그 자체는 고도의 비선형 구조동역학 기술 분야이며, 실적 데이터의 체계적인 구축을 위해서는 산·학·

연 협력연구 네트워크를 통한 시뮬레이션 기술의 신뢰성 제고가 절실히 요망된다. 이를 위해서는 다음과 같은 사항들을 고려하여야 할 것이다.

- 충격응답에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과 등의 각종 관련 자료를 공유하여야 한다는 공감의 형성과 학회 등의 깊이 있는 토론의 장 마련이 필요하다.
- 본 분야는 고도의 기술을 필요로 하고 해석자의 경험 및 숙련도에 크게 의존하고 있으며, 다른 기술 분야와 비교했을 때 상대적으로 국내 관련 연구인력이 부족하기 때문에 대학교의 대학원 교과과정을 개설하여 관련 연구자의 저변을 확대하고 경험과 숙련도를 향상시킨다.
- 향후 중점 추진 연구방향은 충격응답 시뮬레이션 기술의 고도화를 통해 함정의 내충격 설계를 위한 한국 해군 자체의 설계기준이 마련되어야 하며 이를 위해서는 아래의 연구가 심도 있게 이루어져야 할 것이다.
- 실선 및 모형충격시험 결과와의 비교·검토를 통한

시뮬레이션의 신뢰성 검증

- 현 전산기 환경 하에서 최적의 시뮬레이션 모델링 기법 정립
- 케비테이션이 충격응답에 미치는 영향에 대한 보다 정확한 평가, 3차원 가스구체의 거동을 고려한 선체 구조 휘핑응답 시뮬레이션 방법의 정립
- 결과 평가방법 정립(선체 구조뿐만 아니라 탑재장비의 손상여부 판단, 승무원에 대한 영향평가 방법 정립)
- 가상현실을 이용한 시뮬레이션 결과의 보다 효율적인 가시화

앞에서 언급한 향후 중점 연구이외에도 고도의 수중 폭발 충격응답 시뮬레이션 기술을 확보하기 위해서는 다음과 같은 지원이 필요하다.

시뮬레이션 결과의 신뢰성 검증을 위해서는 모형 충격시험의 원활한 수행과 실선충격시험 결과와 같이 현재 비밀로 취급되는 자료들에 대해 관련 연구진이 공

유할 수 있는 체계 구축이 필요하다. 이를 위해서 한국 해군과 국방과학연구소의 전폭적인 지원이 필요하다.

함정 충격응답 기술의 궁극적인 실효성을 위해서는 점진적으로 실선충격시험을 시뮬레이션으로 대체할 수 있는 한국 해군의 의지와 장기 계획이 요구된다. 이를 위해서 다음과 같은 사항이 요망된다.

- 당분간 실선충격시험과 병행하여 시험 전·후 단계에 철저하게 시뮬레이션을 적용하여 신뢰성을 검증하여야 한다.
- 실선충격시험 시나리오 역시 대상함의 취약성 평가라는 측면보다는 시뮬레이션 신뢰성 검증이라는 측면으로 계획됨으로써 당분간의 실선충격시험 비용을 절감할 수 있는 방안이 강구되어야 한다.
- 함정 시제함의 내충격 설계를 위한 투자뿐 만 아니라 장기적으로 이 분야의 기초 또는 선행 연구를 위한 장기적인 연구 지원이 필요하다.
- 매년 몇 명의 해군 조합 장교의 이 분야에 대한 국내의 위탁교육이 필요하다.

국내 조선해양공학과 교수 초청 여름캠프

- 대우조선해양주식회사는 지난 2001년도에 조선한국의 미래를 책임지고 이끌어 갈 조선공학도들의 자긍심을 북돋우고 미래를 함께 생각하는 “국내 조선해양공학과 여름캠프”를 실시하여 큰 호응을 얻은 바 있습니다.
- 2002년 세계1위의 조선한국을 이끌어가는데 선도적역할을 담당하는 대우조선은 조선한국의 위상을 드높이고자 불철주야 노력하시는 국내 조선해양공학과 교수님들을 초청하여 아래와 같이 산학협동 세미나 및 Workshop을 개최하오니 많은 참석바랍니다.

- (1) 일 시 : 2002년 7월 4일(목) ~ 6일(토) 2박3일
- (2) 장 소 : 대우조선해양(주) 연수원
- (3) 행사 운영
 - 특별강연회 및 산학세미나 : 대우조선 기술개발 현황 소개, 기술수준측정결과 선박기술로드맵, 조선해양교육방향
 - Workshop 및 기술토론회 (색선별) : 유체, 구조 및 진동소음, 해양공학, 선박설계, 생산기술
 - 대우조선 소개/야드 투어 및 테마 견학
- (4) 접수처 : 경남 거제시 아주동 1번지 대우조선해양(주) 선박해양기술연구소
배재류차장, 배상은 과장 (055-680-5502. Fax. 2109, E-Mail : sebe@dsme.co.kr)