

함정 피격 시나리오들에 대한 취약성 감소를 위한 폭발강화격벽 최적 설계 방법 연구

곽요정^{1,2} · 권승민¹ · 노유정^{2,†}
대우조선해양(주) 중앙연구원¹
부산대학교 기계공학부²

A Study on Optimal Design of Blast Hardened Bulkheads to Reduce Vulnerability against Various Hit Scenarios

Myojung Kwak^{1,2} · Seungmin Kwon¹ · Yoojeong Noh^{2,†}
R&D Institute, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.¹
School of Mechanical Engineering, Pusan National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Blast Hardened Bulkheads (BHB) are used to suppress damage propagation by internal explosions to reduce ships' vulnerability. However, for this reason, the weight of the ship inevitably increased, and other functions such as the ships' mobility were bound to deteriorate. Therefore, it is essential in the initial design of the ship to optimize the dimensions of the bulkhead to minimize the weight while decreasing the vulnerability of the ship. Research on design optimization of BHB has been conducted, but it has not considered explosive load in various hit scenarios. This study proposed an optimal design method for the curtain plate type blast hardened bulkhead, which is currently frequently applied by the Korean Navy in consideration of various hit scenarios. Using genetic algorithms, multiobjective design optimizations that minimize weight increase as well as minimize damage to ships were obtained. By optimizing the dimensions of the BHB considering various hit scenarios, the ship's vulnerability was improved while maintaining its mobility due to weight reduction.

Keywords : Blast Hardened Bulkhead(BHB, 폭발강화격벽), Optimization(최적화), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Vulnerability(취약성)

1. 서론

90년대부터 함정 설계 기술 발달에 따라 대한민국 해군은 함정 생존성 향상을 위해 다양한 형태의 기술을 적용하고 이에 대한 검증도 수행하고 있다. 함정의 생존성 향상을 위해서는 피격되기 전 능동적 방어 수단을 통해서 피격을 방지하는 것이 가장 이상적이지만, 함정의 전투 환경을 고려할 때 매우 다양한 위협에 대해 피격상황을 가정한 시나리오를 적용하여 생존성을 검토하고 설계하는 것이 현실적인 대안이다. 따라서 취약성 감소 관점에서 피격을 가정하여 검토할 수밖에 없으며, 이를 고려할 경우 위협무기에 대한 손상을 최소화할 수 있는 수동적 방어 수단인 폭발강화격벽(BHB: Blast Hardened Bulkhead)의 도입이 자주 활용된다(Nho et al., 2018a).

함정 내 설치된 폭발강화격벽은 폭발에 의한 손상 전파를 막으며 이로 인해 전투 시 함정의 생존성을 높이고 소중한 승조원의

생명을 보호할 수 있으므로 함정 내에서 매우 중요한 내부 구조물에 해당된다. 하지만 폭발강화격벽은 내부 폭발 에너지를 흡수하기 위해 기존 수밀 격벽보다 강화된 구조를 사용해야 하므로 구조적 보강으로 인해 선체 중량을 증가시킨다는 부작용이 따른다. 함정은 특수 목적선으로 임무 완수를 위해서 신속하고 은밀한 기동성뿐만 아니라 생존성도 모두 고려하여 설계되어야 한다. 따라서 임무와 위협 정도에 따라 다르겠지만 초기 설계 과정에서 생존성 향상을 추구하면서도 함정의 무게를 최소화하는 것은 매우 중요하다. 이러한 중요성으로 인해 함정의 생존성을 고려한 최적 설계 방법 및 폭발강화격벽 최적 적용에 대한 연구는 다수 진행되었다.

먼저 해석 관련으로 Defence R&D Canada Valcartier(DRDC Valcartier) (2012), Lee et al. (2017)과 Kim et al. (2015)은 내부 폭발 해석 방법론을 연구하였다. 설계시 방법에 대한 연구로는 Stark and Sajdak (2012)가 커튼형 폭발강화격벽의 부재 치수에

따라 최대 허용 하중을 계산하는 방법을 제시하였는데 이 방법은 현재 한국 해군의 함정 설계/건조 기준서 (Republic of Korean Navy, 2009)인 폭발강화격벽 설계 지침서에 활용되고 있다. 또한 Nho et al. (2018b)은 보정 계수를 적용하여 설계식을 제시하였다.

생존성을 고려한 최적화 기법 관련으로 Jung et al. (2018)은 생존성 평가 레이아웃이라는 개념을 통해 함정 내부 공간과 생존성을 연관시켜 배치를 최적화하는 기법을 제시하였다. Boulougouris and Papanikolaou (2004)는 손상 함수(damage function)를 적용하여 손상 범위를 산정하고 손상조건에서 함정의 침수 및 안정성에 대한 평가 방법을 적용하여 함정의 최적 수밀 구획 등에 대한 최적화 방법을 연구하였다. 그러나 이러한 연구는 함정 피격 시 폭발력과 주변 구조의 배치 및 특성을 반영하지 않고 취약성을 평가하여 구조 변경에 따른 영향을 반영할 수 없다. Choi et al. (2015)는 폭발 하중과 폭발강화격벽 효과에 따른 취약성 개선 효과와 함께 구조 보강 중량을 평가하는 방법을 적용하여 구조 중량과 취약성을 동시에 평가하였다. 하지만 폭발강화격벽을 적용하는데 있어 각각 수밀격벽 위치에 적용 유무를 이진 코드법과 단순 교배 방식을 적용한 유전자 알고리즘을 사용하여 수밀격벽에 적용 시 1 혹은 미적용 시 0으로 해답을 구하는 방법으로 접근하여 폭발강화격벽의 두께와 길이의 치수를 최적화하는 방법에 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 다양한 피격 시나리오를 반영하여 취약성을 최소화하면서 동시에 주변 구조의 특성을 고려하여 폭발강화격벽의 중량도 최소화하도록 폭발강화격벽의 치수를 최적화하는 방법을 제안하였으며, 이를 위해 실수 코딩 방법 및 엘리트 전략 등을 활용할 수 있는 진보된 유전자 알고리즘 (Jin, 2000)을 사용하였다.

2. 함정 구조 취약성 평가

손상 영역을 평가하는 방법은 폭약 중량에 따른 경험 및 실험식을 바탕으로 하는 간이 해법 (Shin et. al, 2013)과 구조의 부재 치수 계산(scantling) 정보를 직접 반영하여 예상되는 폭발 하중에 대한 구조 부재의 손상을 계산하여, 손상 체적을 계산하는 방법이 있다. 이와 관련하여 설계를 직접 수행하고 조건에 따라 설계 변경을 여러 번 시도하는 엔지니어 입장에서는 직접 설계 변경에 따른, 손상 체적 및 취약성을 적절한 시일 내에 평가하여 판단하는 방법이 필요하며, 이러한 방법의 주요 이점은 아래와 같다.

- 구조형상과 치수를 고려한 손상 영역 평가 방법은 초기 설계 단계에서 격벽 및 구획 배치 등의 조건에 따라 취약성을 평가할 수 있어 설계 변경이 비교적 자유로운 초기 단계에서 다양한 설계 방안을 검토 및 적용할 수 있다.
- 함정의 취약성을 줄이는 방법으로 시스템에 대한 효과적인 분산 배치와 이중화를 적용하는 것을 고려할 수 있으며, 이에 대한 초기 설계 검토단계에서 구획 변경 외에 구조물의 추가 배치(Shield 및 폭발강화격벽)를 고려하거나, 손상 영역에 포함되지 않는 구역에 주요 장비들을 배치할 수 있는 방

안들을 정성적 개념이 아닌 수치적 검증을 통해서 확인할 수 있다.

- 초기 단계에 구조적 특성을 고려한 손상 영역 평가는 다양한 대안을 통해서 생존성 극대화, 비용 및 중량의 최소화를 위한 최적 설계 기법을 적용할 수 있어 경제적 설계에 유리하다.

위의 언급된 항목을 고려할 때 초기 설계 단계에서 구조적 특성과 기타 필수 장비의 물리적 상황을 고려한 손상 영역 예측은 설계 과정에서 중요한 항목이라 할 수 있다. 이러한 방법은 추후 상세 설계 단계에서 발생할 수 있는 생존성 평가 해석 결과로 인한 설계 변경이 요구되는 것을 미리 차단하여 설계 비용 및 중량 마진 손실 등이 발생하는 것을 예방할 수 있어 함정을 직접 설계하고 건조하는 조선소 입장에서 함정의 효과적 설계 개선을 지속적으로 시도하는데 필요한 접근 방법이라 할 수 있다.

2.1 폭발 하중에 대한 구조 응답특성

함정의 손상 영역은 선박의 장비 및 구조에 대한 무기 효과를 기하학적으로 표현한 것으로, 이는 선체 구조 또는 필수 장비의 손상을 결정하는 아주 유효한 항목이다. 이러한 손상 영역 예측을 위해서 폭발 하중에 대한 구조응답의 물리적 관계를 파악하는 것이 필요하다.

함정의 주 위협 요인으로 고려되는 대함 미사일이나 포탄 등에 의한 피격 후 폭발 현상은 폭약과 같이 화학적으로 불안정한 물질이 외부 자극에 의해 안정한 상태로 변화하면서 고온 고압의 가스를 분출하는 물리적 상황이라 할 수 있다. 이런 고압의 물리적 현상이 아주 짧은 시간에 발생하여 선체에 동적 및 비선형 응답특성을 유발하고 있어 이에 맞는 해석 및 설계 방법을 적용해야 한다.

동적 하중을 받는 구조물의 구조 응답은 하중의 지속시간과 구조물의 고유주기의 비에 따라 거동 특성이 달라지며 NORSOK N-004와 DNVGL RP C-204에서는 이들의 비에 따라 다음과 같이 충격영역, 동적, 준 정적 영역으로 응답특성을 구분한다.

- Impulsive domain: $t_d/T_N < 0.3$
- Dynamic domain: $0.3 \leq t_d/T_N < 3$
- Quasi-static domain: $3 \leq t_d/T_N$

여기서, t_d 는 하중 지속시간, T_N 는 구조물 고유주기이다.

TNT 폭발과 같은 현상에서 초기 수 msec 이내의 아주 짧은 시간에 발생하는 충격파에 대한 구조의 응답을 구하는 과정은 위에서 언급된 충격 영역에 해당되며, 폭발 이후 잔여 화학물질이 주변 공기 등과 연소되는 현상은 초기 충격파에 비해 하중 지속시간이 상대적으로 긴 하중으로 고려될 수 있다. 본 연구에서는 위협 무기에 대한 폭발의 영향을 1단계인 충격파에 대한 구조 응답과 2단계의 폭발 압력에 대한 구조 응답으로 구분하여 구조적 특성을 고려한 손상 영역을 예측하는 모델을 검토하였다.

2.2 구조물에 대한 이상화 방법

함정의 선체 구조는 일반적으로 Fig. 1과 같이 판(plate)과 이를 보강하는 보강재(stiffener)로 구성된 보강판(stiffened panel)과 이를 지지하는 거더(girder)로 구성되어 있다. 따라서 폭발 하중에 대한 3차원 구조물의 동적 비선형 응답을 보다 정확하게 구하기 위해서는 유한요소 해석을 이용할 수 있다. 하지만 본 연구의 목적은 초기 설계 단계에서 선택 가능한 여러가지 설계 후보군에 대해서 구조 형태 및 특성을 고려하여 빠르고 쉽게 근사적인 방법으로 응답을 구하는 것이 목표이기 때문에 널리 검증된 이론을 적용하여 비교적 신뢰성이 높은 구조 응답을 추정하는 방법을 선택하였다. 이런 방법을 적용하기 위해서는 선체 구조에 대한 간략화 및 이상화 방법이 필요하며 본 연구에서는 선체를 구성하는 보강판을 보 스트립(beam strip)들간의 연결체로 가정하여, 보 스트립을 단일 보강재(single stiffener)로 이상화하였다. 보강판의 폭 방향 효과는 무시하고 거더의 영향을 경계조건으로 거더 간 길이(span length) 만큼을 고려하여 이상화 하는 방법을 적용하였다.

본 연구에서 적용된 보 스트립방법은 NORSOK에서 제시되었고, 노르웨이 선급의 설계 규정 코드(DNVGL RP C-204)에 인용될 정도로 해양 구조물 및 선박의 폭발 하중에 대한 설계 방법으로 오래전부터 적용된 방법이다. 기본적으로 보 이론을 바탕으로 제안된 것으로 그 방법의 유용성은 많은 전문가들을 통해서 검증되어 (Amdahl, 2003,2004; Burak and Ozgur, 2020; Kim and Ha, 2020; Sohn and Kim, 2017; Yussof et al., 2020) 신뢰성 또한 높다. Fig. 1에 나타난 형태의 구조물에 대하여 플레이트와 보강재의 치수와 보 형태의 물리적 값들인 관성모멘트(moment of inertia)와 소성단면계수(plastic section modulus) 등을 고려

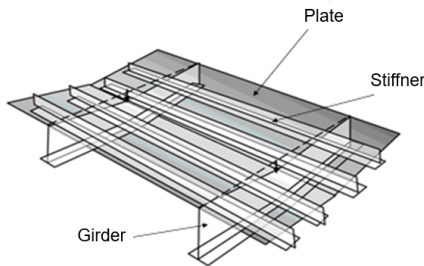


Fig. 1 General structural model

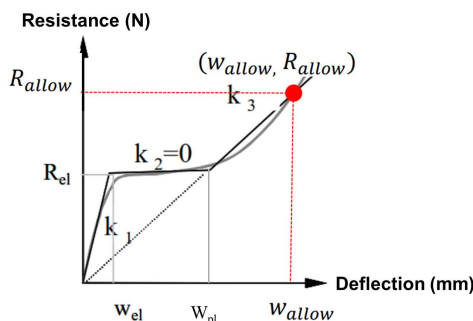


Fig. 2 Analysis model for structural model

하고, 거더의 효과를 보의 경계조건으로 반영하여 외부 하중에 의한 구조물의 변위에 따른 구조물의 저항력을 구함으로써 내부 변형 에너지(Fig. 2의 저항 곡선 하부의 면적)를 구할 수 있다.

여기서 R_{el} 은 굽힘력에 대한 소성 붕괴 저항하중(plastic collapse resistance in bending), w_{el} 과 w_{pl} 는 각각 탄성 한계 변위(elastic limit deflection)와 멤브레인 거동의 시작점(plastic membrane commencing deflection), k_1 은 탄성 굽힘 강성(elastic bending stiffness), k_2 는 소성 굽힘 강성(plastic bending stiffness), k_3 는 소성 멤브레인 강성(plastic membrane stiffness), w_{allow} 과 R_{allow} 는 각각 허용변위(allowable deflection)와 저항하중(allowable resistance)을 의미한다.

$$I = \sqrt{2m_{eq} \int_0^{w_{allow}} R(w)dw} \quad (1)$$

$$F = \frac{\int_0^{w_{allow}} R(w)dw}{w_{allow}} \quad (2)$$

$$P = \frac{F}{b \times L} \quad (3)$$

식 (1)의 I 는 구조물의 내부 변형 에너지와의 관계를 나타내는 저항곡선의 면적값을 변환하여 충격량(impulse)에 대한 구조의 내력을 의미하며, $R(w)$ 는 저항력과 변위와의 관계, m_{eq} 는 등가 질량(탄성과 소성 영역), w_{allow} 는 최대 허용 변위이다. 그리고 식 (2)의 F 는 구조물이 견딜수 있는 하중(force)을 나타내며, 식 (3)과 같이 폭발 하중이 적용된 면적을 통해 압력(P)으로 계산될 수 있어 이는 준 정적 영역에서 폭발 압력에 대한 구조의 내력값을 나타낸다. 이때 b 와 L 은 각각 보의 간격(sapcing)과 길이(length)를 가리킨다.

식 (4)부터 (9)까지는 DNVGL RP C-204와 NORSOK Standard N-004에 언급된 보의 내력값 계산에 필요한 변수들을 구하기 위한 식들을 나타내고 있다.

$$R_{el} = \frac{8c_1\sigma_y Z}{L} \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{307EI_S}{L^3} \quad (5)$$

$$w_{el} = \frac{R_{el}}{k_1} \quad (6)$$

$$k_2 = 0 \quad (7)$$

$$k_3 = 8\sigma_y A/L \quad (8)$$

$$w_{pl} = R_{el}/k_3 \quad (9)$$

그리고 위의 식들에서 나타내는 변수들을 의미하는 것은 아래와 같다.

c_1 : 보의 경계조건 (1:pinned, 2: clamped)
 Z : 소성 단면계수 (plastic section modulus)
 E : 탄성계수(elastic modulus)
 I_S : 관성모멘트(moment of inertia)
 σ_y : 항복강도(yield stress)
 A : 보의 단면적 (section area)

2.3 구조 손상기준

본 연구에서 구조물의 동적 응답특성을 고려하는 검토단계에서는 구조의 전반적인 동적 거동보다는 특정한 하중 즉, 예측되는 충격하중에 대해서 구조물의 손상 여부에 중점을 두고 검토를 수행하였으며 손상은 최대 변형량이 손상 기준(criteria)값을 초과하는 경우로 판별하였다. 따라서 폭발 하중이 계산된다면 이 충격량 값들이 구조물의 최대 변형 에너지를 초과하는 경우 손상을 유발하는 것으로 간주하였다.

보 이론에 따르면 횡 하중을 받는 보의 최대 굽힘 모멘트 발생 지점에 소성 힌지(plastic hinge)가 생성되고 두 지지점 사이에 총 3개의 힌지가 존재하면 그 구간에 적용되는 추가 하중에 대한 굽힘 강성이 사라져 더 이상의 하중을 견딜 수 없기 때문에 보의 붕괴(collapse)로 이어지는 것으로 간주한다. 그러나 양끝단 지지점에서 축방향 변위가 구속된 경우에는 소성 힌지가 발생한 이후에도 하중이 증가하면 대변형에 기인하는 기하학적 비선형 특성에 따라 굽힘 모멘트 보다는 멤브레인(membrane) 인장에 의한 하중 저항 비중이 점점 늘어난다. 결국 인장이 점차 증가하여 최종적으로 단면적의 모든 부분이 인장 항복 응력에 도달하여 소성화된다. 이때 지지부의 허용 각도를 정의하게 되면 Fig. 3과 같은 관계로 붕괴까지의 최대 처짐(X_m)을 계산할 수 있다.

미국 국방설계표준 (UFC, 2008)에서는 지지대 허용 각도($\theta=12^\circ$)를 기반으로 손상 판단 기준을 제시하고 있는데 본 논문에서는 이를 적용하여 최대 허용 처짐값을 정의하였다. 따라서 이러한 조건을 이용하여 식 (10)과 같이 보의 허용 변위를 구할 수 있다.

$$w_{allow} = a \times \tan 12^\circ \quad (10)$$

여기서, a 는 보 길이의 반절값을 의미 한다.

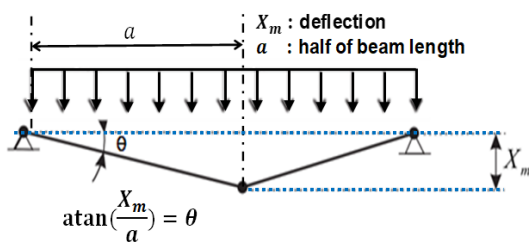


Fig. 3 Allowable rotation angle

2.4 폭발강화격벽 설계 개념

합정의 내부폭발 시 손상을 억제하는 폭발강화격벽은 폭발 하중에 의해 구조에 전달되는 충격 저감 방식과 연결부 보강 방식 등으로 구분된다 (Kim, 2015). 한국 해군은 주로 연결부 보강 방식의 폭발강화격벽을 적용하고 있다. 연결부 보강 방식 중 격벽-갑판 연결부에 집중되는 하중에 대응하여 격벽의 상/하단 판 두께를 보강시킨 형태인 커튼 플레이트(curtain plate)방법이 있으며 본 연구에서는 이에 대한 설계 방법을 바탕으로 폭발 하중에 대한 구조응답 평가 방법을 적용하였다. 아래 Fig. 4는 커튼 플레이트 형태와 그의 치수를 나타내고 있다.

커튼 플레이트 형태의 폭발강화격벽은 구조의 파단없이 가능한 큰 처짐을 허용함으로써, 소성 변형을 통해 폭발 에너지를 흡수하는 방식이다. 이때, 큰 소성 변형을 고려해야 하며 격벽의 기하학적 형상 변화에 따라 저항 능력은 굽힘 저항보다는 멤브레인(membrane)의 강성(stiffness)에 의존하는 상태가 된다. 따라서 폭발강화격벽의 설계는 기본적으로 앞서 설명한 멤브레인 강성을 고려한 보의 최종 강도 개념을 적용한다.

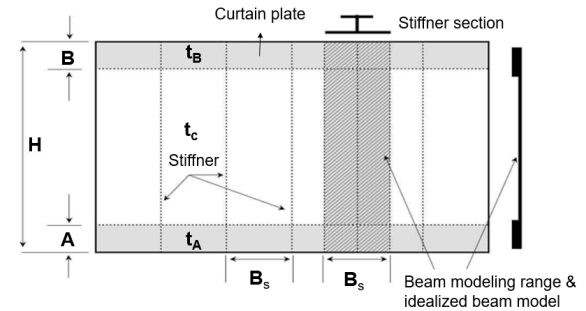


Fig. 4 The curtain plate

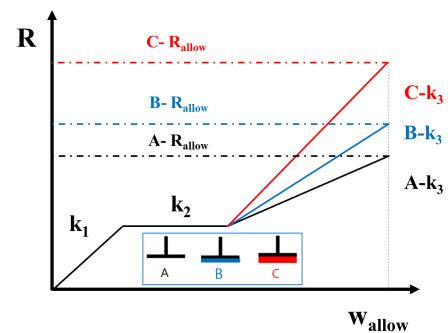


Fig. 5 Concept of Membrane stiffness for curtain plate

Fig. 2에 보였듯이, 초기 보의 탄성 굽힘 강성과 횡 하중으로 인해 야기되는 소성 거동(소성 굽힘 강성), 그리고 축 방향 변위의 구속으로 인한 소성 멤브레인 강성까지의 특성을 반영하여 구조물의 치수에 따라 저항 능력을 구할 수 있다. 이 개념을 커튼 플레이트에 적용하게 되면, 끝단부의 두께(Fig. 4의 t_b 와 t_b)가 증가된 만큼, 단면적이 증가하고 이로 인해 멤브레인의 강성을 증가시켜

저항 곡선을 수정하면 커튼 플레이트의 멤브레인 거동을 정량적으로 규정할 수 있다. Fig. 5는 위에서 설명한 커튼 플레이트의 보강으로 인해 멤브레인 강성을 증가시키는 방법을 나타내고 있다. 이와 같이 커튼 플레이트의 적용으로 인해 격벽 보강으로 인해 Fig. 5에 나타나듯이 부재 A, B, C의 유효 단면적 등이 증가하여 k_3 값이 상승하여 구조의 저항 능력이 증가하게 된다. 아래 식 (11)은 증가된 멤브레인 강성을 적용하여 부재의 저항력을 계산하는 방법을 나타낸다.

$$R_{allowa} = k_3 \times w_{allow} \quad (11)$$

이와 같이 커튼 플레이트를 적용한 폭발강화격벽은 부재의 저항력 증가로 충격량과 압력에 대한 내력이 증가하게 된다. 이때 폭발 하중에 의해서 발생하는 하중이 구조의 내력값 식 (1)과 (3)에 의해 계산된 값보다 큰 값을 유발하면 구조물은 손상이 발생하는 것으로 평가할 수 있다.

3. 폭발하중

폭발 현상은 발생 지점 중심에서 폭발성 물질이 구형태로 팽창하는 화학적 과정이다. 폭발성 물질을 통한 반응의 전파를 디토네이션파(detonation wave)라 하며, 이 파가 주변 공기에 초음속으로 전파되며 이를 충격파라고 불린다. 충격파는 공기를 통과할 때마다 압력이 감소하는데 이것은 기하학적 발산과 주변 공기의 가열 때문이며, 충격파가 충분히 멀리 이동하면 결국 음속으로 느려지게 된다.

밀폐된 공간에서의 폭발 하중은 Fig. 6에 보여진 그래프와 같이 크게 2단계로 정의할 수 있는데 (Stark, 2016), 첫번째는 위에서 설명한 형태로 충격파 진행 과정으로 이는 외부와 내부폭발 현상에서 거의 유사하다. 하지만 내부 폭발의 경우, 초기 충격파가 1회 이상 반사된 후, 공간의 평균 압력은 점차 안정된 수준으로 도달하고 이때를 준 정적 상태라고 정의할 수 있으며, 압력의 변화 추이는 제한된 공간의 부피 및 배출 그리고 폭발 에너지와 주변 구조에 따라 다르게 나타난다. 함정에서의 손상 체적 계산은 이러한 충격파와 준 정적 상태의 물리적 관계를 고려하여 선체 구조 응답특성을 반영하여 손상 정도를 정량적으로 예측하는 과정이라 할 수 있다.

3.1 충격하중 산정

폭약의 폭발로 인한 하중을 산정할 때 TNT 모델을 사용하기 위해, 위협 무기의 등가 TNT 총량(W)을 적용하는 경우가 많다. 이때 대상 구조물에 대한 정보가 충분하지 않은 경우 충격량은 무시하고 경험에 기초한 압력으로 손상 수준을 대략 평가하기도 하는데, 실제 구조물이 겪는 TNT 폭발하중은 충격파의 압력 지속시간이 구조물의 고유 진동수에 비해 매우 짧은 경우가 대부분이기 때문에, 압력보다는 충격량으로 평가되는 것이 적절한 경우가 많다.

20세기에 폭발하중에 대한 산정 방법으로 여러가지 모델이 개

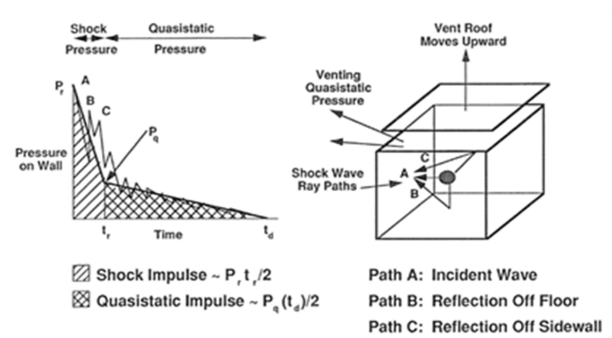


Fig. 6 Blast load in confined space (Stark, 2016)

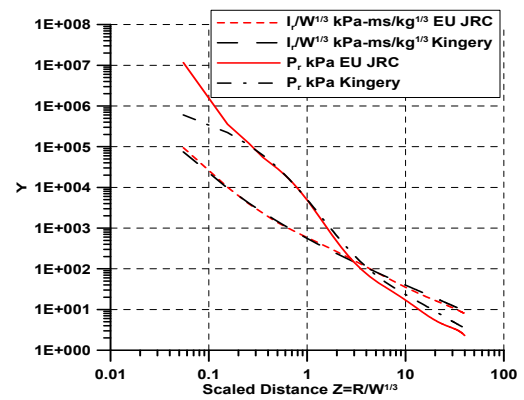


Fig. 7 Comparison of Kingery model and EU JRC model for free-air burst (Karlos, 2016)

발되었으며, 이 중 TNT 등가 총량(W)과 폭발 거리(R)에 따른 충격하중 산정 방법인 1984년도에 Kingery-Bulmarsh가 만든 모델(이하 Kingery 모델)과 1985년 Kinney가 만든 모델이 실무적으로 가장 널리 사용되고 있는 것으로 알려져 있다 (Driels, 2004). 하지만 최근 EU JRC 보고서 (Karlos, 2016)에 따르면, Kingery 모델과 Kinney 모델 둘 다 폭발물과의 거리가 매우 짧은 경우에는 실제보다 압력을 과소평가하는 경향이 있는 것으로 평가하고 있어, 이를 보정하기 위한 새로운 모델을 제시하였으며, Fig. 7은 이 모델들을 비교하여 나타낸 그래프이다. 아래 그래프에서 확인할 수 있듯이, 근접 폭발의 경우 EU JRC에서 제시한 모델의 압력값이 가까운 거리에서 좀 더 높은 값을 제공하는 것으로 나타나지만 충격량의 경우 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 다만 본 연구에서는 최근 연구 결과인 EU JRC 연구 내용의 폭발 모델을 적용하였다. 아래 그래프에서 Y축은 폭발 하중을 의미하고, X축은 TNT 등가 총량(W)과 폭발거리(R)로 구해지는 환산거리(Z)를 의미한다.

3.2 준 정적 가스 압력 산정

밀폐된 실내에서 TNT가 폭발하게 되면 이에 상응하는 에너지가 발산하며 최초 충격파를 유발하고 그 충격파들은 앞에서 언급했던 대로 내부에서 반사하며 안정화 되는 과정을 거치게 된다.

이와 동시에 최초 연소 시 발생한 연소 부산물들(C, CO, H₂, CH₄)이 실내에 갇힌 채로 2차 연소하며 실내의 평균적인 온도/

압력 상승을 유발한다. 준 정적 가스 압력은 2차 연소가 진행되며 점진적으로 변화하는데 그 값을 얻기 위해 화학 방정식 등에 기초하여 전체 연소 에너지에 의한 2차 연소 후 실내 존재하는 공기와 가스 혼합 기체의 온도 및 압력 상승을 계산하는 모델을 사용하기도 하지만 (Edri et. al, 2013) 실험결과를 피팅(fitting)하여 만든 Unified Facilities Criteria (UFC, 2008)에서 제시된 모델 (U.S. Army Corps of Engineers, 2008)을 실무에 널리 사용한다.

TNT를 포함한 대부분의 폭발물들은 산소 부족으로 폭발 시 모든 연료가 소모되지 않는다. 남은 연료들은 폭발이 일어나는 동안 주위의 공기와 결합하여 추가 연소를 일으키며 압력을 증가시키는데 이를 재연소(afterburning)라고 한다. 일반적인 외부 폭발에서는 재연소 효과는 고려되지 않는데 이는 구속되지 않은 공간에서는 산소와 결합 효율이 떨어지기 때문이다. 하지만 구속된 공간에서 폭발물 내의 연료가 주위의 공기와 섞여 활발한 산화작용이 일어나기 때문에 재연소 효과는 폭발 환경에 따라 신중히 고려되어야 한다.

본 연구에서는 격실 사이의 벽이 붕괴되어 두 격실이 합쳐져 하나의 격실이 되는 경우에는 처음에 산소 부족으로 연소되지 못했던 1차 연소 부산물들이 인접 격실로 넘어가면서 해당 격실의 산소를 만나 추가 연소되는 것을 가정하여 추가 연소로 상승하는 온도/압력을 초기 가스 압력에 반영해 줄 수 있는 전체 연소 에너지를 고려한 모델을 적용하였다. 그래서 본 연구에서는 full afterburning을 가정하여 W/V가 낮은 상황에서의 UFC곡선 기울기를 W/V가 높은 곳에서도 그대로 따라가도록 아래 식 (12)를 적용하였다. Fig. 8은 UFC와 LR에서 제시된 준 정적 가스 압력값의 비교를 나타낸 그림이다.

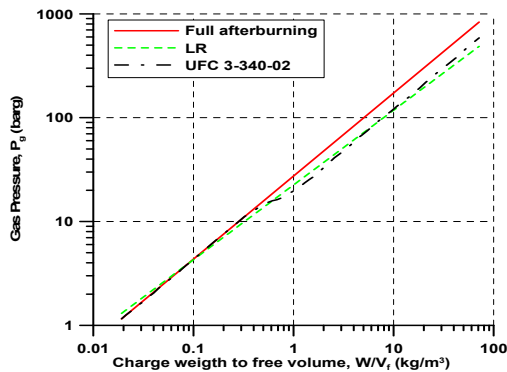


Fig. 8 Gas pressure model

$$P_g = 27.4 \times (W/V)^{0.8} \quad (12)$$

여기서, W 는 TNT 중량(kg), V 는 제한된 공간의 부피(m^3), P_g 는 가스 압력값(bar)이다.

4. 최적화 문제

최근 한국 해군은 함정의 생존성 향상을 위해 폭발강화격벽을 적극적으로 도입하고 있는 추세이다. 함정 초기 설계 과정에서 폭발강화격벽의 설치 효과를 높이면서 폭발강화격벽의 보강 수준

및 개수를 낮춰 중량을 줄이기 위한 검토는 매우 중요한 작업이다. 본 논문의 목적은 생존성의 한 분야인 취약성을 최소화하면서 이때 폭발 강화 격벽의 적용에 따른 중량 변화 관계를 파악하여 함정 초기 설계 단계에서 최적화 문제를 해결함으로써 설계의 효율성을 높이하고자 함이다.

함정의 취약성을 정량적으로 나타내는 방법은 여러 가지가 존재할 수 있지만, 본 연구에서는 함정의 예측 되는 위협무기의 다양한 내부 폭발 시나리오에 따른 손상 범위(체적)를 취약성 지수로 하였다. 이것은 단 발의 피격 또는 매우 적은 양의 폭발 위치를 시나리오로 고려하면 부분적 평가가 이뤄지기 때문에 함 전체의 생존성을 다루지 못하게 되어 비효과적인 폭발강화격벽 설치와 보강이 나올 수 있기 때문이다 (Choi, 2015). 피격 위치의 생성은 예측되는 위협 무기에 대한 정보를 확률적/통계적으로 분석하여 이뤄져야 하는 것으로 방산분야의 특성상 군으로부터 정보를 획득하기 어려워 본 연구에서는 일정하게 분포된 피격 시나리오를 고려하였다.

4.1 취약성 평가

본 연구의 최적화 문제인 손상 체적을 최소화하여 취약성을 낮추기 위한 폭발강화격벽의 치수를 결정하는 계산을 수행하기 위해서는 대상 함정의 구조 모델과 위협 무기의 피격 시나리오 등이 필요하다. 아래 Fig. 9는 임의 함정을 이상화하여 본 연구의 최적화 문제에 활용한 모델이며, Table 1은 이 모델의 주요 치수와 구조 모델의 정보를 나타낸다.

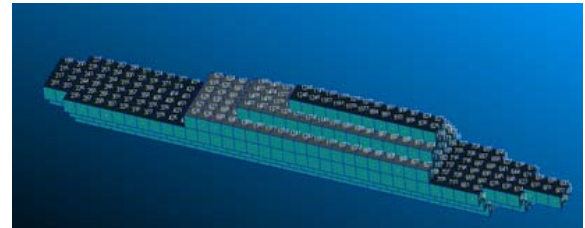


Fig. 9 Ship structural model

Table 1 Model Information

Ship main dimensions	Length (m)	126
	Breadth (m)	12.5
	Depth (m)	9
Ship structural model	Panel No.	1406
	Panel size (m)	3
	Compartment No.	44
	Total Volume (m^3)	14,219.98

또한 취약성 평가를 위해서 함정의 피격 시나리오를 고려해야 한다. 함정의 피격 시나리오는 피격 분포 해석을 통해 생성되는데, 이것은 위협 무기의 특성에 따라 평균과 분산의 통계적 값에 의해 결정된다. 본 논문에서는 일정하게 분포된 피격 시나리오를

적용하여 아래 Fig. 10과 같이 나타냈다. 그림에서 빨간 점들이 위험 무기에 의해서 피격된 지점을 나타내는 것인데, 모두 54개의 피격점을 고려하였고 해당 위험 무기의 TNT 중량은 100 kg으로 가정하였다.

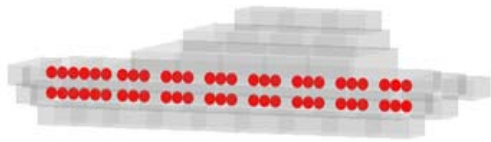


Fig. 10 Hit distribution

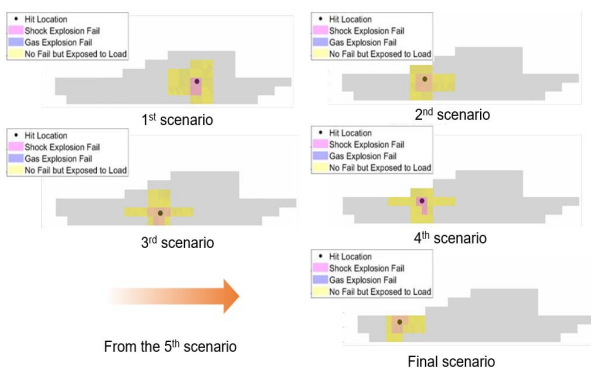


Fig. 11 Damage volume of total scenarios

Fig. 10의 모든 피격 시나리오에 대해 손상 체적을 Fig. 11처럼 계산하였다. 전체 54개의 시나리오에 대해서 폭발강화격벽을 적용하지 않은 경우와 모든 폭발강화격벽을 최대의 치수로 보강한 경우 각각 총 105,120 m³ 및 85,020 m³의 총 손상 체적이 계산되었다. 즉 85,020 m³값은 이 최적화 문제에서 얻을 수 있는 최소의 손상 체적이 된다. 또한 최대로 보강했을 때 증가된 중량은 31.08 ton이다. 여기서 계산된 결과들은 최적화 계산을 통해 얻은 폭발 강화 격벽 적용 중량 대비 어느 정도 손상체적이 감소하였는지 비교하는데 유용한 자료가 된다.

4.2 최적화 정식화

최적화 문제란 목적 함수를 정의하고, 목적 함수값이 최소 혹은 최대가 되는 가장 좋은 해를 수많은 후보 중에서 구하는 것이다. 본 연구에서는 목적 함수를 취약성과 중량을 조합하여 설정하였고 찾고자 하는 설계변수값은 폭발강화격벽의 치수가 된다. 함정에서 수밀 격벽의 치수는 함정의 길이 방향과 높이 방향에 따라 요구되는 수준이 달라, 설치 위치에 따라 요구되는 폭발강화 격벽도 달라질 것으로 가정하여 Fig. 12와 같이 노란색 부분을 모두 폭발강화격벽 도입의 후보군으로 설정하였으며, 본 연구에서 사용하는 이상화된 함정의 경우에는 28개의 폭발강화격벽 설치 유무 및 보강 수준 결정 문제로 고려해 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서 수행된 최적화 문제에 대한 정리는 아래와 같다.

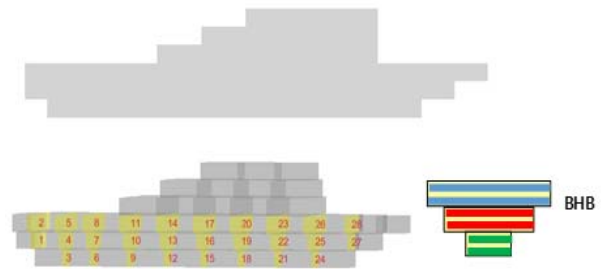


Fig. 12 Naval ship model

Find $BHB_i (A_i, t_{A_i}), i = 1 \sim 28, (A = B, t_A = t_B)$

to minimize $f = \alpha(TDV - 85,020)^2 + \beta M_{BHB}$

$0 < A = B \leq 0.4L$

$0 < t_A = t_B \leq t_c$

(13)

여기서, $TDV = \sum_{s=1}^{N=54} DV_s$ 는 모든 시나리오에서 발생하는 구획(compartment)의 손상 체적(DV_s , damage volume)들의 합이며, M_{BHB} 는 BHB로 인해 증가된 질량, t_c 는 플레이트 두께(plate thickness), α, β 는 가중치(weighting factor)에 해당된다. 이때 손상 체적은 피격후 손상이 발생한 구조를 포함하는 함정의 구획들의 부피를 합산하여 계산할 수 있다.

식 (13)에서 변수는 폭발 강화 격벽 치수(A, B, t_A, t_B)이며 (Fig. 4 참조), 이때 커튼 플레이트의 상하 치수는 같다고 가정하여 ($A=B, t_A=t_B$) 총 56 (=28×2) 가지 변수의 해를 찾는 문제로 정의할 수 있다. 제약조건(constraint)은 커튼 플레이트의 길이가 보 전체 길이의 40 %를 넘지 않고 두께는 기존 플레이트 두께(t_c)의 100 % 증가까지만 허용하도록 하였다. 목적함수는 모든 피격 시나리오를 고려한 전체 손상 체적의 합과 폭발 강화 격벽 중량의 조합으로 설정하였다. 이때 앞서 계산되었던 폭발강화격벽을 최대로 보강했을 때 즉, 커튼 플레이트의 두께와 길이를 최대로 증가시킨 경우($t_A=t_B=2t_c, A=B=0.4L$)의 손상 체적 결과(85,020 m³)를 고려하였다. 또한 목적 함수에 사용된 α 와 β 는 가중치로서 사용자의 의도에 맞게 수정할 수 있는데 본 연구에서는 각각 1.0을 적용하였다. 이렇게 정해진 최적화 문제의 의도는 목적함수에서 손상체적의 변화값이 폭발 강화 격벽의 변화 보다 더욱 민감하게 하여 최소의 손상체적(85,020 m³)에 가까운 손상을 유발하는 최소 중량의 폭발강화격벽 치수를 찾기 위함이다.

4.3 유전자 알고리즘

전통적인 최적화 방법들은 크게 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 첫째로 도함수를 이용하는 방법, 두 번째는 한정된 공간에서 모든 점들을 목적 함수로 한번에 하나씩 탐색하는 방법, 마지막으로 어떤 임의점을 선택하여 탐색을 시작하는 것이다. 그러나 이러한 방법들은 설계 변수가 많거나 목적 함수가 복잡한 경우 최적해를 찾는 데 어려움이 있으며, 목적 함수에 여러 개의 국부

해(local optimum)가 존재할 때 얻은 값이 전역해(global optimum)인지 신뢰하기가 어렵다. 그러나 유전자 알고리즘은 기존의 최적화 방법과 달리 도함수의 정보가 필요하지 않으며, 해에 대한 신뢰성이 높아 많은 최적화 문제에 사용되고 있다.

유전자 알고리즘은 Holland 박사가 제안한 알고리즘으로 두 부모의 유전자로부터 그들 자손의 유전자를 형성하는 유성 생식과 자연환경에서 일어나는 진화 원리를 흉내 내고 있다. 유전자 알고리즘은 복잡한 문제뿐만 아니라 불연속적인 탐색 공간에서도 이용할 수 있다는 장점이 있으며, 확률적인 임의 탐색 방법(random search)으로서 전체 공간에서 해가 존재할 가능성이 있는 국부적 영역만을 탐색하지 않고 전역적으로 탐색하는 방법이다. 유전자 알고리즘은 문제 형식에 따라 사용자가 보다 다양한 방법을 적용할 수 있다. 특히 최적화 문제에서 변수가 많거나 함수가 복잡하게 되면 단순 유전자 알고리즘 방법으로 신뢰성 있는 해를 구하기 어려워 개선된 방법을 적용하여 효과를 높이기도 한다.

본 연구에서 사용하고자 하는 목적 함수의 형태 또한 폭발 하중과 구조 동적응답을 고려하는 복잡한 연산 조건과 변수 역시 많기 때문에 개선된 유전자 알고리즘 방법을 적용하였으며, 이전 세대의 가장 우수한 객체를 다음 세대의 연산에 참여하도록 엘리트 전략 (Jin, 2000)을 적용하였다.

Table 2는 본 연구에서 활용된 유전자 알고리즘의 연산에 사용된 방법이다. 전통 유전자 알고리즘에서 적용된 이진 코드와 일점 교배 등의 방법보다 훨씬 더 수학적 기법이 반영되어 있어 이 방법은 머신 비전 (Hong, 2008) 및 강화 학습 등에 활발히 활용되고 있다.

Table 2 Genetic algorithm parameters

Encoding	Real coding
Selection	Gradient like selector
Cross over	Arithmetic (90%)
Mutation	Dynamic (10~15%)
Pop size	30
Additional option	Elite strategy

4.4 최적화 결과

위의 언급된 목적 함수와 최적화 연산 방법인 유전자 알고리즘을 적용하여 최적화 문제를 계산하였다. 사용된 객체수는 30개이며, 연산을 위한 세대는 최대 100세대까지 수행하였고, 목적 함수의 하나인 함정의 손상 체적 계산을 위해 54개의 시나리오를 적용하여, 총 162,000(54x30x100)번의 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 13은 유전자 알고리즘에 대한 연산 결과를 세대에 따라 나타내었다.

해석 결과에 의하면, 약 5.5 ton의 중량 증가만으로도 31.08 ton의 중량 증가를 적용한 경우의 손상 체적 억제와 유사한 효과를 얻을 수 있었으며 이에 상응하는 폭발강화격벽 치수인 길이와

두께를 도출할 수 있었으며 결과는 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다.

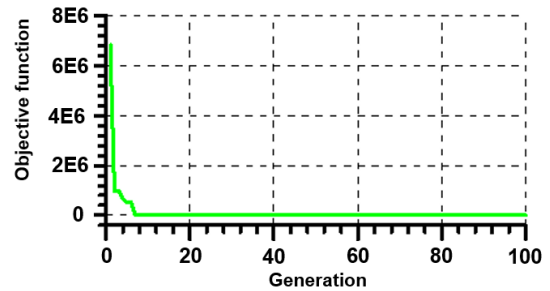


Fig. 13 Objective function according to Generation

Table 3. Optimum results

	f	M_{BHB}	TDV
Initial	6,811,531	8.34692	87,629.9
Optimum	5.421157	5.41007	85,019.9

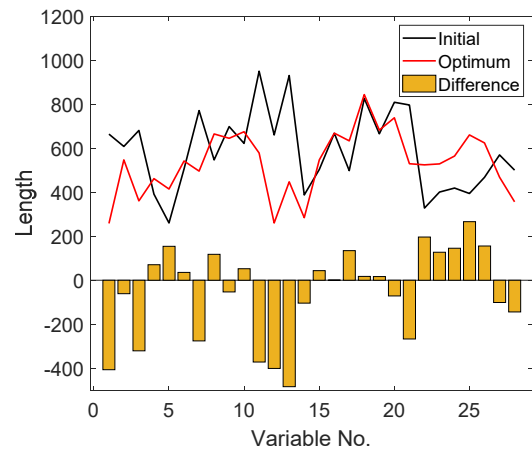


Fig. 14 Initial and optimum length values ($A=B$)

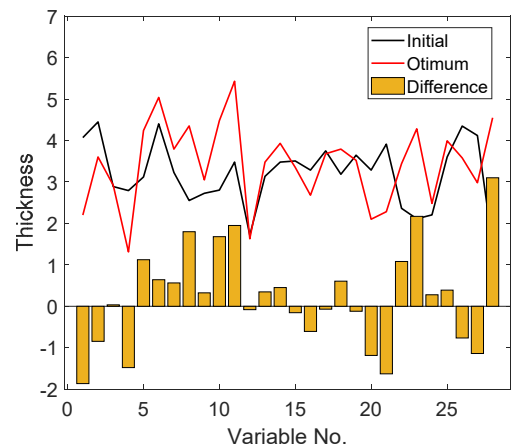


Fig. 15 Initial and optimum thickness ($t_A=t_B$)

최적화 전 초기값과 최적화 이후 길이와 두께를 비교해 보면,

길이는 감소 폭이 큰 데 반해 상대적으로 두께 감소는 적다. 큰 길이 감소는 결과적으로 격벽의 부피와 질량을 감소시키는 효과를 거두는 데 기여했는데, 그 이유는 두께에 비해 부피의 중요한 치수인 커튼 플레이트 길이 최적화는 격벽의 전체 부피와 질량 감소에 더 큰 기여를 했기 때문이다. 따라서 최적화된 폭발강화 격벽은 폭발하중에 의한 손상 체적은 최소화하면서 동시에 중량 증가도 최소화함으로써 함정의 생존성은 개선시키는 효과를 거둘 수 있다.

본 연구에서는 최적화 개념에 대한 연구 방안을 소개하기 위해서, 정형화된 피격 시나리오에 대한 취약성 감소를 위한 폭발강화격벽 최적화 문제에 적용하였으나, 위협 무기의 특성을 고려한 피격 시나리오 적용 시 보다 현실적인 최적화 문제에 적용이 가능하리라 판단된다.

5. 결 론

함정의 생존성을 개선시키는 설계는 분명 다른 기능을 감소시키는 필연적 부작용 요소가 발생할 가능성이 높다. 따라서 함정 설계는 생존성뿐만 아니라 다른 조건들도 함께 종합적으로 고려해야 한다. 이러한 대안 중 하나로 본 논문에서는 함정의 취약성 감소를 위해 고려되는 폭발강화격벽의 설계 최적화 문제에 대한 연구 결과를 소개하였다. 추후 위협 무기의 특성이 반영된 피격 위치를 고려하여 설계 초기에 취약성 감소를 위한 폭발강화격벽 설계의 정확한 치수와 중량 추정치 가능할 것으로 본다. 이럴 경우, 항공모함과 같은 미경험 함정 설계 시 중량 증가에 미치는 영향을 최소화하면서 생존성을 높일 수 있는 방법에 적용시켜 본 연구의 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 과제는 대우조선해양과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No. 2020R1A5A8018822)이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Amdahl, J., 2003. *Revised NORSOK standard N-004 on accidental explosion*. [Online] Available at <https://www.usfos.com/publications/explosion/documents/2003-DesignOrientedMethodsAccidentalExplosions.pdf> [Accessed 1 August 2022].
- Amdahl, J., 2004. *Resistance to accidental and very extreme explosion*. [Online] Available at <https://www.usfos.com/publications/explosion/documents/2004-ResistanceAccidental&ExtremeExplosions.pdf> [Accessed 1 August 2022].
- Boulougouris, E.A. and Papanikolaou, A.D., 2004. Optimisation of the survivability of naval ships by genetic algorithms, *Proceedings of the 3rd Int. Euro Conference on Computer Applications and Information Technologies in the Maritime Industries, COMPIT'04*, Sigüenza, Spain.
- Burak, C.O. and Ozgur, D., 2020. Dynamic analysis of hardened double bulkhead structure subjected to blast loading, *European Journal of Science and Technology*, 18, pp.818-832.
- Choi, Y.S., Yeo, S.K. and Chung, H., 2015. An optimal arrangement method of blast hardened bulkhead for surface warships using a simplified vulnerability evaluation, *Proceedings of the 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Incheon, Korea.
- Defence R&D Canada Valcartier(DRDC Valcartier), 2012. Internal Blast in a Compartment-type Vessel.
- DNVGL, 2019. *Structural design against accidental loads, recommended practice*, DNVGL-RP-C204.
- Driels, M., 2004. *Weaponizing*, AIAA.
- Edri, I. Feldgun, V.R. Karinski, Y.S. and Yankelevsky, D.Z., 2013. Afterburning Aspects in an Internal TNT Explosion, *International Journal of Protective Structures*, 4(1), pp. 97-116.
- Hong, S.K., 2008, *Stereon matching using edge information and g genetic algorithm*, Master, Korea Maritime University.
- Jin, G.G., 2002, *Genetic Algorithm and Their Application*, KyoWooSa, Seoul.
- Jung, J.U., Jeong, Y.K., Ju, S.H., Shin, J.G. and Kim, J.C., 2018. A simplified assessment method and application for consideration of survivability in spatial layout design at the early design stage of naval vessels, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(10), pp.9-21.
- Karlos, V., Solomos, G. and Lacher, M., 2016. *Technical reports: Analysis of blast parameters in the near-field for spherical free-air explosions*, EU JRC.
- Kim, Y.Y., Choi, G.G., Na, Y.S. and Han, S.H., 2015. Development of design and validation technology for blast hardened bulkheads, *Proceedings of Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)*, Incheon, Korea.
- Kim, U.N. and Ha, S.S., 2020. A review on practical use of simple analysis method based on SDOF model for the stiffened plate structures subjected to blast loads, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(2), pp. 70-79.
- Lee, S.G., Lee, H.S., Lee, J.S., Kim, Y.Y. and Choi, G.G., 2017. Shock response analysis of blast hardened bulkhead in partial chamber model under internal blast, *Proceedings of the 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics (Procedia Engineering)*, 173, pp. 511-518.

- Nho, I.S., Park, M.J. and Cho, Y.S., 2018a, Preliminary structural design of blast hardened bulkhead (The 1st Report : Formulation of Simplified Structural Analysis/Design Method). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(5), pp.371–378.
- Nho, I.S., Park, M.J. and Cho, Y.S., 2018b, Preliminary structural design of blast hardened bulkhead (The 2nd Report : Scantling Formula for Curtain Plate Type Blast Hardened Bulkhead). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(5), pp.379–384.
- NORSOK Standard, 2004, *Design of steel structures, Rev.2, Standard N-004*, Norway Lysaker:Standards Norway.
- Republic of Korean Navy, 2009. *Guideline for Design of Blast Hardened Bulkhead*.
- Shin, Y.H., Kwon, J.I. and Chung, J.H., 2013. Development of a simplified vulnerability analysis program for naval vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.383–389.
- Sohn, J.M. and Kim, S.J., 2017. Numerical investigation of structural response of corrugated blast wall depending on blast load pulse shape. *Latin American Journal of Solid and Structures*, 14(9), pp.1710–1722.
- Stark, S. and Sajdak, J., 2012. Design and effectiveness criteria for blast hardened bulkhead applications on naval combatants, *Proceedings of the 4th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures*, Jeju, Republic of Korea.
- Stark, S.A., 2016. *Definition of damage volumes for the rapid prediction of ship vulnerability to AIREX weapon effects*. Master, Virginia Tech.
- Unified Facilities Criteria(UFC), 2008. *Structures to Resist the Effects of the Effects of Accidental Explosions*.
- Yussof, M.M., Silalahi, J.H., Kamarudin, M.K., Chen, P.-S. and Parks, G.A. 2020. Numerical evaluation of dynamic responses of steel frame structures with different types of haunch connection under blast load. *Applied Sciences*, 10(5), pp.1815.



곽 묘 정



권 승 민



노 유 정