

내부 폭발에 의한 함정의 손상 예측

장원준·정준모[†]

인하대학교 조선해양공학과

Prediction of Damage Extents due to In-Compartment Explosions in Naval Ships

Wonjune Chang · Joonmo Choung[†]

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University

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.

In order to reasonably predict damage extents of naval ships under in-compartment explosion (INCEX) loads, two conditions should be fulfilled in terms of accurate INCEX load generation and fracture estimation. This paper seeks to predict damage extents of various naval ships by applying the CONWEP model to generate INCEX loads, combined with the Hosford-Coulomb (HC) and localized necking (LN) fracture model. This study selected a naval ship with a 2,000-ton displacement, using associated specifications collected from references. The CONWEP model that is embedded in a commercial finite element analysis software ABAQUS/Explicit was used for INCEX load generation. The combined HC-LN model was used to simulate fracture initiation and propagation. The permanent failures with some structural fractures occurred where at the locations closest to the explosion source points in case of the near field explosions, while, some significant fractures were observed in way of the interfaces between bulkheads and curtain plates under far field explosion. A large thickness difference would lead to those interface failures. It is expected that the findings of this study enhances the vulnerability design of naval ships, enabling more accurate predictions of damage extents under INCEX loads.

Keywords : Blast load(폭발하중), In-compartment explosion(내부 폭발), CONWEP model(CONWEP 모델), Ductile fracture(연성 파단), Combined HC-LN fracture model(HC-LN 파단 모델), Damage extent(손상 범위)

1. 서론

해군 함정은 임무수행 중 다양한 위협에 처하게 된다. 이를 고려하여 최근의 함정은 설계 초기부터 함정의 생존확률을 높이고 전투/기동능력의 손실을 최소화하는 생존성 설계를 적용한다. 생존성 설계에는 스텔스 성능이라고 불리는 수중방사소음, 적외선 신호 등을 관리하며 자함 방어체계를 적용하는 피격성, 피격시 손상을 견디고 함 전체의 복원성부터 각종 장비/설비들이 피격을 견디도록 관리하는 취약성, 피격 후 손상통제시스템 등을 통한 손상된 계통의 빠른 회복성능을 부여하는 회복성이 있다. 함정의 생존성 관련 연구는 많이 이루어져 있는데, Kok (2012)의 연구처럼 피격성, 취약성, 회복성을 향상시키기 위해서 광장히 많은 기술이 사용되고 있다. 생존성은 주로 배치를 최적화하는 연구 (Jung et al., 2018)가 있다. 함정에는 특히 일반 상선보다 전기 배선이 많이 설치되어있는데 (Cerninara and Kotacka, 1990)은 전기계통의 설계에서 생존성을 고려하는 연구를 하였다. Kim. (2021)은 함정의 RCS (Rader Cross Section)등을 고려

하여 기만체를 효과적으로 사용하는 연구를 하였다. 취약성을 고려한 설계는 많은 시간과 노력을 요구하게 된다. Kim et al. (2014)은 확률밀도 함수를 통해 함정의 취약성을 평가하는 방안을 연구하였다. Kim (2022)은 수중폭발에 의한 함정의 취약성 연구를 하였고, Kim and Park (2003)은 박스 거더를 함정에 적용하여 취약성을 향상시키는 연구를 진행하였다. 폭발 강화 격벽은 함정의 취약성에 큰 영향을 끼치는데, Kim (2015)는 함정용 폭발 강화 격벽에 발포 알루미늄을 적용하는 연구를 진행하였고, Nho et al. (2018)는 커튼판 방식 폭발 강화 격벽의 설계식을 개발하였다.

최근의 대함미사일은 지연 신관을 장착하여 함 외판을 관통 후 선체 격벽 내부에서 폭발 (In-Compartment EXplosion, INCEX) 하는 SAP (Semi Armor Piercing) 탄두를 적용하는 추세이다. 함정은 기본적으로 수밀 격벽으로 구획화 되어있어 일부 구획의 침수에도 부력을 유지한다. 대함 미사일 피격으로 인해 수면 하 격실에 INCEX 발생 시 해당 격실과 인접 격실의 장비 및 설비는 물론 수밀 격벽의 파단이 발생하면 인접 구획으로 침수가 확산되고, 이는 궁극적으로 함정의 침몰로 이어진다. INCEX는 격실의 용적,

내부 격벽의 구조, 기하학적 형상, 격벽과 보강재의 배치 등에 따라 다른 손상 결과를 가져오게 된다.

INCEX 하중을 생성하고 전달하기 위하여 CEL(coupled Eulerian-Lagrangian) 기법 또는 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법을 적용할 수 있다. CEL 및 ALE 기법에서는 유체 영역, 구조 영역, 그리고 폭발을 직접 모델링하기 때문에 비교적 정확하지만, 매우 오랜 계산 시간을 요구한다. 이로 인하여 다양한 폭발 하중 케이스를 고려하지 못하는 단점이 있다.

반면 CONWEP(CONventional Weapons Effects Program)은 폭발 압력 이력을 경험적으로 이상화한 방법이다. Vannucci et al. (2017)은 CEL과 CONWEP에 의한 폭발 압력을 비교한 결과, CONWEP이 반사 충격을 고려할 수는 없지만, 비교적 정확한 압력 이력을 제공한다고 결론내렸다. Erdik and Uçar (2018)은 상용 유한 요소 해석 코드 LS-DYNA를 이용하여 3가지 공기 중 폭발 모델, 즉 CONWEP, CEL, CONWEP-CEL을 비교하였다. 그 결과 CONWEP은 차폐 효과 (shadow effects)를 고려할 수 없지만, 가장 빠르게 해석을 진행할 수 있다고 결론 내렸다. Yun and Yoo (2016)은 폭발 하중 실험 후에 얻은 방폭 문의 변형을 두가지 수치 해석 (CONWEP 및 CEL) 결과와 비교하였다.

폭발 하중에 대한 연구는 선박 내에서 실험적 연구가 수행되기 어렵기 때문에 지상 구조물에 대하여 많은 실증 또는 수치 해석 연구가 수행되어 왔다. Sriram et al. (2006)은 CONWEP을 이용하여 탄약고 문에 설치할 알루미늄 폼의 방호력을 검증하였다. 계산 시간을 단축하기 위하여, 구조물의 주변에만 유체 영역을 모델링하고 CONWEP을 이용하여 폭발 하중을 생성시킨 후 이 하중을 유체 영역에 전달하는 기법을 제안한 바 있다 (Yi et al., 2014). CONWEP은 차폐 효과를 고려할 수 없기 때문에 적용이 불리한 상황도 있다. Williams et al. (2002)는 CONWEP을 이용하여 지뢰 폭발 하중을 구현하였으나, 땅속 매설로 인한 차폐 효과를 구현할 수 없었다.

본 연구에서는 문헌 조사를 통하여 해군 함정의 구획 특성을 우선적으로 조사하였다. 적의 공격에 의한 가장 현실적인 폭발의 질량을 고려하였으며, 폭발 위치를 주요 변수로 결정하였다.

폭발에 의한 손상의 크기를 결정하기 위해서 가장 중요한 두가지 요소는 첫째 압력 하중을 정확하게 산정하는 것이고 둘째 하중에 의한 구조의 비선형 거동 및 파단을 정확하게 예측하는 것이다. 내부 격실 간의 차폐 효과를 무시할 경우, CONWEP 모델도 충분히 정확한 압력 하중을 생성할 수 있다고 판단하였기 때문에 본 연구에서는 CONWEP 모델을 적용하였다. 반면 격실의 파단 여부를 판단하기 위해서는 정확한 유동 응력과 파단 모델의 적용이 요구된다. 조사된 대부분의 문헌은 주로 압력 하중을 정확하게 생성하는데 초점을 맞추어 왔으며, 합리적 파단 모델의 적용을 통하여 파단 크기를 정확하게 예측하는 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 Hosford-Coulomb 파단 모델 (HC 모델)과 국부 necking 파단 모델(localized necking 파단 모델, LN 모델)의 하이브리드 모델 (HC-LN 파단 모델) 기반의 응력 삼축비-파단 변형을 곡선(failure locus)을 적용하였다. 응력 경로 효과(stress path effect)를 고려한 격실의 손상도를 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 CONWEP 모델

CONWEP 모델은 폭발 실험을 통해 얻은 실험식에 근거하여 개발되었으며, 컴퓨터에서 사용가능하도록 1986년 미 육군 공병단이 개발하였다. CONWEP 모델은 Kingery and Bulmash (1984)가 제안한 방정식에 근거한다. CONWEP 모델은 폭발 해석이 가능한 동적 해석 코드 (LS-DYNA, Abaqus 등)에 내장되어 폭발 하중을 재현한다. 전술한 바와 같이 CONWEP 모델은 유체 영역 없이 구조물에 폭발 하중을 전달하므로 CEL 해석 비교해서 해석 속도가 매우 빠르다.

공기중 폭발에 의한 압력-시간 이력은 일반적으로 Fig. 1과 같은 형태로 나타난다. 폭발 충격이 최초로 전달되면 압력은 급격히 증가하여 최대 압력에 도달한다. 충격파의 전파 속도는 일반적으로 공기 중 음속보다 크며, 시간 및 거리가 늘어날수록 전파 속도가 줄어드는 특징이 있다. 최대 압력 이후 압력이 감소하여 대기압과 같아지는데, 이때까지의 구간을 양압 단계(positive phase)라고 정의한다. 압력-시간 이력 곡선 상의 면적은 양압 충격량으로 정의된다. 이후 압력이 감소하여 대기압보다 낮은 압력이 지속되는 구간을 음압 단계(negative phase)라고 정의한다. 압력-시간 이력 곡선 상의 면적은 음압 충격량으로 정의된다. 일반적으로 음압 단계의 최대 압력과 충격량은 양압 단계의 그것들에 비하여 매우 작아서 무시할 수 있는 수준으로 알려져 있다.

CONWEP 모델은 거리, 질량, 시간, 압력의 단위로 각각 ft, lb, ms, psi를 사용하며, 환산 거리 (Z)가 압력을 결정하는 변수가 된다 (식 (1) 참조). R 은 폭약으로부터 대상 구조물까지 거리, W 는 폭약의 질량을 의미한다.

$$Z = \frac{R}{W^{(1/3)}} \quad (1)$$

환산 거리를 이용하여 폭발 하중의 압력은 입사압과 반사압의 합으로 계산되며, 입사 각도를 고려한 양압의 최대값은 식 (2)와 같다. P_{max} 는 최대 양압이며, P_{inc} 와 P_{ref} 는 각각 최대 입사압 (Maximum Incident Pressure)과 최대 반사압 (Maximum Reflection Pressure)이다.

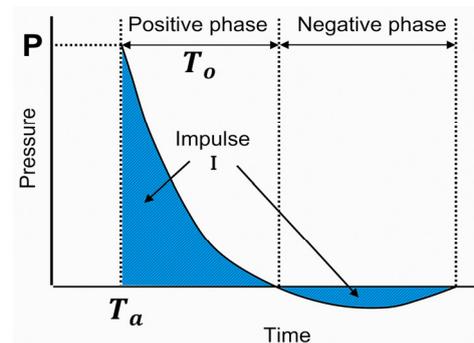


Fig. 1 Pressure-time histogram of an airborne explosion

Table 1 Coefficients for maximum incident pressure

Coeff.	Value	Coeff.	Value
C1	1.772849705	C2	-1.690128014
C3	0.00804973592	C4	0.336743115
C5	-0.00516226351	C6	-0.080922862
C7	-0.00478507267	C8	0.00793030472
C96	0.000768446974		

Table 2 Coefficients for maximum reflection pressure

Coeff.	Value	Coeff.	Value
D1	2.391061349	D2	-2.21400539
D3	0.0351190314	D4	0.657599992
D5	0.0141818952	D6	-0.243076636
D7	-0.0158699803	D8	0.0492741184
D9	0.00227639644	D10	-0.00397126276

최대 입사압은 식 (3)과 같으며, 식 (4)를 이용하여 입사 압력을 계산한다. 마찬가지로 최대 반사압은 식 (5)와 같으며, 식 (6)을 이용하여 반사 압력을 계산한다. 식 (3) 및 식 (5)에 사용된 입사압 및 반사압 계수를 Table 1 및 Table 2에 각각 제시하였다.

$$P_{max} = P_{inc} \times (1 + \cos\theta - 2\cos^2\theta) + P_{ref} \times \cos^2\theta \quad (2)$$

$$P_{inc} = 10^{(C1 + C2 \times U_{inc} + C3 \times U_{inc}^2 + \dots + C9 \times U_{inc}^8)} \quad (3)$$

$$U_{inc} = -0.756579301809 + 1.35034249993 \log Z \quad (4)$$

$$P_{ref} = 10^{(D1 + D2 \times U_{ref} + D3 \times U_{ref}^2 + \dots + D10 \times U_{ref}^9)} \quad (5)$$

$$U_{ref} = -0.756579301809 + 1.35034249993 \log Z \quad (6)$$

이와 같은 방법으로 최대 압력 도달 시간, 양압/음압의 지속 시간, 충격량 등을 계산할 수 있다.

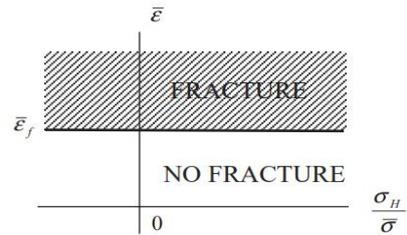


Fig. 2 Constant failure strain model

2.2 파단 모델

2.2.1 등가 파단 변형률 모델

상수 파단 변형률 모델 (Constant Failure Strain model, CFS 모델)은 Fig. 2와 같이 등가 소성 변형률 ($\bar{\epsilon}$)이 파단 변형률 ($\bar{\epsilon}_f$)에 도달하면 파단이 발생한다는 단순한 논리에 근거한다. 즉, 응력 삼축비 (stress triaxiality, 정수압 응력 σ_H 과 von Mises 등가 응력 $\bar{\sigma}$)로 대표되는 응력장(stress field)의 발달 상태와 응력장의 발달 경로(stress path)를 고려하지 못하는 상당히 단순한 파단 모델이지만, 사용의 용이성으로 인하여 조선해양 분야에서 널리 이용되어 왔다.

전술한 바와 같이, 선박과 같이 연성 재료의 파단은 응력장의 발달 정도 및 발달 경로에 의하여 결정되기 때문에, CFS 모델을 사용할 경우 연구자마다 서로 상이한 파단 변형률을 적용한다. 때로는 실험 결과 또는 수치 해석과 일치하는 결과를 얻기 위하여 파단 변형률을 보정하여 사용하여 왔기 때문이다. 이러한 이유에서 폭발에 의한 손상 문제 뿐만 아니라, 손상을 유발하는 대부분의 문제에서 CFS 모델의 적용은 적절하지 않다.

2.2.2 HC-LN 파단 모델

HC 파단 변형률 모델은 파단 변형률을 응력 삼축비와 로드각 (Lode angle)의 함수로 표현한다. 평면 응력 (plane stress)의 문제에서는 로드각은 더이상 파단 변형률을 결정하는 변수가 되지

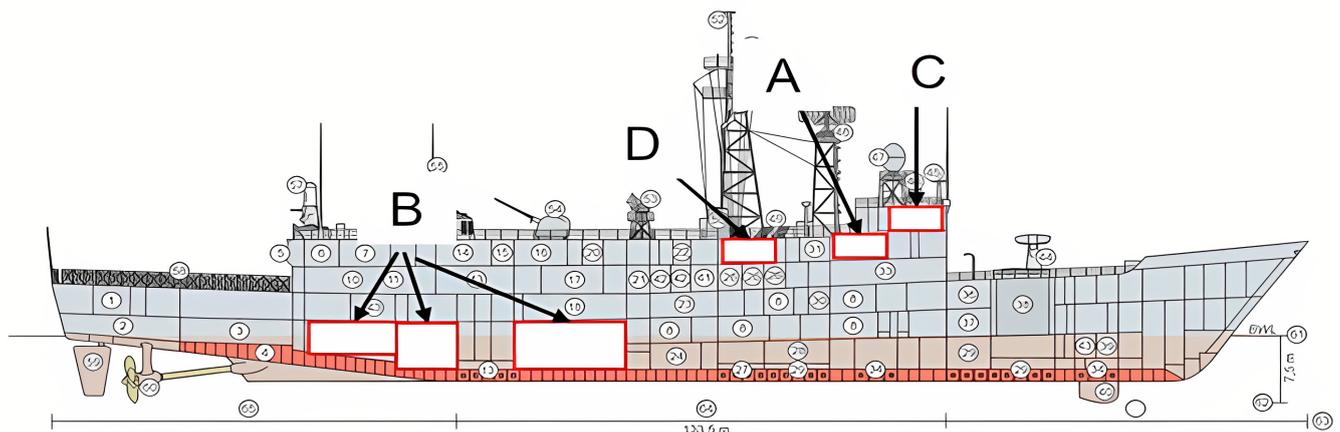


Fig. 3 Poland naval ship (ORP Generał Kazimierz Pułaski)

못하므로, 파단 변형률은 응력 삼축비만의 함수로 표현된다. LN 파단 변형을 모델은 평면 변형을 상태에서 인장을 경험할 경우 파단은 주로 네킹에 의하여 발생한다는 점에 고안되었다. 즉 HC-LN 파단 변형을 모델에서는 압축과 전단 응력이 작용할 경우 HC 파단 변형을 곡선이, 인장이 작용할 경우 LN 파단 변형을 곡선이 선택적으로 사용된다.

비례 응력(non-proportional stress)은 주응력 각도(주각)이 변동하는 응력 상태를 지칭한다. 폭발 하중과 같이 과도한 하중이 작용할 경우, 구조물의 특정 지점의 응력은 압축, 굽힘, 전단, 인장 등이 순차적으로 무작위로 발생하는 비비례 응력 프로세스를 경험할 확률이 매우 높다. 이러한 응력 상태에 상응하는 파단 변형률은 서로 다르기 때문에 파단 지표로서 누적 손상도(accumulated damage)의 개념이 도입되었다. 본 연구에서도 응력 경로 효과를 고려하기 위하여 누적 손상도의 개념이 적용되었다. HC-LN 모델의 상세한 수식 전개는 Park et al. (2020)의 논문을 참고하였다. 또한 상용 유한요소해석 코드가 HC-LN 파단 모델을 아직 지원하지 못하므로, 내부적으로 개발된 사용자 재료 서브루틴을 사용하여 HC-LN 파단 모델을 구현하였다.

3. 내부폭발에 의한 함정의 손상예측

3.1 대상 및 위협 특성

3.1.1 격실 선정

함정의 INCEX에 의한 손상 예측을 위해, 피격 확률이 가장 높은 격실을 정하고, 내부 폭발 위치를 결정하는 과정이 필요하다. 함정의 많은 격실 중에서 전투 정보실, 기관실, 함교, 레이더 및 전투 체계 장비실 등은 그 중요도가 매우 높은 것으로 알려져 있다.

Fig. 3의 전투 정보실 (A)은 전투 상황시 가장 중요한 격실로 지휘소 역할을 담당한다. 주로 함 중앙 또는 피격시 보호가 용이한 위치에 있으며, 전투 체계 및 레이더 관련 콘솔과 핵심 승조원이 위치해 있다.

각 함 마다 전투 정보실의 위치는 비밀로 취급되어 자료를 획득하기가 매우 어렵다. Fig. 3의 기관실 (B)은 주 기관, 발전기 및 각종 펌프류가 집중된 격실이며, 격실의 특성상 수면 하에 위치하고 있다. 주 기관과 발전기 등이 내뿜는 열이 많은 특성상 연돌과 함께 열추적 유도탄에 대한 표적이 되기 쉽다. 함교 (C)는 함의 기동에 관한 지휘 및 제한적 전투 지휘가 가능한 격실로서, 항해 관련 장비가 집중되어있으며, 함장 또는 부함장이 지휘하게 된다. 레이더/전투 체계 장비실 (D)은 각종 항해/탐색/추적 레이더와 유도탄, 함포의 제어 신호를 처리해주는 장비들이 집중된 격실이다. 케이블의 길이 제한 때문에 보통 함 중앙 또는 전투 체계/레이더와 가까운 곳에 위치한다.

본 연구에서는 해석의 대상이 되는 격실을 선정하기 위하여 다음의 세가지 조건이 고려되었다.



Fig. 4 YJ-91



Fig. 5 Exocet

- (a) 피격시 침수 확률이 있는 격실
- (b) 피격시 기동/전투성능에 치명적 손상을 입는 격실
- (c) 피격 확률이 높은 격실

위와 같은 각 격실의 특성을 종합하여, 주기/보기에서 발생하는 고온으로 인하여 적에게 노출될 확률이 높고, 수면 하에 위치하고 있어 피격시 침수될 확률이 있고, 피격시 기동 성능과 정전이 발생하여 기동/전투성능에 치명적일 것으로 예측되는 기관실을 대상 격실로 선정하였다.

3.1.2 TNT 중량

실제 전투 상황에서 가장 높은 확률의 위협을 분석하였다. 중국에서 생산되어 여러 국가에 광범위하게 수출된 것으로 알려져 있는 YJ-91의 탄두 중량은 80kg이며, 최대 110km의 사거리(Dennis, 2014)를 아음속의 속도로 순항할 수 있는 능력이 있다(Fig. 4 참조). 여기서 탄두중량이라 함은 폭발을 발생시키는 폭발물의 무게, 필요한 경우 파편을 발생시키는 쇠구슬 등의 파편, 그리고 이들을 감싸는 케이싱을 모두 포함한 무게이다. 이때 케이싱은 단순히 파편이나 폭발물을 감싸는 역할 뿐만 아니라, 자체적으로도 파편을 발생시키는 용도로 사용되기도 한다. 유도탄 탄두의 파편구조 및 케이싱의 상세한 정보는 각국에서 비밀로 관리되어 입수하기가 까다롭다. 본 연구에서는 문제를 보수적으로 접근하기 위해 탄두중량을 폭발물의 중량으로 간주하였다.

엑조세 유도탄은 프랑스에서 생산되어 전 세계적으로 많이 수출되고 있다(Fig. 5 참조). 탄두 중량은 165kg이며, 최대 사거리는 180km이다. 엑조세 유도탄에는 여러 가지 파생 모델이 있지만, 본 연구에서는 탄두 중량을 165kg로 가정하였다. 중국제 대함 유도탄 C-801의 탄두 중량이 165kg인점으로 감안하면 적절한 가정이다.

마지막으로 극단적인 상황에 대한 구조물의 반응을 알아보기 위하여 500kg의 매우 큰 질량의 탄두에 의한 가상의 위협을 가정하였다. 최종적으로 80kg, 165kg, 500kg의 TNT가 내부 폭발하는 상황을 가정하였다.

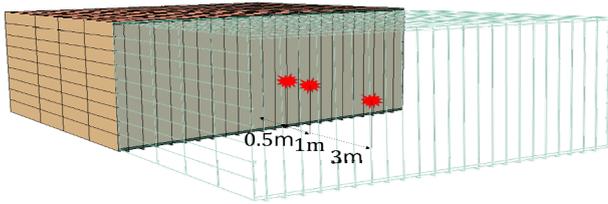


Fig. 6 INCEX locations (0.5m, 1.0m, 3.0m)

3.2 폭발 시뮬레이션 모델링

상용 FAE 소프트웨어인 ABAQUS/Explicit을 사용하여 폭발 시뮬레이션을 수행하였다. 함정에서 기관실의 상대 위치를 고려하여 가장 높은 확률의 피격 및 폭발이 발생할 지점을 분석하였다. 대부분의 함정에서 기관실은 흘수선에 걸쳐 있기 때문에, 함정의 길이 방향에 따라 피격될 가능성이 높으며, 흘수선 상부 기관실이 피격될 가능성이 높다. 이를 감안하여 기관실 길이 방향의 중간을 폭발 위치로 결정하였다. 기관실 수직 종격벽에서 0.5m 및 3.0m 만큼 수평 방향으로 떨어진 지점에서 폭발이 발생한다고 가정하였다. 이를 Fig. 6에 도식화하였다. ABAQUS에서 제공하는 CONWEP을 이용하여 폭발하중을 생성하였다. CONWEP은 폭발점과 하중이 가해질 물체가 정의되면 내장되어있는 함수를 통해 공기 등의 매질에 대한 모델링 없이 구조물에 폭발하중을 생성할 수 있다.

기관실의 치수를 Table 3 및 Fig. 7에 정리하였다. 여기서 커튼 판은 폭발 강화 격벽 설계 방법 중 하나로서, 많은 함정에 적용되고 있다. 격벽의 상부 및 하부 두께를 증가시켜 폭발 하중을 커튼 판이 흡수할 수 있다. Table 3에 제시된 기관실의 치수는 참고문헌(Kim, 2015)으로부터 결정되었다.

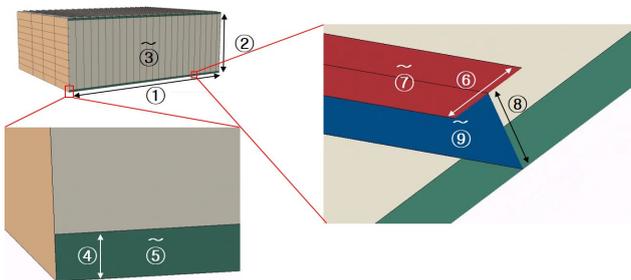


Fig. 7 Design variables

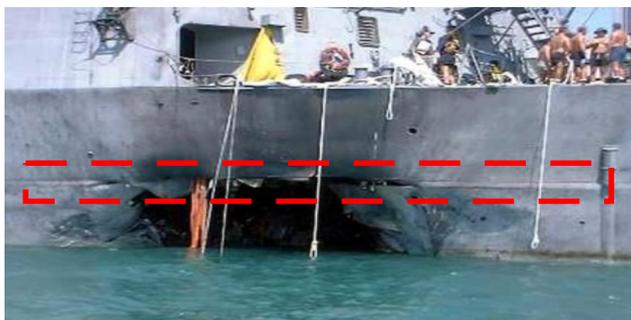


Fig. 8 Damage of USS cole

Table 3 Selected design variables

Num	Variable	Value (mm)
①	Compartment width	14,000
②	Compartment height	5,500
③	Bulkhead thickness	6
④	Curtain plate thickness	10
⑤	Curtain plate height	300
⑥	Stiffener flange length	125
⑦	Stiffener flange thickness	6
⑧	Stiffener web length	125
⑨	Stiffener web thickness	9
⑩	Stiffener spacing	740

요소 크기는 손상 범위를 결정하는데 매우 중요한 변수이다. HC-LN 파단 변형률 모델을 적용할 경우, 너무 작은 요소는 실제보다 조기에 파단을 유발하는 것으로 알려져 있다. HC-LN 파단 변형률 모델을 적용할 경우, 두께의 5~10배 요소 크기를 적용할 것을 권장한다 (Cerik et al., 2019). 본 연구에서는 두께의 10배를 공칭 요소 크기로 사용하였다. 격벽단(bulkhead edges)이 완전 구속되었다고 가정하였다. 이는 USS Cole 피격 후 파단 형상으로부터 비교적 타당한 가정임을 확인할 수 있다. 즉 Fig. 8에 보인 바와 같이, 격벽 예지는 상당히 견고하게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 이를 종합하여 Table 4에 모델링 정보를 제시하였다. 기관실의 피격 가능성이 가장 높았기 때문에 기관실 1개 구획을 해석 대상으로 결정하였다. 본 연구에서는 피격시 위협이 함정의 선체 외판을 관통하여 함정 내부에서 폭발하는 상황을 가정하였다. 따라서 해석의 주 대상은 기관실 간 설치되어있는 폭발 강화격벽이다. 이때 폭발에 의한 파편 효과는 고려되지 않았다. 위협과 구획의 크기를 분석하여 폭발물의 하중과 폭발 위치(source point)를 결정하였다. Table 4에 모델링 정보를 제시하였다.

Table 4 Modeling information

Material	AH36	
Elements	Mesh size	Approx. 100mm ²
	Type	S4R, S3R
	Amount	93,989(S4R) / 819(S3R)
Load condition	Distance from wall	0.5m, 1m, 3m
	TNT mass	80kg, 165kg, 500kg
Boundary condition	<p>Fully fixed</p>	

3.3 폭발 시뮬레이션 결과

폭발 위치가 격벽과 가장 가까울 경우 (0.5m 이격), 고려한 모든 폭약 질량에서 격벽에 파단이 발생하였다. 이는 구형 충격 파가 확장되기 전에 구조물에 입사하면서 큰 압력이 전달되었기 때문으로 추정된다(Table 5 참조). 폭발 위치가 1.0m로 늘어날 경우, 80kg의 폭약만으로는 격벽에 파단이 발생하지 않았다. 반면 이격 거리가 3.0m로 늘어날 경우 격벽과 커튼 판의 경계부에 높은 소성 변형률이 발달하였다. 폭약 질량이 500kg일 경우 이 경계부를 따라 파단이 발생하였다. 즉, 폭약 질량이 500kg일 경우 이격 거리에 관계없이 파단이 발생하였지만, 이격 거리에 따른 파단의 형상은 크게 차이가 있었다.

INCEX 케이스별 손상의 크기를 Table 6에 정리하였다. 500kg의 폭약이 0.5m의 이격 거리에서 폭발할 경우 2.01m²의 가장 큰 손상이 발생하였으며, 이격 거리가 3.0m로 늘어나더라도 상당히 큰 손상 (1.91m²)이 발생하였다.

500kg 폭약이 근거리 (0.5m)에서 폭발할 경우, 격벽의 손상이 중앙 원형에서 상하 커튼판까지 확장되었다. 반면 500kg 폭약이 원거리(3.0m)에서 폭발할 경우, 비교적 근거리 폭발이었던 0.5m와 이보다 떨어진 1m의 경우, 격벽의 손상은 발생하지 않고 커튼판의 경계부를 따라 손상이 발생하였다. 즉, 손상 면적은 서로 유사(0.04m² 차이)하였으나, 손상의 양상은 이격 거리에 따라 서로 달랐다.

파공의 형태 및 크기를 분석한 결과, 폭약이 500kg보다 작고 근거리 폭발이 아니라면, 조속한 보수 및 침수 방지가 가능하여 전투 능력을 빠르게 회복할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 500kg 이상의 위협에 피격당하거나 또는 매우 근거리 폭발이라면, 피격 구획에 빠른 침수에 의하여 보수가 어렵고 조기에 회복하기가 어려울 것으로 예상된다. 즉, 빠른 침수 중 손상된 구획의 수리가 매우 어렵고 위험하므로, 구획 폐쇄로 이어질 가능성이 높으며, 함정의 기동 능력에 큰 영향을 줄 수 있다.

4. 결론

간이식 기반의 CONWEP 모델을 이용하여 INCEX 하중을 구현하였다. 또한 박판 강재로 건조된 함정의 손상 정도를 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 알려진 HC-LN 모델을 사용하였다. 함정의 폭발 대상 격실을 선정하기 위하여 피격 확률, 침수 확률, 기동/전투 성능 상실도의 세가지 조건을 적용한 결과 주기 관실을 INCEX 시뮬레이션을 위한 격실로 선정하였다. 위협의 특성을 분석하여 세 가지 TNT 질량과 세 가지 이격 거리를 고려하여 INCEX 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과 폭약의 질량이 손상의 크기를 지배하는 가장 중요한 인자임을 확인하였다.

제시한 여러 시나리오의 해석 결과는 폭발에 의한 손상 예측 및 평가에 있어 참고 자료로 활용 가능하다. 예를 들어 설계단계에서 선정된 위협에 따라 격벽의 두께를 정할 수 있다. 또한 파공 형상에 기반하여 보편이나 보강용 지주와 같은 다양한 보수

Table 5 Damage view by INCEX case

		Distance (m)		
		0.5	1.0	3.0
TNT(kg)	80			
	165			
	500			

Table 6 Damage area by INCEX cases

		Distance (m)		
		0.5	1.0	3.0
TNT mass (kg)	80	0.84m ²	No fracture	No fracture
	165	1.93m ²	1.21m ²	No fracture
	500	2.01m ²	1.95m ²	1.91m ²

장구의 연구에 활용될 수 있다.

향후 연구로서 좀 더 다양한 격실 및 다양한 INCEX 시나리오를 대상으로 구조 손상도 및 승조원 전투 능력을 평가할 필요가 있다. 손상 범위를 예측할 수 있는 기계 학습 모델의 개발이 향후 연구로서 요구된다. 커튼 판을 사용할 경우 격벽과 커튼 판 사이의 찢김 현상으로 인하여 향후에는 손상을 정의하는 기준 또는 방법이 정립되어야 한다. CONWEP 모델은 계산 시간을 혁신적으로 단축하지만, 적의 타격 후 승조원의 전투 능력을 좀 더 정확히 평가할 필요가 있다. 이를 위하여 첫째, 인접 격실 및 피격 격실 내부에 승조원 인체 더미(dummy)를 모델링하여 폭발 파편으로부터의 상해 가능성을 확인할 필요가 있다. 둘째 가속도에 대한 의사 속도 충격 응답 스펙트럼(pseudo-velocity shock response spectrum) 분석을 통하여 승조원의 내충격 안전도를 평가할 필요가 있다.

후기

이 연구는 해양수산부가 지원하는 한국해양과학기술진흥원(KIMST)의 해양수산기술개발사업(No. 202202103)과 산업통상자원부가 지원하는 한국에너지기술평가원의 에너지기술기획사업(No. 20213000000030)의 지원을 받아 수행되었음.

References

Cerik, B.C., Ringsberg, J.W. and Choung, J. 2019. Revisiting MARSTRUCT benchmark study on sideshell collision with a combined localized necking and stressstate dependent ductile fracture model. *Ocean Engineering*, 187, 106173.

- Cerminara, J. and Kotacka, R.O., 1990. Ship service electrical systems: designing for survivability, *Naval Engineers Journal*, 102(5), pp.32–36.
- Dennis, M. Gormley, Andrew, S. Erickson, and Jingdong Yuan, *A low-visibility force multiplier—assessing China’s cruise missile ambitions*, NDU Press, 2014.
- Erdik, A. and Uçar, V. 2018. On evaluation and comparison of blast loading methods used in numerical simulations. *Sakarya University Journal of Science*, 22(5) pp.1385–1391.
- Jung, S.K., Roh, M.I. and Kim, K.S. 2018. Arrangement method of a naval surface ship considering stability, operability, and survivability. *Ocean Engineering*, 187, pp.316–333.
- Kim, S.H. 2015. Development of Blast Hardened Bulkheads with Attached Aluminum Foam. *Division of Ocean Systems Engineering*, 90.
- Kim, K. 2021. Engagement–Scenario–Based Decoy–Effect Simulation Against an Anti–ship Missile Considering Radar Cross Section and Evasive Maneuvers of Naval Ships. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(3), pp.238–246.
- Kim, H. and Choung, J. 2022. Shock–Resistance Responses of Frigate Equipments by Underwater Explosion. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(3), pp.161–167.
- Kim, K.S., Hwang, S.Y. and Lee, J.H. 2014. Naval ship’s susceptibility assessment by the probabilistic density function. *Journal of Computational Design and Engineering*, 1(4), pp. 266–271.
- Kim, J.H. and Park, M.G. 2003. A Study of Survivability Improvement Method for Naval Ships’ Design I–Design Method Considering Box Girder. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 27(2), pp.199–207.
- Kingery, C. and Bulmarsh, G. 1984. *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Technical report A RBRL–TR–02555.
- Kok, S.L.Y. 2012. *Naval Survivability and Susptibility Reduction Study—Surface Ship*.
- Nho, I.S., Park, M.J. and Cho, Y.S. 2018. 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.
- Park, S.J., Cerik, B.C. and Choung, J. 2020. Comparative study on ductile fracture prediction of high-tensile strength marine structural steels. *Ships and Offshore Structures*. 15, pp.208–219.
- Park, S.J., Lee, K., Cerik, B.C., Kim, Y. and Choung, J. 2019. Ductile Fracture of a Marine Structural Steel based on HC–DSSE Combined Fracture Strain Formulation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(1), pp.82–93.
- Sriram, R., Vaidya, U.K. and Kim, J.E. 2006. Blast impact response of aluminum foam sandwich composites. *Journal of Materials Science*, 41, pp.4023–4039.
- USACE. 1986. TM 5–855–1: *Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects*. Technical report.
- Vannucci, P., Masi, F. and Stefanou, I. 2017. A study on the simulation of blast actions on a monument structure. URL: <https://hal.science/hal01447783v3/document> [Accessed 10 February 2023].
- Williams, K., McClennan, S., Durocher, R., Benoit, S.J. and Jocelyn, T. 2002. *Validation of a loading model for simulating blast mine effects on armoured vehicles*. 7th International LS–DYNA Users Conference, Detroit, United States. 192–193. 2002 May, pp.35–44.
- Yi, Z., Agrawal, A.K., Ettouney, M. and Alampalli, S. 2014. Blast load effects on highway bridges. I: Modeling and blast load effects. *Journal of Bridge Engineering*, 19(4), 04013023.
- Yun, K.J. and Yoo, Y.H. 2016. Numerical analysis of the sub scale blast door deformation and the subsequent blast wave propagation through the tunnel by the external explosion. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 19(4), pp.462–468.

