

함정 내충격 기술 현황 및 발전방향

안진우, 설창원, 조운식(국방과학연구소)

권정일(한국기계연구원)

1. 서론

함정이 상선과 구별되는 것은 전투능력과 이를 효과적으로 지원하는 기동능력 및 생존능력을 보유하는 것이다. 본고에서는 함정 생존능력, 특히 전투 생존성(Combat Survivability) 확보 대책의 일환인 함정 내충격 기술의 개요, 국내외 기술 현황을 요약하고 향후 발전방향에 대해 제안하고자 한다.

전투 생존성은 "인공의 적대 환경을 회피하거나 이에 대하여 견디는 능력"으로 정의한다(Ball, 1994). 내충격 기술은 위협(충격) 작용에도 불구하고 함정이 부상 능력을 유지하고(Float), 기동성을 유지하며(Move), 지속적 전투능력을 보유(Fight)하는 것을 목표로 하며 이는 생존성 정의에 부합한다.

함정 내충격 기술이 다루는 주요 위협은 어뢰나 기뢰에 의한 수중폭발 충격(Underwater Explosion, UNDEX)이다. 이는 수중폭발 충격이 갖는 높은 손상 잠재력(중요도), 전투 시 영향 발생 가능성(빈도), 함 및 탑재장비에 대한 전반적 영향영향 범위, 각국 해군이 겪은 손상사례(경험)에 따른 것이다.

2. 함정 내충격 기술 현황

내충격 대책은 함정의 생존성을 유지하는 것을 기본 목표로 하지만, 어떤 한계를 넘어서는 영역은 협의의 생존성 대책으로 간주하고 있다. (폭발 충격 작용 후에도 함정이 필수기능을 유지하여 계속 임무를 수행하도록 설계하는 것이 내충격 기술이며, 어뢰 수발 근접 피격 등 극한 상황에서 함을 잃지 않거나 치명적 손상을 지연 시키는 등의 기술은 협의의 생존성 기술이다) 이에 따라 수중폭발의 최상위 수준을 제한하게 되며(내충격 정책 수립, 충격계수와 선체 휘핑 유발 폭발의 수준 등의 설정에 관계된다. 이에 따라 내충격 대책은 주로 비접촉 수중폭발로 한정된다. 제한한다고는 하나 전투 생존성 관점의 손상경험을 반영하므로 절대적으로 매우 큰 강도의 충격이다), 한정된 최상위 수준에 부합하는 선체구조, 탑재장비, 승조원 영향에 대한 하부 기준을 수립하여 설계, 건조를 수행한다. 설계, 구매, 제작 및 건조의 진행에 따라 각 단계에 적합한 평가를 수행하여 각 단계의 결과에 대한 요구조건 만족 여부를 검증 및 입증한다. 이를 체계공학 관점에 따라 그림 1

과 같이 표현할 수 있으며, 본 장에서는 그림 1의 각 단계별 내충격 기술현황에 대하여 기술하고자 한다.

그림 1의 체계를 이상적으로 실현하는 국가는 미국이다. 제 2차 세계 대전 중 당장의 수중폭발 손상에 대처하고자 영국과 함께 대책을 수립하기 시작했으며 당시의 기술적 한계 및 시급성에 따라 탑재장비 내충격 대책이 먼저 수립되었다. 전쟁 후 지속적으로 장비 내충격 설계 기술과 시험기술을 발전시켰으며, 해상 실선시험으로 내충격 능력을 종합 입증하는 체계를 구축하였다. 오랜 연구 실적에 기반하여 1990년대 이후에는 실용적인 전선(Whole Ship) 충격해석 기술을 개발하여 설계-해석, 시험검증 및 입증의 체계를 모두 구축하였다(Pusey, 1996). 또한 다수의 실선시험 경험과 걸프전, 테러 공격에 의한 손상사례 등으로부터 얻은 교훈(Lesson Learned)을 피드백하고 있다.

미국의 사례는 여러 나라 해군의 내충격 정책 및 기술에 영향을 미쳤으며 우리 해군의 경우도 그렇다. 따라서 본장에서 기술하는 기술현황은 미국의 사례를 수시로 참고하고 있다.

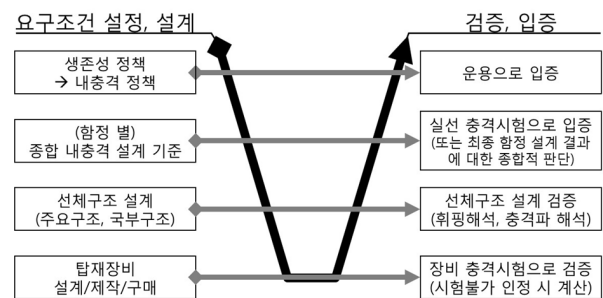


그림 1 내충격 요구조건 수립-설계-검증-입증 체계

2.1 함정 내충격 정책

미국에서는 자국 함정이 예상되는 적대환경에 대해 충분한 생존성을 가질 것을 법(Public Law 95-485, 1978)으로 명시하고 있으며 이에 근거하여 작성된 미 국방부(Department of Defense) 훈령과 해군 훈령 OPNAV 9070.1(Department of Navy, 1988)에 따라 수상함의 생존성에 대한 최상위 지침과 요구조건을 명시하고 있다. OPNAV 9070.1은 전투지역에서 활동할 가능성이 있는 모든 함정에 대해 등급(class) 별로 만

족해야할 요구수준을 구분하여 생존성 강화를 요구하고 있으며, 중요도가 낮은 함정에서 높은 함정의 순으로 Level I, II, III으로 수준을 제시하고 있다. Level I에서부터 내충격 강화 대책을 포함시키도록 하고 있고 Level II, III에는 Level I의 내용이 포함되며 위협의 수준과 대응능력의 수준을 높이고 있다. 즉 모든 전투지역 활동가능 함정에 대해 내충격 성능을 요구하면서 함정의 임무 중요도에 따라 대책의 수준을 달리 함을 유지할 수 있다.

미국의 구체적 실행사례나 다른 국가의 생존성 및 내충격 정책을 판단하기 위한 자료는 매우 제한되어 있다. 그러나 북대서양조약기구(NATO) 회원국 간의 합의로 도출된 가이드라인(STANAG, STANdardization AGreement)이 탑재장비 충격 요구수준을 범위형으로 제시하는 점(Regoord, 1997), NATO의 일원이나 독일 해군의 내충격 요구수준이 STANAG 기준의 최상위에 있다고 알려진 점, 독일 해군의 내충격 요구수준이 함정의 배수량에 따라 차등 적용되는 점(BWB, 1985) 등을 참고할 때 내충격 정책에는 함정의 중요도, 각국의 방위산업 수준 등을 종합적으로 고려하는 것으로 판단할 수 있다.

전투에서의 손상 경험으로 생존성 및 내충격 정책을 수립하고 하위(설계, 검증 등) 실행 대책을 수립해온 미국, 유럽 국가들과 달리 우리 함정의 내충격 대책에는 정책 보다는 하위 실행단계의 선진국 기준이 영향을 크게 미쳤다고 본다. 이는 함정별 내충격 정책 수립이나 일관된 내충격 대책의 적용, 예외적 상황에 대한 대처, 내충격 기준 발전을 저해하는 요소로서 극복되어야 한다.

2.2 함정 내충격 설계기준

내충격 정책을 구체적인 내충격 설계에 반영하고 설계 및 제작 결과를 검증하기 위해 공통 가이드라인과 함정 별 충격 설계기준서가 필요하다.

미국의 공통 기준서로는 함정일반사양서(US Navy, General Specification, 072)가 있었으며(현재는 미국의 공식 문서가 아니나 내용은 참고할 가치가 있다), 시험평가에 활용하는 기준서나 설계요구조건으로 제시될 수 있는 MIL-S-901, 탑재장비 및 받침대 충격설계계산 가이드인 NAVSEA-0908-LP-000-3010과 충격설계값 기준인 DDS 072-1(또는 NRL1396) 등이 있다. DDS 072-1은 비공개 자료이며 전반적으로 미국 잠수함 공통 충격기준에 대해서는 알려진 정보가 거의 없다. 독일의 경우 BV043 1985년 발표본이 대표적이다. 영국의 BR8470, BR3021 및 DefStan 기준서들,

NATO의 STANAG 기준서들이 있다. 이 기준서들 대부분은 기준서 자체가 비공개이거나 핵심적인 내용이 공개되지 않고 있다. 예를 들면 충격스펙트럼의 값이 비공개 상태로 제시된다. 공통 기준서를 참고하되 개별 함정의 특성에 따라 작성되는 것으로 추측되는 개별 함정에 대한 충격설계기준서 역시 수상함과 잠수함을 가리지 않고 공개되지 않는다.

국내 수상함의 공통 충격기준서는 국방선진국 공통 충격기준서들을 참고 및 유추하여 개발되어 있다. 개별 함정 별로 작성되는 잠수함 충격설계기준서로서 국내 최초 사례는 장보고-III Batch-I이다. 이 기준서는 장보고-III급 잠수함 도입에 따른 절충교역의 일환으로 수행된 기술전수 결과와 장보고-III 구매사양을 주로 참고하고 여러 국방선진국의 기준서 중 알려진 내용들을 참고하여 개발되었다. 발전방향을 모색하기 위해 문제점을 열거한다면, 복수 국가의 충격기준을 참고함에 따른 일관성 부족, 기준의 일관된 관철을 위해 필요한 충격시험 설비의 부분적 결핍, 발전방향 수립을 위한 조직적 인프라의 부족 등을 들 수 있다. 예를 들어 어떤 장비가 해머 시험기의 정격 하중을 초과하거나 수중에 노출되어 있다면 수중폭발로 시험하는 중중량충격시험기(Heavy Weight Shock Machine)로 시험해야 한다. 국내에 해당 시험기가 없으므로 불가피하게 계산으로 대체해야 하는 경우가 있다. 또한 미국 MIL-S-901의 해머 타격시험을 요구하였는데 해당 장비가 탄성마운트로 지지될 경우 설계에서는 시간이력 하중이 필요한 경우가 있다. 이 때 독일 공통기준에서 시간이력 하중을 차용하여 사용한다면 일관성이 결여되는 것이나 가용한 정보가 없다면 대체 방안이 없는 것이다. 이렇게 설계된 장비가 최종적으로 MIL-S-901을 통과하려면 수회의 시행착오가 수반될 수 있다.

공통 가이드라인이나 개별 함정 충격기준서 모두 불변 고정된 것이 아니며 지속적으로 검증하고 발전시켜야 한다. 과도한 것으로 드러난 기준은 완화되어야 하며 기준을 만족했으나 손상사례가 빈번히 발생한 경우 대체 기준이 마련되어야 한다. 이를 위해 손상사례를 추적하고 분석하여야 하며 교훈 반영 체계를 수립하여야 한다. 이를 지속적으로 수행하는 역할도 부여되어야 한다. 미국의 대표적인 함정기술연구소인 NSWC(Naval Surface Warfare Center) Carderock Division은 전문조직 유지, 내충격 기술의 개발, 해군 주도 검증과정에서의 참여를 통해 이러한 역할을 수행하고 있다.

2.3 함정 내충격 설계, 검증 및 입증

내충격 강화가 요구된 경우 함정의 구성요소에 따라 선체

구조, 탑재장비/설비, 받침대, 그리고 승조원 측면에서 각각 내충격 설계 기준에 부합하도록 강화 설계를 수행하고, 구현된 결과에 대하여 기준만족 여부를 검증하여야 한다. 실제로 운용 목적에 부합하는 결과가 도출되었는지 입증하는 과정도 필요하다.

2.3.1 선체구조

수중폭발은 폭발의 폭발이라는 하나의 이벤트에서 충격파와 저주파 맥동 가스구체(Gas Bubble)가 발생하여 함정에 손상을 가하게 된다. 함정 입장에서 충격하중인 이 두 가지 폭발 작용이 선체에 상이한 거동을 일으킨다(대한조선학회, 2012)(한국선급, 2014), 따라서 함정 선체구조에 대한 내충격 설계는 충격파와 가스구체에 대해 개별적으로 수행되어야 한다. 기본적으로는 주요 구조의 연속성 확보, 취성재료(Brittle Material) 사용 억제, 응력집중 회피, 경량화 설계와 같은 대책을 수립하여야 한다.

수상함 종강도 시스템 등 선체 주요구조의 제원 산정(Scantling)에서 통상 충격은 별도로 고려하지 않으며(기본적인 내충격성이 있다고 알려져 있다) 구조설계의 결과에 대해 가스구체에 의해 발생할 수 있는 선체구조의 급격한 저주파 응답인 휘핑에 대한 평가를 수행해서 부족 시 보완하는 것이다. 초기설계 단계에서는 1970년대에 개발된 유체 포텐셜 기반 하중도출 기법 및 주파수 중첩법에 의한 1차원 보 모델을 이용하여 검토한다(Hicks, 1986). 이를 기반으로 설계 후반부로 갈수록 상세한 선체구조와 중량 분포 자료를 반영하여 3차원 유한요소 해석모델을 이용한 방법으로 검토하게 된다.

선체 전체구조와 주요 장비들의 중량을 반영한 상태에서 국부구조의 충격손상 발생여부 검토 및 주요 탑재장비 지지부 위치에서의 충격응답 취득 관점에서 충격파에 대한 설계 및 검토(평가의 범주)를 수행한다. 이 검토에는 전선(Whole Ship) 충격해석 기술이 사용된다.

전선 충격해석 기술은 주요 탑재장비 및 설비가 반영된 상태에서 선체구조의 충격응답을 계산하기에 적합하다. 이는 내충격 설계의 다양한 분야에 적용될 가능성이 큼을 의미하며, 실선 충격시험의 준비 및 분석, 해석과 시험을 연계하여 시험 횟수를 줄이려는 용도로 현재에도 활발히 연구 및 적용되고 있는 기술이다. 전선 충격해석 기술은 주로 미국에서 1950년대부터 연구되었으며 처음에는 함의 전반적인 거동을 예측하기 위해 연구되었다. 1970년대에 도출된 DAA(Doubly Asymptotic Approximation) 이론(Geers, 1971)에 의해 비약적인 발전을 이뤄 1980년대에는 주로 잠수함 구조설계를 대상

으로 연구와 해석 소프트웨어 개발이 진행되어 USA-STAGS(Underwater Shock Analysis - Structural Analysis of General Shell)가 개발되었다(Felippa, 1984). 이 연구는 유한요소법과 수치해석 기술의 발전에도 기여하였다(Park, 1977). 실용적 전선 충격해석은 컴퓨팅 자원이 확대되었으며 DYNA계통의 Explicit Time Integration 코드들이 개발된 1990년대에 이르러 가능해졌다. 대표적인 것은 범용 동적해석 코드인 LS-DYNA와 DAA 기반 유체영역 해석 코드가 유체-구조 상호작용을 해석할 수 있도록 결합되어 실행되는 LS-DYNA/USA(Underwater Shock Analysis), 잠수함 전용인 EPSA(Elasto-Plastic Shell Analysis) 코드가 있다. 2000년대 초반부터는 유한체적법과 유한요소법을 매우 작은 시간단위에서 결합하여 해석하는 기술(일명 하이드로코드라 불리는 범주)이 활발히 사용되고 있으며 근사기법의 개입을 최소화하고 수중폭발의 물리적 작용을 직접 해석하는 기술로 인정받고 있다. 미국 해군 전용 코드인 DYSMAS가 수중충격 해석 분야에서 대표적인 하이드로코드이며 많은 범용 상용 하이드로코드들이 수중폭발 충격 문제를 해석할 수 있다.

2000년대 상용 하이드로코드들이 사용되고 LS-DYNA/USA가 미국 외에서 사용될 수 있기 전에 전선해석 코드들은 국내 입수가 불가능했다. 이에 따라 1980년대 후반부터 국방과학연구소는 전선 충격해석 기술을 연구하여 전선 응답 근사해석기술(송, 1996), 휘핑 해석기술(박, 1994) 및 DAA를 이용한 해석 소프트웨어를 개발하였다(박, 1999)(An, 2004). 국방과학연구소의 DAA 기반 소프트웨어는 우리 해군이 2000년에 실시한 다수의 소해함 실선충격시험에 활용되어 충격신호(가속도, 스트레인)를 예측함으로써 성공적인 데이터 획득에 기여하였다(Park, 2003).

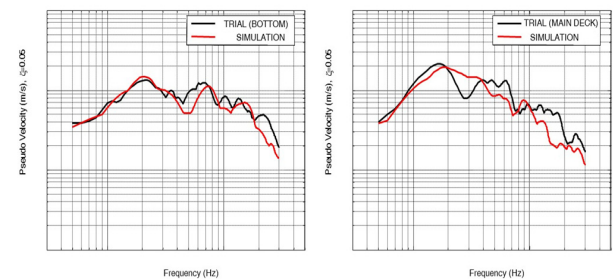


그림 2 전선충격해석과 시험계측의 비교

현재 우리 함정 개발에서 전선 충격해석과 3차원 휘핑해석은 LS-DYNA/USA를 사용하고 있으며 2000년대 이후 개발된 거의 모든 주요 함정 개발 프로젝트에 적용되고 있다. 함정

기본설계와 상세설계 단계에서 수행하며 주요 수행기관은 한국기계연구원이다. 전선해석 모델링과 시뮬레이션의 실용적 측면에서 국내 수준은 선진국 수준에 근접하였다. 그림 2는 LS-DYNA/USA를 이용하는 전선 충격해석 절차를 체계화하려는 목적으로 2004년에서 2007년까지 국방과학연구소와 한국기계연구원이 공동으로 수행한 연구 중 산출한 충격해석과 시험의 비교를 나타낸 것으로서 상호 부합성이 높음을 알게 되었다(Kwon, 2007).

2.3.2 탑재장비/설비 및 받침대

2.3.2.1 설계

탑재장비/설비(품목)에 대하여는 함정 필수기능에 대한 중요성에 따라 충격등급을 분류 지정하고, 설치위치를 구분하며, 검증 방법을 설정하는 것이 내충격 설계 요건의 중요한 부분을 차지한다. 받침대는 지지하는 품목의 분류에 따른다. 품목의 설계 시 품목 자체의 건전성을 유지해야 하는 것은 물론이고 품목의 일부 또는 전부가 떨어져 나가거나 주변 품목에 충돌하지 않도록 하여야 한다. 따라서 충격변위와 품목 간 이력 거리를 고려하는 배치를 수행하여야 한다.

요구조건을 만족하기 위한 내충격 설계는 이미 입증된 실적 사례를 참고하여 시작된다. 이는 과거의 경험과 공학적 분석으로부터 내충격 설계지식이 축적되어 있기 때문이다. 구체적인 예로서 취성재료(Brittle Material) 사용 억제, 응력집중 회피, 경량화 설계와 같은 대책이 있으며, 장비 또는 장비 구성품을 외팔보(Cantilever) 또는 돌출구조(Overhang)에 설치하는 것을 피해야 한다. 지지구조는 칼날 형으로 설치되는 것을 피해야 하며 정렬이 중요한 품목들은 가능한 공통 베이스 상에 설치하여야 한다. 이러한 설계지식은 개별 장비 충격시험, 실선 충격시험 등으로부터 얻어지는 새로운 지식에 의해 계속 확장되어야 한다.

내충격 대책 중 하나인 충격마운트 설치의 사실 필수적인 것이 아니다. 수중폭발 즉 위협의 위치와 강도는 함정에서 능동적으로 결정할 수 있는 것이 아니며 설계목적 상 그 수준을 제한하였다고는 하나 전투 중 이를 초과하는 충격이 가해지는 경우를 배제할 수 없다. 마운트 없이도 품목이 내충격성을 가지는 것이 원칙이며 충격변위도 가능한 억제되어야 한다.

상세한 탑재장비/설비 및 받침대 설계과정에서는 동적충격 설계해석법(Dynamic Design Analysis Method, DDAM) 등 모드론(Modal) 이론과 충격응답 스펙트럼 이론에 기초한 다양한 동역학 계산들을 수행하게 된다.

2.3.2.2 검증

탑재장비 및 받침대가 충격요구조건에 따라 설계 또는 제작되었음이 규정된 절차에 따라 검증되어야만 함정에 탑재될 수 있다. 품목의 내충격 성능 검증은 시험에 의하는 것이 필수적인 원칙이다. 만약 불가피한 사유로 계산에 의한 검증을 한다면 손상발생 메커니즘을 완전히 구현하지 못하며, 제작 상태가 아닌 도면 상태로 분석한다는 주요 제한점이 있음에 주의하여야 한다.

탑재장비 및 받침대 내충격 성능검증 방식은 미국방식과 유럽방식(독일, 네덜란드, NATO)으로 크게 나눌 수 있으며, 표 1에 두 방식의 차이를 비교하였다.

표 1 미국과 유럽의 장비 충격 시험검증 방법 비교

구분	미국	유럽
적용 규정	MIL-S-901D/ MIL-DTL-901E (2017)	STANAG 4141, 4549, 4150(NATO), BV043(독일) 등
충격 모사 개념	충격손상 모사	충격응답 모사 + 충격손상 모사
충격 시험기	표준화(LWSM, MWSM, FSP, LFSP, DSSM)	비표준화(일반충격시험장치), 개별 시험 건에 대한 조건과 결과 승인
충격 하중	해머 높이로 규정	충격응답 스펙트럼 규정 (하중 계측 필요)

미국의 시험방법은 기본적으로 해머(Hammer) 또는 실제 폭약을 이용한 수중폭발로 충격을 가하여 손상을 모사하는 방식이다. 이러한 충격의 방향과 크기는 무수한 장비의 손상사례 분석에 근거하여 도출된 경험적인 것으로 탑재장비의 중량 및 제한조건이 시험기별로 규정되어 있으며, 해머 시험기의 정격 시험 중량을 초과하거나 수중에 노출된 장비 및 외판에 직접 설치되는 장비는 중(重)중량충격시험기(Heavy Weight Shock Test Platform)에서 시험하도록 되어있다. 중중량충격시험기인 부유식 충격 플랫폼(Floating Shock Platform)에 실제 함정 탑재 설치 조건과 동일한 상태로 장비를 설치하고 수중폭발 충격을 가하는 방식이다. 미국 방식의 장비 충격시험에서 충격하중을 측정하는 요구사항은 원칙적으로 없으며, 장비의 구조적 손상 및 기능 이상 여부만을 판정기준으로 한다. 표 2에 미국에서 사용하고 있는 충격시험기의 종류를 제시하였으며, 표에 제시된

LWSM(Light Weight Shock Machine), MWSM(Medium Weight Shock Machine), FSP(Floating Shock Platform), LFSP(Large Floating Shock Platform)는 미 해군에 의해 표준화된 시험기를 사용하여 한다(Scavuzzo, 2000)(US Navy, 2017).

표 2 미국의 충격시험기에 따른 시험 가능 조건

충격시험기		시험가능 품목
경중량 충격시험기 (LWSM)		총중량 250kg 이하 품목 (시험품목 110kg 이하)
중간중량 충격시험기 (MWSM)		총중량 3,35톤 이하 품목 (시험품목 2,7톤 이하)
갑판 모사 충격시험기 (DSSM)		Class II 갑판설치 장비, 조건에 따른 Class I/II 및 Class III 갑판설치 장비 (시험품목 455kg 미만, 조건에 따라 1820 kg 이하도 허용)
중중량 충격 시험기	부유식 충격시험기 (FSP)	MWSM 기준 초과 품목, (중량과 관계없이) 수중노출 품목 및 외판 탑재 품목 (총중량 27톤 이하)
	대형 부유식 충격시험기 (LFSP)	MWSM 및 FSP 기준 초과 품목, (중량과 관계없이) 수중노출 품목 및 외판 탑재 품목 (총중량 180톤 이하)
	참고: 잠수식 충격시험기 (SSTV, FSS, A/B-1 등)	MIL-DTL-901E: 표준 시험기는 아니나 기술권한자의 승인 하에 적용가능한 시험기로 등재



그림 3 미국의 충격시험기(일부) 및 시험 장면

최근에 개정된 MIL-DTL-901E에는 DSSM(Deck Simulating Shock Machine)도 표준 충격시험기로 추가되었다. DSSM은 수중폭발 작용 시 갑판과 같이 유연한 구조에 탑재된 장비가 충격유발 진동에 의해 손상될 수 있는 경우를 고려하는 시험 장비로서 기존에 FSP로 시험하는 것을 대체할 목적으로 개발된 것이다. 미국은 정부기관 외에 Hi-Test, NTS 등 민간 수중 충격시험 전문 회사가 있고 이들도 LWSM, MWSM, FSP, LFSP, DSSM 등을 보유하고 있다. 그림 3에 미국 NTS사가

보유한 FSP 장치 및 호수 시험장과 Hi-Test사가 보유한 DSSM을 나타내었다.

유럽방식의 충격시험방법도 기본적으로 임팩트를 가하는 것이며 수중에 노출된 장비는 미국의 중중량충격시험과 유사한 충격 플랫폼에서 수중폭발 시험하도록 하고 있다. 사전에 충격스펙트럼을 규정하고 시험 시 충격스펙트럼을 다시 계측하여 규정된 충격스펙트럼을 만족하는지를 판정한다. 따라서 충격응답 시뮬레이션과 충격손상 시뮬레이션을 병행하는 것이라고 볼 수 있다. 사용가능한 충격 시험기를 해군이 승인하지만, 특정 장비로 표준화하지는 않는다. 독일 공통충격기준인 BV043에서는 시험중량이 정격 중량을 초과하거나 수중에 노출된 경우에 대하여 BWB WTD-71에서 폭발 시험하도록 규정하고 있다. 스웨덴에서는 잠수함 탑재장비에 대하여 미국의 SSTV(Submarine Shock Test Vehicle) 및 FSS(Full Scale Section)와 유사한 시험장치(Full Scale Submarine Test Section, Stalmyggen, 그림 4 참조)를 사용하고 있다(Berg, 2015). NATO의 모든 국가가 수중폭발 충격시험 플랫폼을 운영하지 여부는 미상이나 STANAG 4150으로 기준이 제시되어 있다.

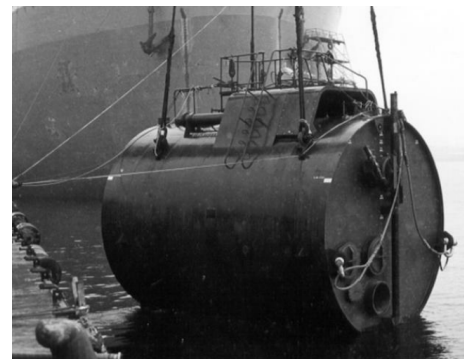


그림 4 Stalmyggen, 스웨덴

충격시험에 의한 내충격 성능검증이 불가하다고 판단하는 경우, 계산으로 최소한의 내충격 성능을 입증하여야 한다. 미국에서 1960년대에 개발된 DDAM은 대표적인 장비 및 받침대 내충격 계산방법이다(충격 설계에 사용하는 DDAM과 같은 것이다). 미국의 경우 계산과정에서 임의성을 가능한 배제하기 위해 모델링, 계산절차 및 판정절차를 문서로서 상세히 규정하고 있다(NAVSEA, 1995). DDAM은 장비가 마운트를 통하지 않고 선체에 직접 부착된 경우에 적용하는 것이 원칙이므로, DDAM 적용이 불가한 경우와 특별히 요구하는 경우에 시간이력하중(Time History Loading)에 의한 과도응답해석(Transient Analysis)을 수행할 수 있다. 유럽 방식 기준의 범

주에서도 스펙트럼 해석과 시간영역 과도응답 해석을 통해 계산을 수행할 수 있다.

국내에서 미국 MIL-S-901에 따라 충격 시험이 가능한 시험설비로서 한국기계연구원과 대양전기(주)가 LWSM(경중량 충격시험기)과 MWSM(중간중량 충격시험기)을 각각 1조씩 운영하고 있으며, 조선기자재연구원에서는 LWSM 1조를 보유하고 있다. 그림 5에 한국기계연구원이 보유한 LWSM과 MWSM을 나타내었다.



그림 5 한국기계연구원의 LWSM 및 MWSM

그간 국내에는 유럽 방식의 충격시험을 실시할 수 있는 시험기가 없었다. 특히 독일의 영향으로 유럽 방식 충격기준을 주로 적용하는 잠수함 분야에서 매우 큰 결핍사항이었다. 2016년 국방과학연구소 항공시험장에 유럽 방식 중 타격시험 조건에 따라 시험할 수 있는 시험기들이 개발, 설치되어 시범 운용 중이므로 향후 시험가능 영역이 확충될 전망이다.(그림 6) 개발된 충격시험장비는 충격하중을 기계적으로 모사하고, 계측된 충격 입력가속도를 기준으로 사전에 규정된 3선 충격 스펙트럼(Tripartite Shock Response Spectrum)을 만족하는지를 판정하는 시험장비이며, 충격방향을 기준으로 수직형과 수평형 충격시험장비로 구분된다. 수직형 충격시험장비(LVSM, MVSM)는 네덜란드 TNO와 기술협력으로 브레이크볼트의 파단 에너지를 이용하여 가속 및 감속 스프링으로 충격파의 크기 및 주기를 결정한다. 수평형 충격시험장비(LHSM, MHSM, HHSM)는 이중사인 충격파(Dual Sine Pulse)를 정밀하게 모사할 수 있도록 충격에너지를 생성시키는 유/공압 속도발생기 및 1차 충격파형 조절 프로그래머, 그리고 2차 충격파형 조절용 공압 스프링 또는 프로그래머와 데미질량 및 MR 댐퍼로 구성된 파형조절기부로 구성되어있다. 특히 수평형 충격시험기는 이중사인 충격파뿐만 아니라 함정 갑판 등과 같이 상대적으로 진동이 포함된 위치에 탑재된 장비들의 충격 생존성 평가 시에는 1차 및 2차 충격파와 잔류진동을 구현할 수 있는 특징이 있으며, MR댐퍼를 활용하여 2차 충격파와 잔류진동을 제어할 수 있도록 개발되었다(Kim, 2016). 충격시험은

시험방법의 어려움, 가속도센서 계측에 대한 민감성, 시험장비의 특성 등이 시험결과에 크게 영향을 미치므로, 신뢰성 있는 시험결과를 얻기 위해서는 개발된 충격시험기들의 기술적인 특성을 고려한 시험방법의 유효성이 먼저 확보되어야 한다. 이를 위해 시험규격에 따른 시험절차, 견고하게 설계된 더미 시험체를 활용한 시험자간 숙련도시험 및 균질도시험 기법, 센서 및 계측기기의 소급성 확보 기법을 개발하였다. 시험 결과의 충족 여부를 평가하기 위한 평가기준 등을 확정할 예정이며 시험방법 유효성위원회를 통하여 국내개발 이중사인파 충격시험장비를 활용한 지상 충격시험방법의 유효성 확보를 추진하고 있다. 또한, 충격 파형을 정밀하게 모사하기 위하여 다양한 충격 입력 조건들에 대한 DB를 구축 중이므로, 함정 및 잠수함 탑재장비들에 대한 신뢰성 있는 충격 보증시험을 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

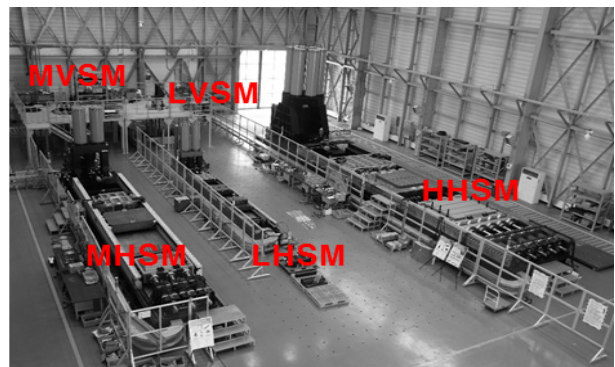


그림 6 국방과학연구소의 유럽 방식 충격시험기

한편, 미국 MIL-DTL-901E의 DSSM 충격시험기와 중중량 충격시험기는 현재 국내에 확보되어 있지 않다. 특히 중중량 충격시험 능력의 결여는 본질적으로 수중폭발 시험에 의해서만 검증되어야 하는 탑재품목(충격파를 직접 받는 프로펠러, 러더, 소나 등 접수 장비, 중중량 장비)에 대한 내충격 성능 보장을 위한 검증 체계를 제한하고 있는 실정이다.

국내 시험 인프라가 완전히 구비되지 못함에 따라 대체적 수단인 계산에 의하여 검증하는 것이 불가피한 경우가 아직 빈번히 발생한다. 특히 중량이 크거나 수중에 있는 중요 장비들이 여기에 해당된다. 계산 검증 방법으로는 미국의 DDAM에 의하거나 시간영역 충격해석을 수행하고 있다. DDAM의 경우 미국의 현행 충격설계값(DDS072-1, 자국 비밀로 분류됨) 대신에 1960년대에 공개된 충격설계값인 NRL 1396을 혼용하여 적용하기도 한다. 시간영역 충격해석에 대한 하중은 적절한 값이 기준으로 제시되거나 스펙트럼 기준과 일관되게 제시되어야 한다. 현재 국내에서는 특정 충격스펙트럼 값으로

부터 역으로 산출되는 가속도 시간이력을 획일적으로 적용하고 있어서 기준 불일치의 문제가 발생하는 경우가 있다.

시험 인프라 결여로 인해 계산으로 검증하는 경우 구조적 변위와 스트레인으로 한정되는 해석 결과만으로는 대상 탑재품의 기능(Functionality) 검증에 명백한 한계가 있다. 계산으로 검증하여야 하는 사유에 대한 타당성, 모델링, 해석방법 및 해석결과에 대하여 면밀한 검토가 이루어져야 한다.

2.3.3 실선충격시험을 통한 입증

장비가 모두 탑재된 건조완료 상태 함정에 대해 종합적인 내충격 기준 적용의 타당성 및 이에 대한 성능을 확인하기 위하여 실선충격시험(FSST, Full Ship Shock Test(Trial))을 실시할 수 있다. 이는 대상함의 내충격 성능에 대한 시험평가의 개념이 아니라 적용된 기준을 전투 상황에 비교하여 입증하는 것으로 보아야 한다. 실제로 미국 해군은 인수 후 시운전과 결함보수(PSA, Post Shakedown Availability) 기간 사이에 FSST를 실시하며 복구 비용이 대부분을 차지하는 막대한 시험비용을 해군 예산으로 편성하고 있다. 즉 FSST는 해군의 주관 하에 실시하는 시험으로 내충격 설계기준에 대한 개선점 도출과 설계 또는 건조 상의 오류 발견 및 후속함 보완사항 도출을 가능하게 한다. 승조원들에게 모의 전투상황을 체험하게 하는 훈련의 의미도 있다. FSST는 도면 상태가 아니라, 실제 건조에 반영된 상태에 대하여 전투 상황 대응정도를 입증한다는 점에서 큰 의미가 있다. 또한 함정 설계 및 건조과정에서 내충격 성능을 보다 엄격하게 통제하도록 유도하는 부수적 효과도 거둘 수 있다. 그림 7에 미국에서 실시한 FSST 장면을 나타내었다.



그림 7 실선 충격시험 장면(미국)

미국은 법률로 무기체계에 대한 LFT&E(Live Fire Test and Evaluation)를 강제하고 있으며, 이에 따라 수상함과 잠수함

모두 클래스 선도함에 대해 FSST를 실시하는 것을 원칙으로 하고 있고, 현재까지도 이 원칙을 유지하고 있다(Bloomberg politics, 2018). 근래에 미국에서도 비용과 환경보호 문제로 FSST를 대체하거나 횡수 감소를 원하고 있고 유력한 방법으로 전선충격해석기술에 주목하고 있다. 또한 무폭약 시험기술을 연구하고 있다. 스웨덴의 경우 1961년 이후 잠수함에 대하여 실선 충격시험을 실시하고 있다고 알려져 있다(Berg, 2015). 기타 유럽 국가에서 잠수함 또는 수상함에 대한 실선 충격시험을 실제로 실시하는 여부는 알 수 없으나 NATO STANAG 4137 등의 절차서는 있다.

국내의 경우, 소수의 실선 충격시험 사례가 있긴 하지만 취득 데이터와 시험 대상 함정의 종류가 매우 제한적인 상태다.

한편, FSST에 대한 여러 가지 현실적인 어려움으로 인해 전선 충격해석이 FSST의 대안 또는 보조수단이 될 수 있다. 전선 충격해석에서 함정의 실제 건조상태가 아니라 도면 및 요구조건을 반영한다는 점을 감수한다고 해도 탑재장비 손상 평가를 수행할 수 있는 방법은 필수적으로 개발되어야 한다.

미국 등 소수 국가만이 실시하는 FSST를 우리도 반드시 실시해야 하는 것은 아닐지라도 실선 충격시험이 갖는 본질적 의의(건조완료 상태에서의 내충격 성능 입증, 적용된 설계기준에 대한 입증, 전력화 투입 전 전투대비 태세 입증)를 고려하여 대안을 수립하여야 한다. 설계 및 건조 측면에서만 고려한다면, 선체 및 장비에 대해 적용된 설계 및 검증 결과를 종합적으로 판단하는 과정이 필요하다. 특히 일관된 탑재장비 검증시험체계를 구축하고 시험을 통한 손상사례 수집과 데이터 획득, 개선점 도출, 차기 함 획득에 반영되는 절차가 체계적으로 수립되어야 한다. 이를 통해 우리 함정에 대한 독자적이고 일관된 내충격 정책 수립, 세부지침 수립, 내충격 기술의 발전을 기대할 수 있고 궁극적으로는 균형된 생존성 확보가 가능해지기 때문이다.

3. 함정 내충격 기술 발전방향

전장상황 변화, 위협 무기체계 발전, 선체 거동 양상에 대한 새로운 관심과 지식이 도출될 가능성은 충분하며 이에 따라 우리 함정을 위한 내충격 기술도 계속 발전시켜야 한다. 방위사업청의 지원 하에 국방과학연구소가 관리하는 "수중 근접폭발 특화연구실(KAIST, 2015~2020)"은 수중 근접폭발 다물리 상호작용 연구, 잠수체에 대한 내파(implosion) 영향연구, 수중폭발 실험 스케일링 이펙트 연구, 무폭약 수중충격 실험기술 연구로 구성되어 있으며 이들은 수중폭발 기술에 대한 새로운 관심을 반영한 기초연구 사례다.

내충격 요구조건 수립에서 검증, 입증에 이르기까지 합리적이고 일관된 체계를 구축하여야 한다. 수립된 설계기준을 관철할 수 있는 검증 체계가 완비되어야 하며 수중폭발 실험으로 충격성능을 검증하는 중중량 충격시험기와 시험장이 확보되어야 하는 것이 핵심사항이라고 판단하지만, 획득, 운영에 관한 난제가 해결되어야 하는 것도 사실이다. 단기적으로는 하이드로코드를 이용하여 중중량 충격시험기 시험을 모사하는 모델링, 시뮬레이션, 평가에 이르는 과정에 대해 절차를 도출하는 등 체계적인 과정이 수립되고 설계자들 사이에 공유되어야 한다.

함정 획득과정에서의 경험 및 새로운 연구 개발을 통해 획득한 지식을 내충격 기준으로 피드백하여야 한다. 과거의 기준과 그로 인한 결과물들이 당시의 기술적 한계에서 최선을 다한 것임을 전제하여 레거시 결과를 받아들이고 새로 획득된 교훈을 피드백할 필요가 있다.

독자적인 내충격 정책과 설계기준을 수립할 수 있어야 하며 이를 위해 손상사례와 실험에 의한 충격응답 데이터를 체계적으로 확보하여야 한다. 함정 충격의 발생 근원이 함의 밖에서 발생하는 수중폭발이며 이를 선체가 받아 전달하고 다시 장비가 가진됨을 고려하면 수중폭발 작용과 이에 대한 분석으로부터 기준수립 연구가 출발되어야 함을 알 수 있다.

지속적으로 함정 내충격 해석 및 평가기술이 고도화 되어야 한다. 다음 문제들은 지금보다 명확히 분석되어야 하는 사례들이고 M&S 기술 적용이 가능한 분야로 보인다.

- 천해 등 제한된 수역에서의 수상함, 잠수함 전선 해석
- 중중량장비 충격기준 보상(Reduction) 문제
- 과도하게 넓게 분포된 장비의 검증 방안
- 격벽·갑판 등 다중 지지된 장비의 검증 방안
- 중중량충격시험 방식의 해석에 의한 검증 방안
- 유체가 내부 또는 내·외부에 있는 장비 또는 구조의 충격검증 방안
- 동적응력 작용을 고려한 평가기준 적용방법
- 순간적으로 발생하는 응력의 평가 등

우리 함정 개발의 역사가 오래되었으나 수요의 문제로 국내 내충격 기술 인프라가 부족하다. 예를 들어 전문 해석 기술자들에게조차 충격해석 기술은 생소한 것이며 필요 이상으로 어려움을 느끼고 있다. 따라서, 좀 더 절차를 체계화, 보편화할 필요가 있다. 국내 함정 건조 규모는 전문 인력 확대를 유도할 만큼 크다고 볼 수 없으며, 어려운 여건 속에서도 산·학·연의 소그룹 중심으로 내충격을 비롯한 특수 성능 관련 기술을 개발, 유지하여 왔다. 함정 건조 사업의 다소와 별개로 내충격 분야를 비롯한 특수성능 관련 전문 인력을 일정

수준으로 유지, 관리, 양성하고, 양성된 인력을 받아들일 수 있는 조직과 지원이 필요하다. 또한, 부족한 인적 인프라라도 결집할 수 있도록 관련 기관간의 협력 활성화 방안이 마련되어야 한다.

4. 결론

함정에 승함하면 많은 장비들이 소음 및 충격차단 마운트에 지지되어 있는 것을 볼 수 있다. 사실 내충격 기술과 관련하여 가시적인 것은 마운트가 전부라고도 할 수 있다. 내충격 기술은 적용 결과가 눈에 띄지도 소음처럼 들리지도 않으나 함정 선체구조와 장비 자체, 배치에 이르기까지 전반적인 영향을 주는 기술이며, 함정이 위협에 노출되었을 때 함의 생존성을 유지하게 하는 핵심기술이다.

보고를 통하여 함정 설계 및 건조과정에서 내충격 성능을 보다 일관되게 통제할 필요에 대해 강조하였으며, 기술 발전을 지속할 수 있도록 다음 사항들을 제안하였다.

- 설계 기준을 관철할 수 있는 검증체계 구축
- 새로운 지식을 피드백할 수 있는 제도 유연성 확보
- 독자적인 정책과 설계기준을 수립할 수 있는 손상사례와 데이터 확보
- M&S 기술발전 및 고도화
- 국내 설계, 연구개발 저변 확대

참고 문헌

대한조선학회 [함정, 텍스트북스] (2012).
 박병욱, 안진우, 조윤식 [선체 휘핑 해석기법 연구, 국방과학연구소 보고서] (1994).
 박병욱, 안진우 [실선 충격해석방안 연구(I), 국방과학연구소 보고서] (1999).
 송준태, 박병욱, 안진우, 조윤식 [선체거더 충격응답의 근사해석, 대한조선학회 논문집 33권 2호] (1996).
 한국선급 [선박 진동·소음 제어지침, 텍스트북스] (2014).
 An, C.W, Kim, D.K., Park, B.W., Ham, I.B. [A Ship Shock Analysis Method with Surface Cut-off and Applications, 75th Shock and Vibration Symposium] (2004).
 Ball, R.E., Calvano, C.N. [Establishing the Fundamentals of a Surface Ship Survivability Design Discipline, Naval Engineers Journal] (Jan, 1994).
 Berg, R. [Underwater Warfare and Stealth above the

Surface, Littoral OpTech East 2015, Tokyo, Japan] (2015).

Bloomberg politics [Senators Urge Mattis Not to Delay Shock Test on Costly Carrier, www.bloomberg.com/amp/news/articles/2018-02-09/senators-urge-mattis-not-to-delay-shock-test-on-costly-carrier] (Feb. 9, 2018).

BWB [BV043, Shock Resistance-Experimental and Mathematical Proof] (1985).

Department of the Navy [Survivability Policy for Surface Ships of the U. S. Navy, OPNAV Instruction 9070.1] (1988).

Felippa, C.A., DeRuntz, J.A. [Finite Element Analysis of Shock Induced Hull Cavitation, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 44, 297-337] (1984).

Geers, T.L. [Residual Potential and Approximate Methods for Three Dimensional Fluid-Structure Interaction Problems, J. Acoust. Soc. Am., 49, 1505-1510] (1971).

Hicks, A.N. [Explosion Induced Hull Whipping, Advances in Marine Structures, Elsevier Science Publishers, pp.390-410] (1986).

Kim T.H, Bae J.S., Shul C.W. [Investigation on the parameter determination and implementation of a dual-pulse shock test machine using a MR damper, Journal of Mechanical Science and Technology 30(12) 5381~5387] (2016).

Kwon, J.I, Chung J.H., Choi, T.M., An, C.W., Cho, Y.S. [Development of an Integrated Framework for UNDEX Ship Shock Modeling and Simulation (2): Application” , 78th Shock and Vibration Symposium] (2007).

NAVSEA [Shock Design Criteria for Surface Ships, NAVSEA Report 0908-LP-000-3010, Rev. 1.] (1995).

Park, K.C., Felippa, C.A., DeRuntz, J.A. [Stabilization of Staggered Solution Procedure for Fluid-Structure Interaction Analysis, Comput. Methods for Fluid Structure Problems, ASME] (1977).

Park, I.K., Kim, J.C., An, C.W., Cho, D.S. [Measurement of Naval Ship Responses to Underwater Explosion Shock Loadings, Shock and Vibration J., 10 365,-377] (2003).

Pusey, H.C. [50 Years of Shock and Vibration Technology, The Shock and Vibration Information Center(SAVIAC), SAVIAC Monograph SVM-15] (1996).

Regoord R. [Proposed NATO Standardization Agreement

on Testing of Surface Ship Equipment on Shock Testing Machines, 68th Shock and Vibration symposium] (1997).

Scavuzzo, R.J. [Naval Shock Analysis and Design, The Shock and Vibration Information Center(SAVIAC), SAVIAC Monograph SVM-17] (2000).

Tacey, R.K., [IMPLOSION RESEARCH, Improving Safety of Submarine Pressure Hulls and Pressure Hull Systems, SeaFrame(Carderock Division Publication), Vol.4, Issue 1] (2008).

US Navy [DETAIL SPECIFICATION: Shock Tests, High-Impact Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirement for, MIL-DTL-901E] (2017).

안진우



- 1963년생
- 1988년 서울대학교 조선공학 석사
- 현 재 : 국방과학연구소 해양기술연구원 수석연구원
- 관심분야 : 함정개념형성연구, 함정내충격설계
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : chinwan@add.re.kr

설창원



- 1961년생
- 2001년 연세대학교 기계공학 박사
- 현 재 : 국방과학연구소 항공기술연구원 수석연구원
- 관심분야 : 충격시험평가
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : shulcw@add.re.kr

조윤식



- 1966년생
- 1991년 서울대학교 조선공학 석사
- 현 재 : 국방과학연구소 해양기술연구원 책임연구원
- 관심분야 : 함정개념형성연구, 함정구조해석
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : yscho@add.re.kr

권정일



- 1974년생
- 2006년 한국해양대학교 해양시스템공학 박사
- 현 재 : 한국기계연구원 책임연구원
- 관심분야 : 함정 생존성, 내충격 분야
- 연락처 : ***-****-****
- E-mail : jikweon@kimm.re.kr