



Received: 2018/05/29  
Revised: 2018/07/04  
Accepted: 2018/07/18  
Published: 2018/07/31

**\*Corresponding Author:**

**Jae-Hoon Lee**

Tel: +82-51-400-5063

E-mail: jlee24h@gmail.com

# 함정 기자재 내충격 성능 설계에의 CAE 응용

## Applying CAE to Evaluate Shock Resistance of Equipment Design for Naval Vessel

이재훈\*, 배징도, 최주형, 김정환, 공길영

(재)한국조선해양기자재연구원

Jae-Hoon Lee\*, Jing-Do Bae, Joo-Hyoung Choi, Jeong-Hwan Kim, Gil-Young Kong

Korea Marine Equipment Research Institute

### Abstract

함정은 일반 선박과 달리 전투상황을 고려하여 설계 및 건조되어야 하며, 이는 선체뿐만 아니라 내/외부에 설치되는 기자재에 대해서도 동일하게 적용된다. 비접촉 수중폭발에 의해 선체에 전달된 충격파를 감쇠하거나 스스로 견딜 수 있도록 기자재 및 지지부를 설계하고 시험하는 방법이 미국, 유럽 등의 연구기관을 중심으로 연구되어 왔다. 본 논문에서는 함정에 설치된 기자재에 대한 내충격 성능을 평가하는 다양한 설계 기준들에 대하여 소개하고 각 기준들의 적용 방법과 한계 등 특징들을 비교하였으며, 내충격 성능 평가에서 CAE의 필요성과 활용상의 이점들을 기술하고자 하였다.

Unlike ordinary vessels, naval vessel should be designed and built considering the combat situation, and this applies equally to the equipment installed inside and outside the vessels. A method of designing and testing equipments to dampen shock waves transmitted to a ship or to withstand them by a noncontact underwater explosion has been studied by research institutes in the US and Europe. In this paper, various design criteria to evaluate the shock resistance of the equipment installed in the ship are introduced, and the application methods and limitations of each guidance are compared. And finally, the necessity and advantages of the CAE application in the shock resistance evaluation are described.

### Keywords

UNDEX(Under Water Explosion, 수중폭발), Shock Resistance(내충격), CAE(Computer Aided Engineering, 컴퓨터 이용 공학), Shock Spectrum(충격스펙트럼), Transient Analysis(과도해석)

본 논문은 해군과학기술학회 2018 하계학술대회 발표논문을 기반으로 작성되었습니다.

### 1. 서론

함정은 일반 상선, 여객선 등과는 달리 전투라는 특수한 상황을 고려하여 설계, 건조되어야 한다. 선체뿐만 아니라 내·외부에 설치되는 기자재에 대한 설계 및 제작 또한 전투라는 특수한 상황에 대한 고려가 반드시 필요하다. 이는 설계의 보수성을 가지게 만들며 과거로부터 이어져 오던 설계 방식의 답습을 불러일으켜 새로운 개념의 제품의 적용을 어렵게 만드는 요소로 작용한다. 전투 상황에 기자재 설계의 핵심은 전투 중 적의 공격으로부터 선체 및 주요 기자재에 가해지는 충격으로부터 인명 및 기자재를 보호하고 고유의 성능을 발휘 할 수 있도록 설계하는 것이다. 적의 공격에 의한 선체나 기자재로서의 직접 피격이 발생할 경우 직접적인 손상으로 인하여 함정은 작전수행 능력을 상실하거나 침몰할 수 있으나 함정 근처에서 발생하는 비접촉성 수중 폭발(Under water Explosion, UNDEX)의 경우 직접 피격이 아니기 때문에 기자재의 설계 및 기자재 지지구조물의 설계, 배치에 따라 지속적인 임무를 수행할 수 있다. 함정의 근처에서 발생하는 수중 폭발은 폭발 시 발생하는 압력과 진동이 선체 구조를 따라 진행되며 내부 기자재에 충격적인 하중을 전달하는 것으로 직접 피격과는 다른 하중형태를 가지고 있으며, 함정 기자재에 대한 내충격 안정성의 확보는 함정의 생산성(survivability) 관점에서 가장 중요한 요소로 자리 잡고 있다.

선체의 피로 파괴에 대한 연구와 마찬가지로 비접촉성 수중 폭발 공격에 의한 전투 불능 상태 극복에 대한 연구도 실제 보고 사례에서 출발하였다. 선체의 이상보다는 함정에 설치된 주요 기자재의 운용 불가에 기인하는 경우가 많으며 그에 따라 선체를 따라 전달되는 수중 폭발의 충격파를 감쇠하거나 견딜 수 있도록 하는 기자재와 지지구조물에 대한 설계와 시험 평가 방

법이 미국, 영국 등 선진국의 연구기관을 중심으로 주로 연구되어 왔다.

우리나라 해군에서도 1980년대 이후 함정에 설치되는 기뢰의 수중 폭발에 의한 내충격 성능 검증 필요성의 인식이 높아짐에 따라 국내 조선소 및 기뢰 제작 기업에 성능을 요구하고 있으나 관련 연구가 부족하여 단순히 선진국의 내충격 성능 요구 수준을 제시하고 검증을 요구하고 있다. 최근 들어 우리나라 함정의 교체 시기가 도래하고 동남아 및 해외 함정 발주가 늘어나면서 함정 내에 설치되는 기뢰에 대한 내충격 성능 검증의 요구가 증가하고 있으나 우리나라의 내충격 인증 관련 규격 시험은 한국기계연구원과 한국조선해양기뢰연구원에서만 일부 가능한 상태이다.

시험 외의 기뢰의 내충격 성능을 평가하는 방법으로는 CAE(Computer Aided Engineering)를 이용하는 방법이 있다. 시험 장비로는 평가가 불가능한 대형 장비나 시험 장치에 설치가 불가능한 장비의 경우 CAE를 통해 평가하고 성능을 검증하며 장비의 모듈화, 시스템화로 이에 CAE를 통한 검증의 필요성은 점차 증대되고 있다. 이와 관련된 연구는 미해군을 중심으로 컴퓨터 시뮬레이션의 발전과 함께 연구되어 왔으며 실제 수중 폭발 데이터를 기반으로 평가 방법이 연구되어 왔다. 시험을 통한 검증과는 달리 이 방법은 설계 단계에서부터 이용하여 시험 결과에 따른 제작과 불필요한 지지부 보강, 불필요한 시험기관으로의 이송을 방지하여 실제 제품을 생산하는 비용을 줄이는 효과가 있다. 규격 시험 관련 인증을 가진 국내 시험 기관이 부족한 상황에서 날로 증가하는 함정 건조와 관련하여 함정에 설치되는 기뢰의 내충격 성능을 검증하는 유일한 대안으로, 설계 시 반드시 요구되는 방법으로 볼 수 있다.

본 고에서는 세계적으로 통용되는 내충격 시험 평가 방법과 그에 대응하는 CAE를 이용한 전산 해석 평가 방법을 소개하고자 한다.

## 2. 기뢰에 대한 수중 폭발의 영향

수중 폭발은 포탄이나 기뢰 등에 의하여 수중에서 폭발하는 현상으로 고온, 고압의 가스 구체를 생성하고 급작스런 에너지의 방출로 폭발물 주위 유체의 교란을 발생시키고, 충격파(shock wave)를 발생시킨다. 폭발시 생성된 가스 구체는 팽창 수축을 반복하며 맥동운동과 수직상승 운동을 하고 충격파는 구형파(spherical wave)형태로 수중에서 전파된다.

가스 구체는 Fig. 1과 최초 폭발에서 시간이력에 따라

같이 성장, 붕괴를 반복하며 붕괴 시 압력파가 발생한다. 가스 구체는 수면에 도달하여 충격파에 의한 스프레이 돔(spray dome)이 발생하고 이후, 1차, 2차 구체 압력파에 의하여 돔을 관통하는 물기둥(plume)이 형성된다. 수상함의 경우 이와 같은 수면 현상에 의한 파괴 및 운용 불가 상태가 발생할 수 있으며 물기둥 발생 시 수상함 복원력의 일시적인 상실로 전복의 위험도 존재한다.

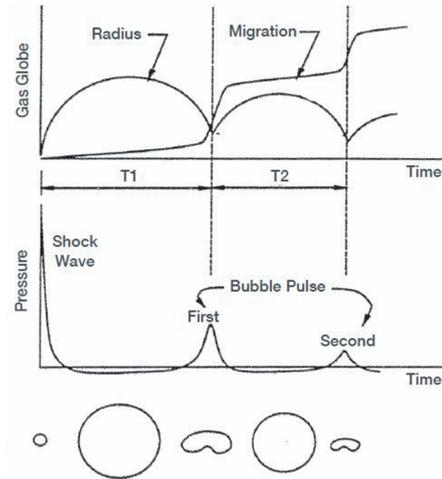


Fig. 1. Under water explosion phenomenon by time history

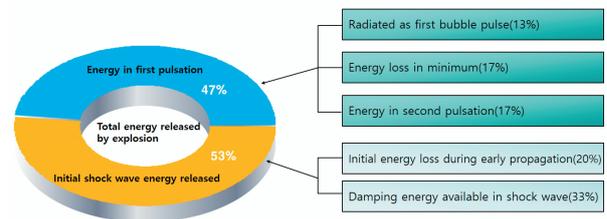


Fig. 2. Released energy by under water explosion

Fig. 2와 같이 수중 폭발에 의한 방출 에너지 중 47%는 가스 구체의 맥동 운동에너지(pulsation)으로 사용되며 약 53%가 충격파의 형태로 수중에서 전달된다. 이 충격파는 선체에 작용하여 복합 모드의 과도한 동적 구조 응답을 발생시켜 선체의 국부적인 구조 변형을 일으키고, 선체를 따라 전달되어 설치 기뢰와 지지구조물에 치명적인 손상을 발생시킬 수 있다.

수상함의 경우 소나(sonar) 장비를 제외하고 대부분의 장비는 흘수선 상부에 설치되어 수중 폭발에 대하여 직접적인 충격에 노출되어 있지 않으며 설치된 기뢰에 전해지는 충격 하중은 선체를 통하여 설치된 장비로 전달되는 형태를 가지고 있다.

따라서 장비로 전달되는 충격 에너지는 함정 내 기뢰

의 설치 위치에 따라 다를 수 있으며 선체에서의 에너지 감쇠로 수상에서 멀리 떨어질수록 그 크기는 적어진다고 볼 수 있다.

### 3. 기자재에 대한 내충격 평가 규정

함정에 설치되는 기자재에 대한 내충격 성능 평가 방법은 선진국을 중심으로 각국의 해군에서 규정하고 있으며 미국 해군과 NATO 기준으로 양립하고 있다. 많은 나라에서 수중 폭발에 대한 시험 방법의 표준으로 미국 해군의 MIL-STD-901과 독일 해군의 BV-043을 채택하고 있다.

**Table 1.** Design codes for shock resistance

IETC(국제 전기 기술위원회)		
문서ID	문서번호	문서명
EN IEC	60068-2	Environmental testing
영국		
문서ID	문서번호	문서명
BR Def Stan	3021	Shock Manual(Metric) Volume 1
	8470	Shock and vibration Manual
	00-35	Environmental Handbook for Defence Material
독일		
문서ID	문서번호	문서명
BV	043	Shock Resistance Specification for Bundeswehr ships
미국		
문서ID	문서번호	문서명
MIL-STD	901	Requirements for shock test, high-impact shipboard machinery, equipment and systems
	810	Environmental Engineering Considerations and Laboratory test
프랑스		
문서ID	문서번호	문서명
GAMEG	13	General Environment Testing of Materials

**Table 2.** Comparison of evaluation method for shock resistance of installed equipment

국가	규정 내용
미해군	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 미해군에서 규정하는 도면대로 제작된 충격시험기를 사용하여 규정(MIL-S- 901D)에 따라 수행</li> <li>· 충격시험을 위한 충격해머의 높이는 대상장비가 받을 수 있는 최악의 충격환경을 구현</li> <li>· MIL-S-901D에 따른 충격시험에서는 반드시 충격신호의 계측이 필요하지 않음</li> </ul>
NATO	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 실선 충격시험을 통하여 축적된 충격신호를 선종, 장비 탑재 위치 및 중량 별로 규격화</li> <li>· 충격시험은 충격시험기의 종류 및 작동방법에 무관</li> <li>· 충격 시험대에서 계측된 충격 신호가 요구된 충격신호를 만족하면 됨</li> </ul>

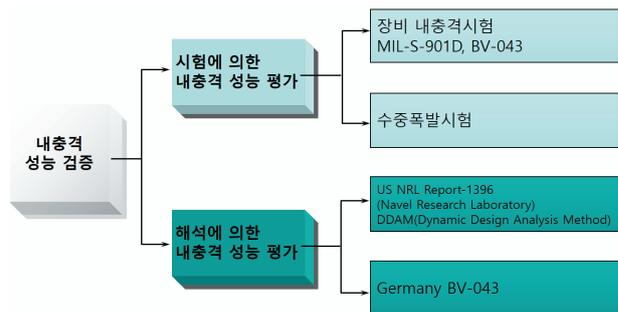
미해군 규정과 NATO 규정 모두 실제 수중 폭발 시험을 기반으로 내충격 성능 시험의 기반을 마련한 것으로 보이나 일반적인 접근 방법으로 평가 규정을 마련해 놓은 미해군 규정과는 달리 NATO와 같은 접근 방법은 새로운 등급 혹은 크기의 함정의 설계, 제작 시 탑재 장비의 충격시험을 위해 새로운 충격 신호를 사전에 조사, 시험해야 한다는 문제점이 있다.

미해군의 내충격 규정 요건은 NATO에 비하여 대상 장비의 실제 충격환경을 정확하게 구현하지 못한다는 단점이 있으나 NATO 등급에 명시되지 않은 새로운 등급(class)의 함정을 많이 건조하므로 미 해군 규정과 같이 일원화된 규정이 더 바람직한 것으로 판단된다.

### 4. 미해군 시험 규정에 의한 내충격 성능 평가

내충격 성능 검증은 Fig. 3과 같이 시험에 의한 방법과 CAE를 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 내충격 시험의 경우 기자재에 대한 시험 규격을 따르거나 실제 수중 폭발을 일으켜 시험하는 방법이 있으나 일반적으로 미해군 규정인 MIL-S-901D를 적용하며 기자재에 대한 내충격 성능을 평가한다.

이 규정은 기자재에 대해 설치 위치, 기자재가 전투 및 운항 성능에 미치는 영향, 기자재 및 지지구조물의 중량 등을 고려하여 시험 장비를 이용한 시험 방법을 제시하고 있다.



**Fig. 3.** Classification of shock resistance evaluation methods

기자재의 중량에 따라 경중량(light-weight), 중간중량 (medium weight) 및 고중량(heavy weight) 시험기를 이용하게 되며 경중량 시험기와 중중량 시험기의 경우 시험대 위에 대상 장비 설치 후 충격 해머를 통해 시험을 수행한다. 설치 위치에 따라 해머의 높이를 조절하여 충격량을 조절하는 방식을 취한다.

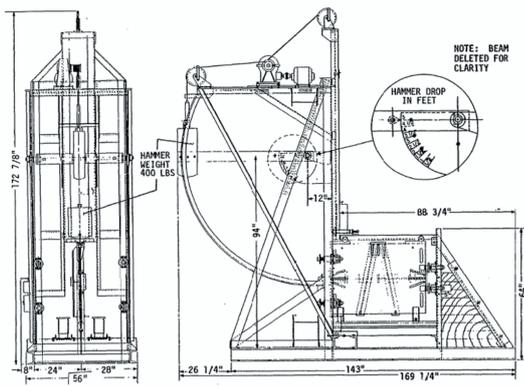


Fig. 4. Light-weight impact test equipment according to regulation

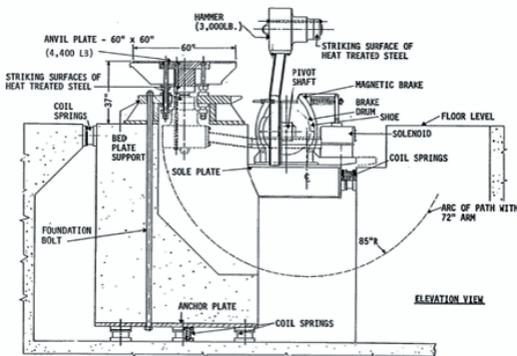


Fig. 5. Medium weight impact test equipment according to regulation

경중량 충격시험기의 경우 최대 550lb(250kg), 중중량 충격시험기의 경우 최대 7,400lb (3,000kg)가 한계 중량으로 현재 우리나라에는 한국기계연구원과 한국조선해양기자재연구원이 인증 시험기를 보유하고 있으며, 한국조선해양기자재연구원의 경우 2018년 중중량 충격 시험기 도입을 추진 중에 있다.

이 방법의 경우, 2차 세계대전 당시에 파손이 발생한 충격 손상 사례를 바탕으로 고안되었기 때문에 안전율을 고려하여 실제 충격과의 시간이력 하중보다 높은 충격하중을 발생시키도록 설계되었으며 의도하지 않은 과설계로 기자재에 대한 안정성 확보가 실제로 가능하기 때문에 많이 적용되고 있다.

### 5. CAE를 통한 내충격 성능 평가

경중량, 중중량의 함정 설치 기자재 중 시험 장비에의 설치 문제 등으로 인하여 충격 시험이 불가능한 장비에 대한 대안으로 FEA(Finite Element Analysis)의 발전과 함께

연구되어온 방법이다. 내충격 성능을 평가하고 확인할 수 있는 방법은 데이터로 축적된 일정 가속도를 구조물의 무게와 위치에 따라 주어지는 충격 설계 지수(shock design number)를 고려하여 정적 하중으로 입력하여 구조물의 응답을 확인하는 정적 가속도 법(static 'g' method), 스펙트럴 해석(Spectral analysis)법을 적용하고 있는 동적 설계 해석 법, Dynamic Design Analysis Method, DDAM), 충격 하중을 시간 이력으로 전산 모델링된 구조물에 직접 적용하여 동적 응답을 계산하는 시간 이력 해석(transient analysis)의 3가지로 구분할 수 있다.

정적 가속도 법의 경우 일반 상선이나 해양구조물, 함정, 여객선 등에 설치되는 기자재에 대한 운항 중 구조 안정성을 평가하는데 많이 이용되나 충격 설계 지수를 이용한 가중치를 이용하여 함정 등의 기자재에 대한 내충격 성능을 검증하는 데에는 현재 거의 사용되고 있지 않다. 타 방법에 대해 비교적 간단하게 구조물의 특성을 평가할 수 있는 방법이지만 대상 기자재의 동적 응답 특성을 전혀 고려하지 못하는 방법으로 충격 하중 응답에 대한 신뢰성의 문제로 미해군의 NAVSEA(Naval System Command)에서 함정 탑재 기자재 설계 지침 개정안(1994)에서 적용 하지 않을 것을 권장하고 있는 실정이다.

내진 해석(Seismic analysis)에 주로 적용되고 있는 스펙트럴 해석 방법은 충격적인 하중과 다양한 주파수대의 하중이 동시에 작용할 때, 구조물의 동적 응답을 계산하는 대표적인 방법이다. 하중에 대한 응답스펙트럼은 하중의 주파수별로 가중치가 부여되어 해석에 적용되어 응답을 구하는 방식으로 가중치 부여의 방법에 따라 구조물의 응답 동특성이 달라진다. 응답스펙트럴 형태로 표현된 지지부의 운동에 대해 모드 중첩법(Modal Super position Method)으로 강제 진동 응답을 계산하는 방법으로 다양한 모드 중첩방법이 존재하며 어떠한 방법을 사용하느냐에 따라 구조물의 응답 특성이 달라진다. 1961년 미해군연구소(Naval Research Laboratory)에서 모드 중첩의 한 방법으로 제안한 동적 설계 해석 법(DDAM)이 현재 미해군 함정 기자재 및 지지대의 내충격 설계를 검증하기 위한 표준 해석 방법으로 자리 잡고 있다. DDAM에서는 실선 충격 시험 계측을 통하여 얻어진 응답 스펙트럼을 기초로 장비의 설계 기준 응답 스펙트럼을 규정하고 있으며, 비밀로 규정되어 있는 정보를 제외하고 "NRL Memorandum Report 1396"을 통해 응답 스펙트럼은 일반에 공개되어있다.

충격 응답 스펙트럼은 기자재가 설치될 선박의 종류(수상함 or 잠수함), 설치 위치(hull or shell or deck), 장비

의 중요도에 따른 변형 특성(elastic or elastic-plastic), 충격 하중 방향(FWD/AFT, PORT/STBD, Vertical)에 따라 주파수에 대한 하중의 가중치가 구분되어 각 모드별 유효 질량의 함수로 주어진다. 스펙트럴 해석의 경우, 선행 개발된 범용 유한요소 해석프로그램에서 제공하고 있으며 DDAM에 적용하는 모드 중첩법의 경우, implicit 해석프로그램인 ANSYS를 시작으로 제공되기 시작하여 현재 거의 모든 범용프로그램에서 함정에 설치되는 기자재에 대한 동적 응답 특성을 계산할 수 있게 되었다.

시간이력을 적용하여 해석하는 방법의 경우 기자재가 설치되는 class의 선박과 기자재의 위치를 명확히 인지하고 그 위치에서의 시간에 따른 가속도와 같은 하중 값을 명확히 알고 있어야 적용이 가능하다. 이 때 얻은 정보를 구조물의 지지 위치에 시간이력으로 적용하여 동적 응답을 계산하고 평가하는 방법이 시간이력 해석 방법이다. 이를 위해서는 대상 선박에 대한 수중 폭발 시험이 먼저 선행되어야 하며 그 데이터를 고스란히 시뮬레이션에 반영하여야 한다. 하지만, 전선에 대한 수중폭발 시험을 수행하기가 힘들 뿐만 아니라 대부분 기밀로 취급되기 때문에 데이터를 얻기가 불가능에 가깝다고 할 수 있다.

충격 하중에 대해 참고할만한 규정은 현재 독일 해군의 장비 충격 사양인 BV043으로 여기에는 시간에 따른 충격 가속도 하중을 선박의 종류와 설치 위치, 기자재의 중량, 하중의 방향에 따라 구분하여 Fig. 6과 같이 반 이중 반사인파 형태(double sine wave)나 두 개 삼각파 형태(Triangular wave)의 함수로 제시하고 있다.

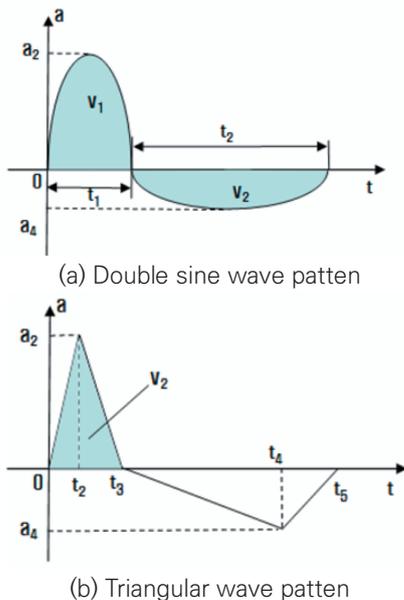


Fig. 6. Transient impact wave pattern according to BV-043

실제 데이터를 반영하지 않는 이상 현재 대안이 없다는 점에서 시간이력 해석법은 BV-043의 가속도 하중 시간 이력을 적용하는 방법밖에 없다고 볼 수 있다. 규정에서 제시하는 하중의 작용 시간(그림의  $t_5$ )은 최대 0.1초가 채 되지 않는다. 충격과 같은 하중이 작용하기 때문이며 일반적으로 구조해석에서 널리 사용되고 있는 ANSYS, ABAQUS와 같은 프로그램 외에 충격이나 폭발 등의 해석을 주로 수행하는 explicit 프로그램인 LS-DYNA나 AUTO-DYN과 같은 explicit 전용 프로그램을 이용해야 한다.

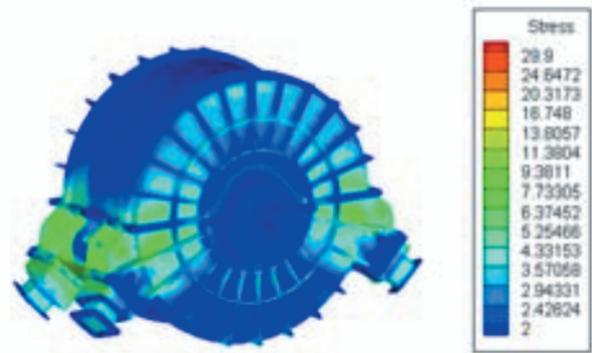


Fig. 7. Shock resistance evaluation of large capacity motor

정적 등 가속도법을 제외한 두 가지 방법은 현재에 가장 많이 사용하고 있는 방법으로 스펙트럴 해석 방법은 선체에 볼트나 용접 등으로 직접 설치되는 rigid mount 기자재에 대해, 시간이력 해석 방법은 탄성 마운트를 통해 선체에 설치되는 elastic mount 기자재에 대해 주로 적용되고 있다. DDAM의 경우, 충격 스펙트럼을 구성하는 함수의 특성과 가정(6g의 가속도 적용, 감쇠 무시 등)으로 인하여 탄성 마운트를 통해 선박에 설치된 기자재에 대한 적용이 적절하지 않아 시간이력 하중을 적용한 해석이 적용되어야 한다.

현재 많이 적용되고 있는 두 방법의 경우 장비 및 지지 구조물에 대한 내충격 성능 검증 및 평가에 매우 유용하지만, 개발된지 오래되었으며, 해석에 적용된 가정 등으로 실제 요구되는 성능보다 과설계의 우려가 있다는 점, 실제 데이터 보다는 가정에 의해 만들어진 하중을 적용하고 있다는 점, 충격파가 전달되는 수중의 유체 효과가 고려되고 있지 않다는 점 등 많은 문제점들이 현재 지적되고 있다. 실제 함정의 수중 폭발 시험을 통해 위치별, 방향별, 함정의 크기별

가속도 하중을 예측하고 기자재의 성능을 예측하는 신규 해석 방법이 요구되고 있는 실정이다. 하지만, 국방과 관련되어 있다는 점, 과설계로 인한 문제보다 안정성을 더욱 확보할 수 있다는 점, 설계 마진을 높일 수 있다는 점, 해석적, 실험적 방법의 안정성, 정확성 확보 등에서 현재 적용되는 해석적 방법은 당분간 지속적으로 유지될 것으로 판단된다.

실제로 함정의 건조에 있어 새로운 시험방법이 대두되지 않는 한 대형, 모듈화 기자재, 시험 시설에 설치가 불가능한 기자재에 대한 CAE 적용 성능 평가는 현재 많이 이용되고 있으며 앞으로 많은 부분에서 활용될 것으로 예측된다.

## 6. 맺음말

함정에 설치되는 기자재의 수중 폭발 충격에 대한 내충격 성능 평가는 실험적 방법과 CAE를 이용한 해석적 방법으로 수행되고 있으나 시험적 방법의 경우 제약이 많을 뿐만 아니라 국내에 인증이 가능한 시험 시설 또한 부족한 것이 현실이다. CAE를 이용한 해석적 방법의 경우, 방법의 보수성으로 인하여 과설계의 우려가 있지만 실험적 방법이 안고 있는 거의 모든 문제를 해결할 수 있기 때문에 현재 제시되고 있는 방법들을 통하여 설계에 대한 평가가 가능하다. 기자재에 대한 설계 단계에서부터 기술의 적용으로 재

설계와 재제작에 따른 비용의 감소를 불러올 수 있다. 함정의 건조에 있어 새로운 시험 방법이 대두되지 않는 한 대형, 모듈화 기자재, 시험 시설에 설치가 불가능한 기자재에 대한 CAE 적용 성능 평가는 활용의 여지가 많으며 이를 응용한 연구와 기자재 개발이 더욱 기대된다.

## 참고문헌

- [1] G.J.. O'Hara, R.O., Belsheim, "Interim Design Values for Shock Design of Shipboard Equipment", 1963.
- [2] MIL-STD-901D, "Shock Tests. H.I(High Impact) Shipboard Machinery, Equipment, and Systems Requirements for", 1989.
- [3] Federal German Army Procurement Office, "Shock Resistance Experimental and Mathematical Proof", 1985
- [4] Boon-Hwee ANG, Mingguang Jeremy HAN, "Managing Shock Requirements of Shipboard Equipment", DSTA HORIZONS, Vol. 14, 2013, pp. 30-36.
- [5] Jung-hoon JUNG, "Shock Resistance Evaluation of equipment for Naval Vessel", The Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 1, 1998, pp. 21-28.
- [6] Sung-Wook BAE, Chin-suk HONG, Weui-Bong JEONG, Jin KIM, "Structural Safety Analysis of Propulsion Motors by BV043", The Korea Society for Noise and Vibration Engineering Conference, 2009, pp. 254-255.