

함정 설계의 생존성 향상 방안에 관한 연구 I

- Box Girder를 고려한 설계 방법 -

김재현* · 박명규**

* 현대중공업/한국해양대학교 해양시스템공학과 박사과정, ** 한국해양대학교 해양시스템공학부 교수

A Study of Survivability Improvement Method for Naval Ships' Design I

- Design Method Considering Box Girder -

Jae-Hyun Kim* · Myeong-Gyu Park**

* Hyundai Heavy Industry, Ulsan 682-792, Korea / National Korea Maritime University Graduate School, Pusan 606-791, Korea
** Division of Maritime Systems Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요약 : 함정은 적과의 전투 환경에서 충분한 전투력을 발휘하여야 하고 우수한 공격 능력뿐만 아니라 적의 위협 무기에 대한 적절한 방어 능력을 반드시 갖추어야 한다. 함정의 방어 능력은 생존성으로 표현되고 있다. 함정의 생존성을 향상시키는데는 민감성의 감소대책이 가장 효과적이라고 할 수 있으나, 수상 전투 함정은 노출되기 쉽고 공격을 받을 수 있는 위협 무기가 매우 다양하기 때문에 취약성의 감소대책이 보다 강조되고 있다. 취약성의 감소대책으로는 이중선체, 상자형 거더(box girder), 이중 횡 격벽 및 방탄 강화 격벽의 설치, 파편 등의 방벽 설치 등의 다양한 방법이 있으나, 현실적으로 많은 비용과 중량 증가 등의 요인이 발생함으로 소요비용 대비 취약성 감소 효율 측면을 고려하여 주어진 설계 제한 범위 내에서 적용 가능한 보호 수준을 결정하여야 한다. 본 논문에서는 생존성 향상을 위한 선체 구조 설계기술의 평가 절차와 대책에 대한 방법론 등을 검토하고, 특히 상자형 거더 설치가 선체 구조의 생존성 향상에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 상자형 거더의 효율성을 수치해석을 통하여 살펴보고, 해석 결과 상자형 거더의 설치는 생존성을 향상시킬 수 있는 유효한 설계 방법임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 함정, 생존성, 민감성, 취약성 감소대책, 상자형 거더, 이중 횡 격벽, 방탄 강화 격벽

Abstract : In the combat environments at the sea, the naval ships should have enough structural integrity to perform the task under the enemy's attack and possible damages. Although the naval ships can be damaged from the enemy's attack, those damages should be minimized and the naval ships must maintain their combat capabilities continuously after recoveries from the damages. Therefore, it is very important for modern naval ships, especially combat naval ships, to ensure the survivability. This paper reviewed the developing procedure for the technique of the naval ships structures and described the design method, especially box girder systems considering survivability. The efficiency of box girder is examined by numerical simulation, and it is found that the establishment of box girder is a good design method to improve the survivability.

Key words : combat naval ships, survivability, susceptibility, vulnerability, box girder, blast hardened bulkhead

1. 서론

함정은 적과의 전투 환경에서 충분한 전투력을 발휘하여야 하고 우수한 공격 능력뿐만 아니라 적의 위협 무기에 대한 적절한 방어 능력을 반드시 갖추어야 한다. 함정의 방어 능력은 생존성으로 표현되고 있다. 생존성(또는 생존성, survivability)은 “전투 환경에서 임무 수행을 계속 하기 위한 시스템의 능력” 또는 “적의 위협 무기를 회피하거나 견디는 능력”으로 정의된다(Said 1995). 함정의 생존성 목표는 전투 환경하의 어떤 위협 세력으로부터 함정이 생존하여 기동성과 전투 성능을 유지함으로써 주어진 임무를 지속적으로 수행하는데 있다. 생존성은 위협 단계 별로 민감성(susceptibility), 취약성

(vulnerability), 회복성(recoverability)의 관계로 표현 할 수 있다.

함정의 생존성을 향상시키는데는 능동적 방어 방법, 즉 민감성의 감소대책이 가장 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 현대의 전투 환경은 매우 복잡하고 입체적이며 탐지기술이 고도로 발전되어 적의 위협무기를 완전히 회피하거나 차단하는 것은 거의 불가능한 상태이다. 따라서 함정은 적의 위협무기에 노출되어 공격을 받을 가능성이 항상 있다고 간주하여야 하며 이에 대한 적절한 대책이 필요하다.

이러한 이유로 함정은 능동적 방어 능력과 수동적 방어능력이 함께 요구되며 상호 균형을 갖추는 것이 매우 중요하다. 특히 수상 전투 함정은 선천적인 은밀성을 가진 잠수함에 비

* sjh.kim@hananet.net 052)230-5553

** 정희원, mkpark@mail.hhu.ac.kr 051)410-4304

하여 상대적으로 노출되기 쉽고 공격을 받을 수 있는 위협 무기가 매우 다양하기 때문에 수동적 방어 대책의 강화, 즉 취약성의 감소대책이 보다 강조되고 있다. 생존성 향상을 위한 강화 대책의 적용에는 현실적으로 많은 비용과 중량 증가 등의 요인이 발생함으로 소요비용 대비 취약성 감소 효율 측면을 고려하여 주어진 설계 제한 범위 내에서 적용 가능한 보호 수준을 결정하여야 한다. 함정의 적용된 생존성의 수준은 예상되는 전투 시나리오에 적절한 위협무기 영향으로부터 탐지 가능성 최소화, 피격 가능성 최소화 및 피격 시 견디거나 복구하는 능력 최대화 정도에 의하여 평가될 수 있다.

본 논문에서는 생존성 향상을 위한 선체 구조 설계기술의 발전 과정을 살펴보고 함의 구조와 장비를 보호함으로써 함의 피격 시 중요 시스템의 피해를 최소화하고 지속적인 기동력과 전투력 유지 능력을 증대하여 함의 생존 확률을 높이기 위해 수행하는 평가 절차와 대책에 대한 방법론 등을 검토하였으며, 특히 취약성 감소대책 중 하나인 상자형 거더(box girder)의 설치 및 효과 등을 살펴보고자 한다.

2. 생존성 향상을 위한 선체 구조 설계 기술의 발달 과정

함정의 생존성을 향상시키기 위한 기술은 새로운 무기의 출현과 해전 양상의 변화에 따라 끊임없이 발전되어 왔다. 이들 중 생존성 향상을 위한 선체 구조 설계기술의 발전 과정을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 19세기 중반

19세기 중반에는 함포가 대형화되고 포탄의 위력이 증대됨에 따라 수선 상부의 새로운 방호(Protection)가 요구되었다. 이에 대하여 1859년 프랑스의 5,000톤급 전함 Gloile에는 선체의 주요 부분에 120 mm의 매우 두꺼운 철판을 설치하였다.

이러한 방호 구조를 설치한 전함, 즉 장갑함(iron clad)은 이후에 보편화되어 2차 대전까지 이어져 왔으나 방호 구조의 과도한 중량 문제와 함포의 위력 증대로 인한 실효성 문제로 점차 소멸되었다(Aoki 1976, Sims 1983).

2.2 세계 제1차 및 2차 대전

제1차 대전(1914~1918년) 중에는 접촉 기뢰의 출현으로 많은 함정이 피해를 입었다. 이에 따라 1차 대전 후반부터는 접촉성 수중 폭발에 의한 침몰을 방지하기 위하여 전함 및 순양함 등에 수밀 구획 배치를 세분화하고 수중 방어 구조(수선 하부 현측 부분에 다수의 중격벽을 설치하고 그 사이의 공간을 방호 구획 또는 연료 탱크로 배치한 구조)를 설치한 바 있다. 당시에 도입된 조밀한 간격의 수밀 구획 배치 개념은 오늘날까지 계속 적용되고 있다(Aoki 1976, Sims 1983).

제2차 대전(1939~1945년) 중에는 어뢰, 자기 및 음향기뢰 등 수중 무기의 위협이 크게 증가되어 전투에 참여한 함정의

절반 이상이 손상을 입었다. 특히 기뢰의 비 접촉성 수중 폭발로 인한 피해가 가장 심하였다. 비 접촉성 수중 폭발은 선체 구조의 직접적인 손상보다는 탑재 장비 및 기기에 손상을 입혀 함정의 기동성 및 전투 능력을 마비 시켰다. 이에 따라 2차 대전 중반부터는 미국 및 영국 등에서 탑재 장비 및 받침대 구조에 대해 내 충격 설계를 도입하였다. 그 당시에 도입된 비 접촉성 수중폭발에 대한 내 충격 설계의 개념은 현재까지도 계속 적용되고 있다(Pusey 1984).

2.3 1960년대 이후

1960년대 이후의 해전에서는 대함 미사일이 가장 위협적인 무기로 등장하였다. 미사일 공격에 의해 함정이 침몰된 첫 번째 사례는 1967년 10월의 중동 전쟁에서 이집트의 소형 고속정이 함대함 미사일 Styx를 4발 발사하여 이스라엘 구축함 Eilat를 침몰시킨 사건을 들 수 있다. 또한 1982년 5월의 포클랜드 전쟁에서는 아르헨티나의 전투기에서 발사한 2발의 공대함 미사일 Exocet에 의해 영국 구축함 Sheffield가 침몰된 바 있다. 미사일 공격으로 발생한 화재 피해는 당시에 알루미늄 상부 구조를 채용하던 미국 함정에 큰 교훈을 주었으며 그 결과로 미 해군은 1984년부터 상부 구조의 표준 재료를 내화성이 보다 강한 강 구조로 변경한 바 있다(Sielski 1987).

2.4 현대의 전투 환경 및 설계 개념

현대의 전투환경은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 위협무기가 매우 다양하고 복잡하기 때문에 적절한 방어 대책의 강구가 기술적으로 점차 어려워지고 있다. 왜냐하면 함정의 생존성을 강화할수록 중량, 공간 및 비용의 증대가 불가피하여 현실적인 제약이 따르기 때문이다.

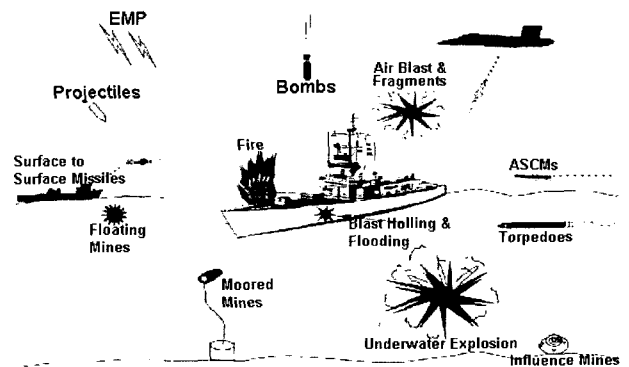


Fig. 1 Anti-shiping threat weapons and effect

현재 적용되고 있는 설계 개념을 Lloyd의 수상함 잠정규정(1999)을 인용하여 간략히 소개하면 다음과 같다.

1) 손상 메카니즘(Damage mechanism)

Fig. 1과 같은 위협 무기의 공격에 의해 발생 될 수 있는 선체의 손상 메카니즘은 Fig. 2에 제시한 바와 같이 초기 적의

공격에 대한 민감성 해석 단계, 그리고 이 후 손상에 대한 취약성 해석 단계로 이루어지며, 취약성 해석은 화재, 침수 및 구조 손상 등으로 분리 할 수 있다.

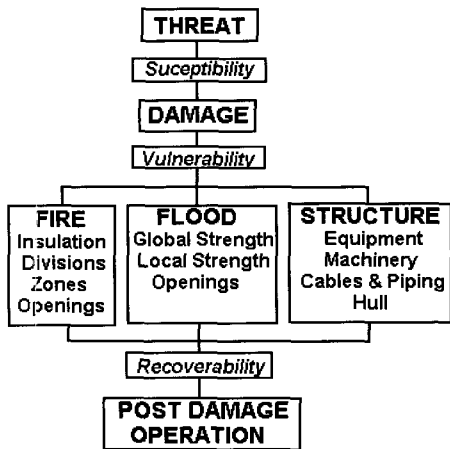


Fig. 2 Whole ships structural survivability

2) 구조 손상

구조 손상에는 장비 및 기기의 손상을 포함하고 있다. 또한 구조 손상의 수준은 Fig. 3에 제시한바 와 같이 Level A, B, C로 분류할 수 있다. 여기서 A, B, C는 위협 무기의 폭발 위력을 선체와의 거리로써 나타낸 것이다.

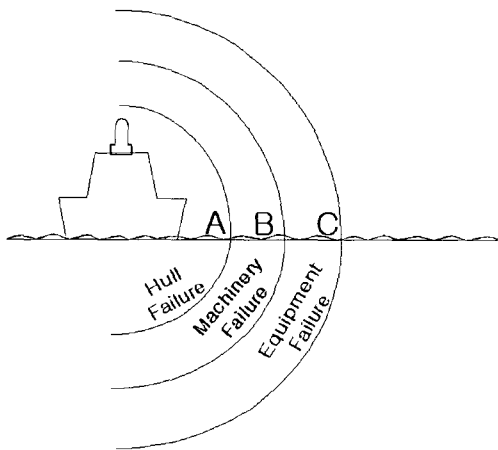


Fig. 3 Vulnerability contour for given threat level

- ① Level A : 선체 구조에 대변형 또는 붕괴 손상이 일어나는 손상 수준
- ② Level B : Level C 보다 좀 더 가까운 거리에서 폭발이 일어나는 경우이고 기기 및 장비에 손상이 일어날 수 있다. 이러한 손상은 지속적인 작전능력 및 항해능력의 상실을 가져온다. 그러나 선체구조는 국부적인 손상을 입을 수는 있으나 선체 전체의 강도 저하를 가져올 정도의 손상은 통상 발생되지 않는다.
- ③ Level C : 선체로부터 어느 정도 떨어진 거리에서 폭발

이 일어나며 함정에 탑재된 전투 시스템에 가장 먼저 손상이 일어날 수도 있다. 이러한 손상은 전투력의 상실을 가져온다.

이와 같은 손상 수준의 분류는 선체 시스템에 대한 취약성 수준을 나타낸다고 볼 수 있다. 즉, 주로 전자부품으로 구성되는 전투 시스템이 폭발하중에 가장 취약하고 다음에는 기계부품으로 구성되는 기기 및 장비이며 선체 구조는 이들에 비하여 상대적으로 강한 것을 의미하고 있다. 현재 함정 설계에 적용되고 있는 위협 수준은 대부분 Level B 손상에 해당한다. 이에 관련된 대표적인 설계 규정으로는 미국의 MIL-S-901D(1989), 독일의 BV 043(1985) 등을 들 수 있다.

3. 위협의 종류 및 시나리오

3.1 위협의 평가 과정

함정은 임무를 수행하는 시점의 작전 환경을 고려하여 발생 가능한 위협 수준의 예측 및 식별로 위협의 시나리오를 설정하게 된다. 예상되는 다양한 형태의 탄두, 소병기, 피탄, 핵탄두 등을 가정하여야 한다. 이러한 위협은 폭발, 파편, 관통, 충격 등의 영향별로 중요도는 다음과 같이 구분한다.

중요도 ; 발생 가능성×피격의 영향력

이렇게 분류된 위협을 비용과 중량 및 공간에 미치는 영향을 검토하여 불가한 사항은 제거하고 최종적인 위협을 선정하여 피격 후의 전투 준비 상태를 통해서 평가를 한다.

3.2 위협의 종류

1) 공중무기(Air Delivered Weapons)

- ① Semi-Armor Piercing(SAP) Warhead : 내부 폭발을 일으켜 장비와 시스템의 손상을 가하는 무기로 종강도의 손실을 발생시키는 고속의 제트 추진체이며, 함 내부에서 기폭 하도록 지연 신관을 채택한다. 가장 보편적인 함 내부 폭발용 위협무기이며, Exocet(H-6), Penguin(MK-3) 등의 공대함 미사일이 있다. 속도는 초·아음속으로 탄두 크기와 속도에 따라서 선체 구조의 150-200 mm 이상을 관통할 수 있고 폭파와 파편이 충격 손상을 유발한다.
- ② Anti-Radiation 추적탄두 : 함정 상부에 설치된 센서를 공격하여 파괴하도록 설계되어 있으며, 폭파와 파편이 충격 손상을 유발한다.
- ③ 성형폭탄(SC : Shaped Charge) 탄두 : 직접 에너지 무기로서 상대적으로 SC의 비행 경로 밖에 있는 장비 손상은 거의 없으나, 깨어진 조각으로부터의 2차 파편은 전자장비 캐비닛을 손상시키고 인체에 부상을 입힐 수 있다. 접촉 신관을 사용하고 비행 속도는 일반적으로

2-10 km/s 범위 내이고 대함 SC 탄두는 1 m 이상의 철 판 장갑을 관통 할 수 있다.

- ④ Chip Kill : 소총(Caliber 50) 등의 탄환, 대전차 성형폭탄(SC) 탄두 등의 소병기 무기로서, 외부나 약하게 보호된 장비에 손상을 입히거나 공격해오는 탄두로부터 함 자체 근접 방어무기(CIWS : Closed In Weapon System) 등과 같은 무기에 의해 방어되고 남은 파편이 함 외부의 장비와 센서에 손상을 입히는 경우 등이 해당된다.

2) 수중무기(Water Delivered Weapons)

기뢰(Mine)와 어뢰(Torpedo) : 선체구조의 파공(holing)과 침수 진행, 종강도의 손실 유발, 충격이나 침수에 의한 시스템의 손상 및 선체의 휘핑(whipping) 손상 등을 입힌다.

3.3 위협 시나리오

1) 내부 폭발(Internal Blast)

함 내부에 적재된 탄약의 폭발이나 적의 무기에 의한 고 폭발(HE : High explosion)의 폭발에 의해 발생하는 것으로, 순간적으로 압력이 상승한 후 크기가 감소하여 정적인 압력이 유지된다. 구조 응답은 복잡하고 venting과 내부 구역의 배치, 반사, 무기 및 2차 파편 등이 결합하여 손상의 원인이 되는 영향을 받는다. 따라서 폭발에 의해서 가해지는 압력 증가에 견디는 강화된 격벽의 설계가 필요하며, 폭발에 의해 직접 영향을 받는 구획에 인접한 격실로 폭발 손상이 확산되지 않도록 설계하여야한다. 실제 계산 시에는 설계하려는 구획의 경계가 폭발 위치로부터 최소 1 m 이상 떨어져 있다고 가정한다.

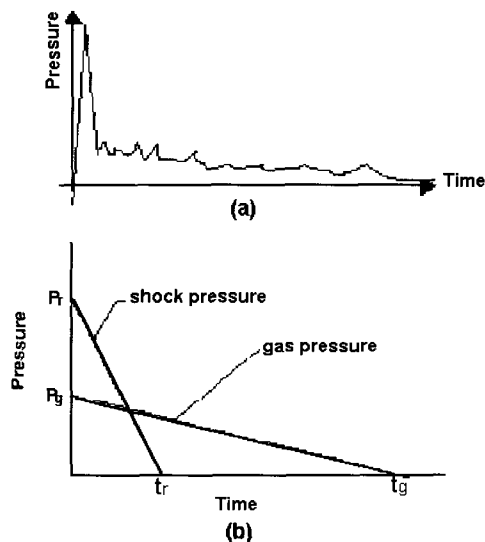


Fig. 4 Typical blast pressure time history

내부 폭발 압력은 폭약의 중량과 구획의 체적의 영향에 의한 준 정압(Quasi-Static Pressure)이 Fig. 4 와 같이 시간에 따

라 이상화(TM5-1300 1990)하여 계산할 수 있다. 즉 Fig. 4(a)에 보이는 실제의 압력 시간 이력 곡선을 Fig. 4(b)와 같이 초기에 발생하는 충격압(shock pressure)과 가스압(gas pressure)의 2-phase로 분류하여 계산하고 하고, 이를 시간에 따라 이상화한 압력 곡선으로 치환할 수 있다.

내부 폭발에 의한 구조 응답은 하중을 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) (LS/DYNA 1999)등의 기법을 사용하여 직접 하중값을 모델링하고 이것을 이용 폭발 해석을 상세히 수행할 수 있다. 이러한 해석은 동적 상용 해석 프로그램인 LS/DYNA(1999) 등을 이용할 수 있는데, 간이 하중 계산법에 의한 해석보다 과정이 복잡하고 시간이 많이 소용되는 단점이 있으나 요즘은 전산 환경의 급속한 발달로 인하여 이의 방법이 널리 사용되고 있는 실정이다(정정훈 1997).

2) 외부 폭발(External Blast)

외부 폭발 하중은 다양한 위협으로부터 발생할 수 있으며, 원거리에서 핵 공격 형태의 위협과 근거리의 근접한 무기체계에 의한 폭발 위협의 2가지로 나눌 수 있다. 외부 폭발은 원거리에서 고 폭발의 폭발에 의한 하중을 고려하여 상부 구조의 고정과 지지구조, 마스트(mast), funnel 등이 충분한 강도를 유지하도록 설계하여야 한다. 상부 구조물에 설치된 레이더나 센서는 구조 부재보다는 압력이나 파편에 취약하므로 이에 대한 보호나 여분의 장비를 설치하는 등의 대책수립이 요구된다. 근거리의 폭발 하중은 내부 폭발과 유사하므로 특별히 고려하지 않으며, 일반적으로 유사한 무기에 의한 외부 폭발로 인한 손상은 내부 폭발 보다 현저하게 적다

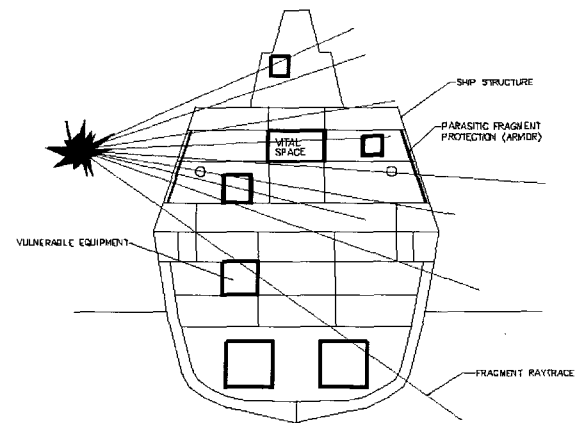


Fig. 5 Example model for external blast

Fig. 5는 외부 폭발에 의한 파편(fragment) 등이 선체 내부에 침투하였을 때 거주구(vital space)나 중요 취약 장비실(vulnerable equipment room)의 보호를 위하여 부분적으로 선체 내에 보호구(armor)를 설치한 모습을 보여 주고 있다.

3) 파편(Fragment)

소총의 발사, 무기의 폭발에 기인한 파편으로부터 장비나

격실을 보호하기 위해 재질의 두께 증가, 이중 공간(double space) 구조나 복합 소재의 방탄재를 사용한다.

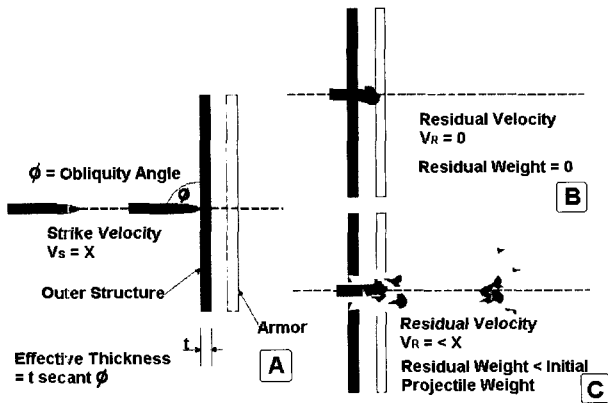


Fig. 6 Fragmentation protection concepts

탄두가 판과 충돌하는 경우는 Fig. 6과 같이 탄두의 재질과 속도, 판의 재질 등의 다른 파괴 형태가 다양하게 나타나므로, 피탄 보호 설계는 일반적으로 파편의 수준을 고려하여야 한다. 탄두와 판이 충돌하는 형태는 다음과 같다.

- ① Ricochet : 충돌 후 바운드 되는 것처럼 탄환 궤도가 변하는 현상
- ② Partial penetration : 탄두가 재질에 부분적으로 박혀서 빛이 방탄판을 통과하지 않는 현상 (Fig. 6(b))
- ③ Complete penetration : 탄두가 재질에 박혀져 반대면이 파괴되는 현상
- ④ Perforation : 탄두가 재질을 완전히 통과하여 구멍을 생성하는 현상 (Fig. 6(c))

파편의 관통에 저항이 요구되는 판 두께는 위협의 형태를 고려하고, 일반적인 파편의 무게, 밀도, 속도의 계산은 위협을 고려하기 위한 특별한 실험 결과나 경험적으로 검증된 식을 기준으로 추정하여 강도해석을 수행하여야 한다. 이들의 손상을 최소화하기 위해서는 상자형 거어더(box girder) 설치나, 방탄판, 이중 공간(double space) 구조, S-glass나 Kevlar 등의 복합 소재를 사용하여 생존성 측면의 효과를 검토 후 적용 여부를 판단하게 된다.

4) 수중 폭발 영향

적의 수중 위협 공격에 의한 수중 폭발 시 선체 구조 및 탑재 장비의 내 충격 안정성 확보는 함정의 생존성 관점에서 고려해야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다. 수중 폭발이 선체에 근접하여 일어나는 접촉성 폭발과 어느 정도 떨어진 거리에서 발생하는 비 접촉성 폭발로 구분 할 수 있다.

접촉 폭발시의 영향은 복잡하여 격벽의 배치 등으로 연속적인 침수를 방지하고, 비 접촉성 수중 폭발은 고온 고압의 가

스 구체의 생성 및 급작스런 에너지 방출을 통해서 충격파를 생성하는 충격 하중으로 선체에 작용하여 고차 모드의 과도한 동적 구조 응답을 발생 시켜 선체 구조와 탑재 장비에 치명적 손상의 원인이 된다. 충격 하중은 충격 폭발 중량과 기하학적 거리, 함의 구조적 특성에 의해 정의된다.

4. 생존성 향상을 위한 취약성 감소 대책

대함 미사일이나 어뢰 등의 위협 무기에 의한 단발 명중 시에도 함이 생존해야 하며, 이들의 위협 수준이나 피격 시나리오 오는 함 임무 및 대상 위협 수준을 기준으로 설정된 위협에 대한 영향을 검토해야 하며, 구조적인 보강 대책으로는 다음과 같다.

4.1 이중 선체(Double Hull)의 구조

이중 선체의 구조는 유조선 등에서 좌초나 충돌 시 기름의 유출을 방지하기 위해 많은 연구를 거쳐 적용을 하고 있으며, 최근의 대형 전투 함정에서도 위협 무기에 의한 피격 시에 탄두의 속도를 줄이고 내부의 손상범위를 줄일 수 있는 효과적인 방법으로 채택을 검토하고 있다. 그러나 함정의 크기가 비교적 작은 경우에는 갑판 면적의 감소로 함 크기와 중량이 증가하며, 작업 공간이 협소하여 도장 등의 문제가 발생하고 선체 외관의 배관 및 장비 설치와 원격제어를 해야하는 어려움이 있다.

Fig. 7은 이중 선체 구조의 모습을 보여주고 있다.

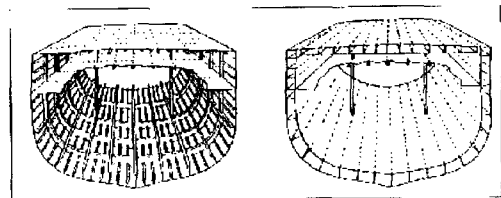


Fig. 7 Models for conventional and advanced double hull type

4.2 이중 횡격벽(Double Transverse Bulkhead) 구조

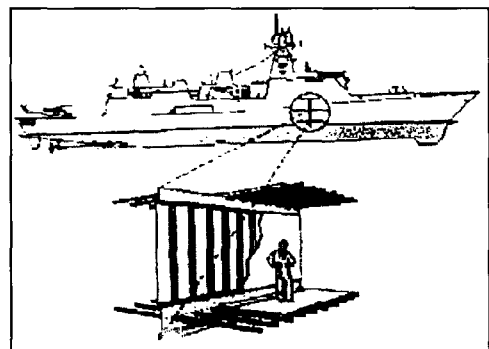


Fig. 8 Model for double transverse bulkhead

Fig. 8은 이중 횡격벽 구조를 보여주고 있다. 이 방법은 폭발하중에 의한 손상이 선체 길이 방향으로 확산되지 않도록 하는 개념이다. 이 방법은 독일, 미국 및 프랑스 등에서 최신 함정에 널리 적용되고 있다.

4.3 폭발 강화 격벽(BHB : Blast Hardened Bulkhead)의 적용

수면상의 위협 무기 중 내부 폭발에 의하여 내부 주 격벽 구조에 큰 손상을 입힐 수 있는 무기로 SAP (Semi-Armor Piercing)탄두 등이 있으며, 이러한 무기에 의하여 폭발이 발생하였을 때 폭발 하중 하에서 격벽 구조가 압축 막(compress membrane)으로서 기능을 수행하는 능력을 갖도록 설계한다.

이러한 격벽 구조는 폭발에 의한 변형 시 소성 변형으로 탄성 변형에 비해 큰 값의 변형 에너지를 분산시킬 수 있고 큰 소성 변형에 견디도록 이중 격벽(double bulkhead)이나 강화된 단일 격벽(single bulkhead)으로 설계할 수 있으나 최근에는 작업성과 공간을 고려하여 단일 격벽으로 강도를 강화하여 설계하는 추세이다.

변형된 구조의 재질 특성은 재질의 변형경화로 인해 본래 사용된 응력-변형 선도 곡선과 달라지고 용접과 연결 접합부에 정해진 잔류강도가 변한다. 잔류 응력과 응력 집중 때문에 격벽의 연결은 큰 신장에 견딜 능력이 없고 시스템의 연결부에 취약점이 발생하므로, 주 격벽은 모든 용접부의 영향까지 해석 모델에 반영하여 시뮬레이션을 수행하여야 한다.

4.4 피탄 보호(Fragmentation Protection)

파편은 탄두의 작열에 의해서 생성되며, 충격 폭발파의 진행이 뒤따른다. 일반적으로 파편 방어용 방벽은 효율적인 파편 장벽을 유지하여 폭발 충격 하중에 견디어야 한다. 기폭 탄두의 효과는 목표물로부터 탄두의 떨어진 거리에 영향을 받는다.

- 근접구역의 폭발효과 : 폭발 충격이 표면에 파편보다 먼저 도달
- 먼 거리의 폭발효과 : 파편이 충격파보다 표면 먼저 도달

파편의 속도는 2200 m/sec 정도이고 폭발파와 파편의 효과는 분리하여 해석한다. 대부분의 손상은 충격 파면과 파편이 동시에 도달할 때 발생하게 된다. 근접 폭발구역의 파편 방어 장벽은 자체의 목적 달성을 위해서는 우선적으로 충격파에서 생존해야한다. 외부 기폭이나 내부 기폭이 근접함으로 발생하는 근접구역의 폭발 효과는 주의하여 해석하여야하고 구조적인 손상과정이 증가하고, 충격파공의 가능성이 고려되어야 한다.

5. 상자형 거어더에 의한 취약성 감소 대책

5.1 상자형 거어더(Box-Girder)의 역할

함정의 생존성 향상을 위한 취약성 감소 대책의 설계 방법으로 가장 유효한 방법 중의 하나로 알려져 있는 것이 상자형 거어더의 설치이다. 위협 무기의 피격으로 인한 침몰시 상자형 거어더가 최종 종강도의 부재로 기여하여 승조원의 탈출에

필요한 시간적인 여유를 가지거나, 수리를 위해 예인을 할 경우에 파랑 하중상태에서 최소한의 시간동안 강도를 유지하는 역할을 수행하게 된다. Fig. 9는 주 갑판 하부에 상자형 거어더를 설치한 형태를 보여주고 있다.

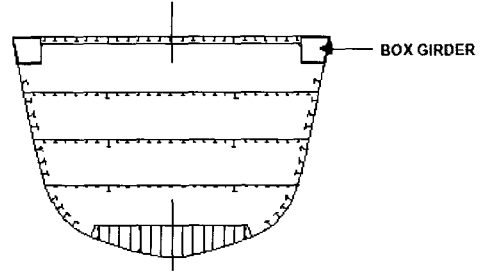


Fig. 9 Typical box girder arrangement

5.2 상자형 거어더의 설계

위협 무기 및 시나리오를 설정하고 이에 따른 적절한 종강도를 계산한 후 해석 등을 통하여 이를 검증하는 단계로 설계한다. 해석은 준 정적 방법으로 간략히 할 수도 있고, 상용 프로그램을 통한 ALE 기법(LS/DYNA 1999)을 사용하여 상세 충격 폭과 해석으로 검증할 수도 있다. 본 논문에서는 준 정적 방법이며 미 해군에서 개발한 TM5-1300(1990) 방법으로 해석을 수행하였다.

5.3 상자형 거어더에 대한 폭발 해석

1) 해석 모델

상자형 거어더의 유효성을 입증하기 위하여 중앙 단면 계수(section modulus)는 서로 같고, 상자형 거어더가 없는 모델과 있는 2개의 모델에 대하여 해석을 수행하고 두 해석의 결과를 서로 비교하였다. 해석을 수행하려면 먼저 현실적으로 타당한 폭발 시나리오를 선정하는 것이 중요하며 이는 생존성이 고려되는 함정 설계의 가장 기본이 되는 요소이다. Fig. 10은 해석을 위한 모델의 모습이다.

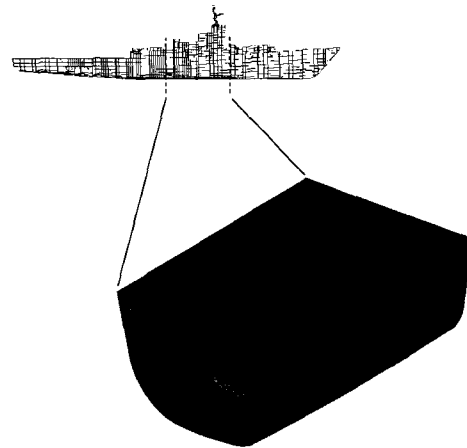


Fig. 10 Naval ship model for analysis

본 연구에서는 임의의 함정에 대하여 모델링 하였고, 그 함정 크기에 적합한 TNT 등가 약 481 lbs를 폭발물로 가정하여 해석을 수행하였다. 실제 상황에서 이 폭발물은 SAP와 같은 공대함 미사일이 함 내부로 침투하여 폭발하는 현상과 같을 것이다. Table 1은 해석 모델 함정의 주요 제원을 보여주고 있다.

Table 1 Principal dimension of analysis model

톤 수	7,000 ton
선 장 (L_{bp})	150 m
선 폭 (B)	35 m
선 깊이 (D)	25 m

2) 폭발 하중 계산

폭발 하중은 Fig. 11에 보이는 것과 같이 준 정적 압력을 시간이력으로 치환하여 계산하는데, 초기 충격 압력(shock pressure)를 계산하고 그 이후 발생하는 가스 압력(gas pressure)을 다시 계산하여 2 phase의 하중 이력을 완성한다. 본 계산법은 간략히 계산할 수 있다는 큰 장점이 있으나 폭발 하중이 구조물 판에 균등히 작용한다는 가정으로 계산하므로 다소 정확도는 낮아지는 단점이 있다. 그러나 초기 설계 단계에서는 충분히 유효한 방법으로 알려져 있다.

Fig. 11은 폭발 하중을 계산한 간단한 예를 보여주고 있다.

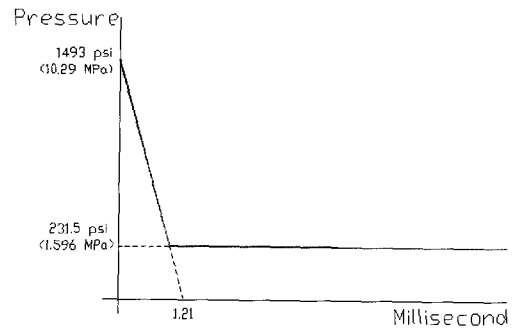


Fig. 11 Example of loading calculation by TM5-1300

3) 해석 시나리오

Fig. 12는 해석 시나리오의 모습이다. 해석 시나리오는 폭약이 상갑판(upper deck)과 두 번째 갑판(2nd deck) 사이에 있는 좌현 객실에서 폭발하는 것으로 하였으며, 이는 항공기 등이 공중에서 미사일로 함정을 공격하여, 미사일이 선측(side shell)을 뚫고 들어와 선내에서 폭발하는 시나리오이다.

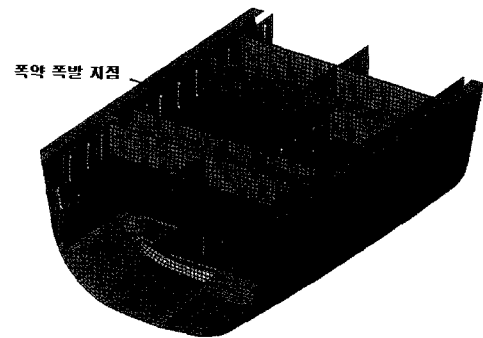
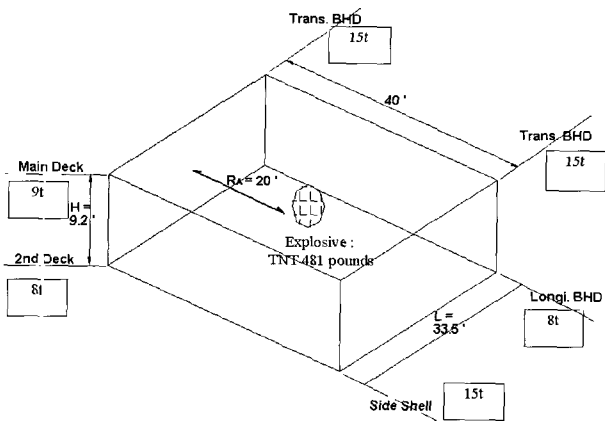


Fig. 12 Configuration of analysis scenario



Transverse Bulkhead 에서의 폭발 하중 계산

- $R_A = 20$ ft (폭약에서 격벽까지 거리)
- $H = 9.2$ ft $h = 4.6$ ft (폭약에서 갑판까지 거리)
- $L = 33.5$ ft $l = 16.75$ ft (폭약에서 선측까지 거리)

위의 값들을 TM5-1300에 있는 여러 그래프들에 적용하여 $P_R = 1,493$ psi, $t_r = 1.21$ msec 및 $P_G = 2,315$ psi를 각각 구하여 아래의 하중 이력 곡선을 구함.

4) 해석 결과

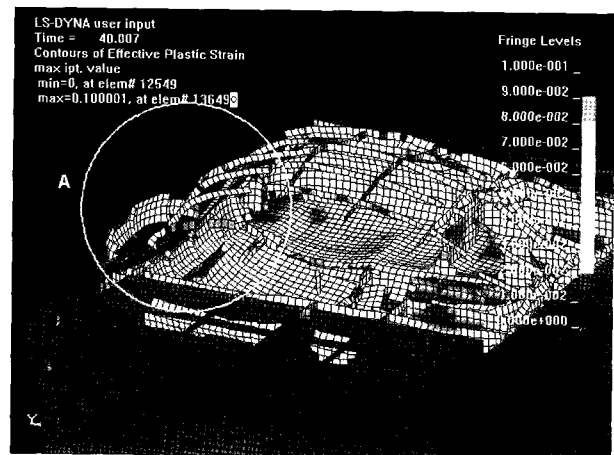


Fig. 13 Effective plastic strain contour of analysis model without box girder

Fig. 13과 Fig. 14는 상자형 거어더의 유무에 따른 모델에 대하여 해석한 결과를 각각 보여주고 있다. 해석은 앞에서 계산한 하중 이력으로 상용 프로그램인 LS/DYNA로 수행하였다.

Fig. 13은 상자형 거어더가 없는 모델에서의 소성 변형률 분포의 모습을 보여 주고 있다. 본 모델에서의 파단 변형률(rupture strain)은 0.1로 가정하여 해석을 수행하였는데, 그림에서 보면 'A' 위치에서의 구조 부재들이 이미 찢겨져 나갔거나 파단 변형률에 도달하여 선축, 또는 갑판 들이 구조적 역할을 상실하고 있음을 알 수 있다.

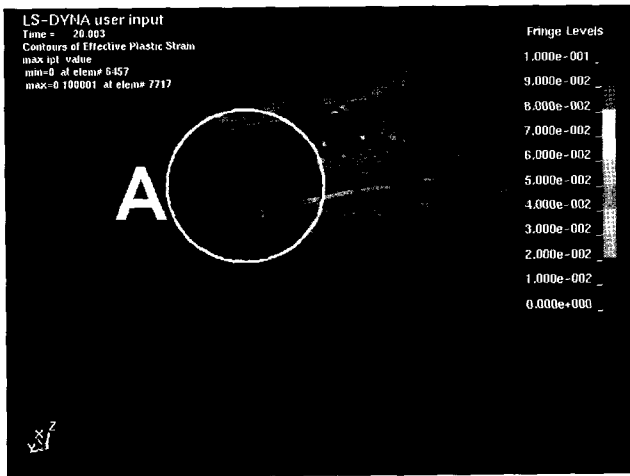


Fig. 14 Effective plastic strain contour of analysis model with box girder

Fig. 14는 상자형 거어더가 있는 모델에서의 소성 변형률 분포의 모습을 보여 주고 있다. 그림에서 보면 상자형 거어더가 있는 'A' 위치에서의 구조 부재들은 비록 갑판부나 선축부 일부는 찢겨지거나 파단에 도달하고 있으나 상자형 거어더는 파단 변형률에 도달하고 있지 않으며 부재들이 찢겨지지 않고 원래의 모습을 유지하고 있다.

위의 사실을 보면 상자형 거어더가 없는 모델에서는 폭발 후 함정의 외판, 갑판 등의 주요 부재들이 완전히 파괴되어 폭발한 위치에서는 종강도를 상실하게 되고 결국은 침몰하게 될 것이나, 상자형 거어더가 있는 모델에서는 폭발 후 상자형 거어더가 구조 부재의 역할을 하고 있으므로 침몰을 하지 않거나 최소의 시간 내에서 승선들을 구조할 수 있음을 알 수 있다. 결국 함정의 설계에 있어서 폭발을 고려하여 설계한다면 상자형 거어더의 설치는 함정의 생존성을 향상시키는 매우 유용한 방법임을 알 수 있다.

6. 결론

함정이 건조되어 운행하는 기간동안에 함정의 임무를 고려하여 향후 예상되는 위협 수준과 가상의 시나리오를 합리적으로 설정하고 이에 따른 생존성의 향상을 위해 취약성의 감소

와 회복성의 증대가 필수적이다.

함의 생존성 향상을 위해서는 취약성의 감소 대책 방안들의 효과를 분석하고 적용의 용이성, 비용과 생존성의 효율 측면을 고려하여 균형 있는 설계가 되도록 결정하여야 할 것이다.

본 논문에서는 함정의 생존성을 향상시키는 방안인 취약성 감소 대책으로 알려져 있는 상자형 거어더(box girder)의 설치에 대하여 직접 수치 해석을 통하여 그 유효성을 확인하였다. 즉, 같은 중앙 단면 계수값을 갖고 있는 모델이라도 상자형 거어더가 없는 모델에서는 폭발 후 종강도를 상실하게 되어 침몰하게 될 것이나, 상자형 거어더가 있는 모델에서는 폭발 후 상자형 거어더가 구조 부재의 역할을 하고 있으므로 최소의 종강도를 유지함으로 함정이 침몰을 하지 않거나 최소의 시간 내에서 승선들을 구조할 수 있음을 알 수 있다.

결국 함정의 설계에 있어서 폭발을 고려하여 설계한다면 상자형 거어더의 설치는 함정의 생존성을 향상시키는 매우 유용한 방법임을 입증할 수 있었다.

향 후 계 획

향후 함정의 생존성을 향상시키는 여러 다른 방법(방탄 강화 격벽, 파편 보호 장치 등)을 해석 등을 통하여 계속 진행할 것이며, 특히 해석에서는 상세 해석 방법으로 알려져 있는 ALE 기법을 통하여 해석의 결과 정도를 향상시키고자 한다.

그리고 함정 설계에 적용 시 해석 평가의 정성적 고찰 외에도 생존성 향상의 기준을 정량적 방법으로 평가할 수 있는 생존 시간 계산 방법을 적용하고자 한다. 궁극적으로 이러한 여러 생존성 향상 방안을 통하여 함정 설계 시 생존성을 향상시킬 수 있는 최적의 설계가 이루어지는 연구를 수행할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 정정훈, 허영철, 김병현(1997); 수중폭발 휘핑 응답해석을 통한 선체 거어더 종강도 평가, 대한조선학회, 1997년 춘계 학술대회 논문집
- [2] Aoki, E.(1976); A Short History of Warship's Protection, Ship of the World(Japan), pp. 55-64
- [3] BV 043, Germany(1985); Building Specifications for Ships of the Federal Armed Forces - shock Resistance Experimental and Mathematical Proof
- [4] Hallquist, J. O.(1999); LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Co.
- [5] Lloyd's Register(1999); Provision Rules for the Classifications of Naval Ships
- [6] MIL-S-901D, U.S.Navy(1989); Shock Tests, High-Impact Shipboard Machinery, Equipment, and Systems
- [7] TM5-1300/NAVFAC P-397/AFR 88-22, Washington, DC, Joint Departments of the Army, the Navy and the

- Air Force(1990); Structures to Resist the effects of Accidental Explosion
- [8] Pusey, H., C.(1984); Reflections on Trends in Dynamics - the Navy's Perspective, Shock and Vibration Bulletin, vol. 54, pp. 59-64
- [9] Said, M. O.(1995); Theory and Practice of Total Ship Survivability for Ship Design, Naval Engineers Journal, pp. 191-203
- [10] Sielski, R., A.(1987); The history of Aluminium as a Deckhouse Material, Naval Engineers Journal, pp. 165-172
- [11] Sims, P.(1983); Trends in Surface Warship Design 1861-1983, Naval Engineers Journal,, pp. 33-49
-
- 원고접수일 : 2002년 11월 30일
원고채택일 : 2003년 5월 16일