

취약면적 기반의 함정 취약성 간이 평가 방법에 관한 연구

김광식¹·이장현^{2,†}·황세윤¹
인하대학교 대학원 조선해양공학과¹
인하대학교 조선해양공학과²

Simplified Vulnerability Assessment Procedure for the Warship Based on the Vulnerable Area Approach

Kwang-Sik Kim¹·Jang-Hyun Lee^{2,†}·Se-Yun Hwang¹
Graduate school, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University²

Abstract

It is important to assess and improve the warship survivability for the weapon threats which have a critical effect on warship. The survivability of the warship is defined as the capability of a warship to avoid or withstand a man-made hostile environment. The survivability of the warship consists of three categories (Susceptibility, Vulnerability and Recoverability). Firstly, the susceptibility is defined as the inability of a warship to avoid radars, guns, missiles and etc. Secondly, the vulnerability is defined as the inability of a warship to withstand the man-made hostile environment. Finally, the recoverability is defined as the ability of a warship to recover the damaged components and systems. Among them, this paper has described the vulnerability assessment for the hypothetical system which is composed of critical components. Also, the procedure which is suggested to calculate the vulnerable probability of the damaged warship is based on the Vulnerable Area Method.

Keywords : Survivability(생존성), Vulnerability(취약성), FMEA(Failure Mode and Effect Analysis, 고장모드분석), Vulnerable area(취약면적)

1. 서론

1.1 연구 배경

현대의 전장 환경은 효과도(Effectiveness)가 큰 무기의 등장에 따라 전투 환경에 놓인 함정의 치명도(Lethality)가 상승할 위험과 생존성(Survivability)이 저하될 수 있게 되었다. 이러한 이유로 무장 체계의 성능을 향상시키는 데 중점을 맞추었던 기존의 함정 설계 전략은 최근 들어 통합 생존성을 향상시키는 방향으로 변화하고 있다.

함정의 생존성은 전투 환경에서 함정이 마주치게 되는 위협 요소에 대응하여 견딜 수 있는 능력을 뜻한다(Ball, 1985). 함정의 생존성은 크게 피격성(Susceptibility), 취약성(Vulnerability), 회복성(Recoverability)과 같은 세 가지 구성 요소로 나누어 정량적/정성적인 지표로서 평가한다(Ball, 1985). 피격성은 전투 환경에서 함정이 위협에 노출되는 정도를 의미하고, 취약성은 피격 시 함정의 기능과 임무 수행 능력을 상실할 가능성을 나타낸다.

그리고 회복성은 피격 후 손상된 함정이 주어진 임무와 기능을 회복할 수 있는 능력을 나타낸다. 피격성은 함정의 RCS(Raidier Cross Section) 성능(Kim, et al., 2009), EMI/EMC 성능, 방사 소음 성능, 적외선 성능을 종합하여 평가하여야 하며, 현재 이와 같은 피격성 평가 요소에 대한 개별 연구 사례는 상당수 보고되고 있다(Cho, 2009).

함정의 생존성 평가를 위한 이론적 접근 방법으로는 Ball(2003)이 항공기 생존성 평가를 위해 제시한 방법이 현재로서 가장 체계적으로 정립된 방법으로 알려져 있다(Driels, 2004). 특히, Ball(1985)이 제안한 방법은 미국 해군의 함정 생존성 향상을 위한 이론적 배경을 제공하고 있다(Ball & Calvano, 1994).

이미 국외의 해군에서는 자국의 함정 설계 과정에 생존성 평가 과정을 도입하였거나 현재 추가적인 개발을 진행하고 있다(Choi, et al., 2009). SURVIVE™(영국, QinetiQ社), MOTISS™(미국, Alion Science & Technology社), AVAL™(스웨덴, FOI社)과 같은 상용 소프트웨어는 각각 생존성, 취약성 및 회복성, 취약성 및 회복성 평가 과정에 적용되고 있다.

국내의 상황을 살펴보면 함정 설계 과정에 피격성 감소 (Park, 2006), 수중 폭발 무기에 의한 취약성 해석과 같은 요소 기술 측면에서 회복성 평가의 일부분을 수행하고 있다 (Chung, 2007). 또한 최근에는 일부 함정 획득사업 과정에 국외의 생존성 분석 프로그램 전문 기관에 의뢰하여 함정 취약성을 중심으로 생존성을 평가를 수행하는 등 개별적인 연구가 진행되고 있다 (Chung & Kwon, 2008). 그러나 아직은 통합적 생존성 분석에 필요한 기본 이론 및 체계적인 방법론 정립은 미약한 것으로 판단된다.

본 논문은 함정 생존성 평가를 위한 첫 단계로서 취약성 평가 방법과 절차를 제시하고자 한다. 취약성 평가 방법으로는 구성품의 취약면적 기반의 평가 절차를 제시하였다. 제시된 평가 방법과 절차를 이용하여 주요 위협 무기 체계의 특성에 따른 취약성 확률을 계산하는 절차 및 예제를 제시하고자 한다.

1.2 관련 연구 및 적용 모델

함정의 취약성을 평가하는 가장 정확한 방법은 실선시험 (LFT&E: Live Fire Testing and Evaluation)이다. LFT&E는 실제 선박을 대상으로 실험을 수행하기 때문에 많은 비용과 시간이 소모되지만 전투 환경에서 발생 가능한 손상을 평가 할 수 있는 정확한 방법이다. 이론적 생존성 평가 방법은 함정 설계 단계에서 생존성 향상 정도와 취약성 변화를 정량적으로 평가할 수 있도록 한다. 함정의 생존성 평가를 위한 방안은 Ball (2003)이 제안한 항공기 생존성 평가를 위한 방법이 현재로서는 가장 체계적으로 정립된 방법으로 알려져 있다. Ball & Calvano (1993)과 Ball (2003)이 제안한 방법은 미국 해군의 함정 통합 생존성 평가를 위한 이론적 배경을 제공하고 있다. 국내에서는 2009년부터 한국 기계연구원은 상용 프로그램인 MOTISS를 이용한 함정의 생존성 평가 연구를 수행하고 있으나, 생존성 평가에 필요한 기초 이론은 아직 정립되고 있지 않은 상황이다. JTCG/AS(Joint Technical Coordinating Group on Aircraft Survivability) (2001)에서 제시한 “AEROSPACE SYSTEMS SURVIVABILITY HANDBOOK SERIES”의 Volume 5는 항공기 생존성 평가 모델에 대하여 설명하고 있으나, 평가를 위한 기술적인 내용은 공개되어 있지 않다.

현재로서는 함정 취약성 해석을 위한 체계적인 절차는 Ball (2003)에서 제시한 항공기 생존성 평가 모델과 Driels (2004)의 무기 효과도 분석 모델에 가장 상세하게 제시되어 있는 것으로 파악되었다. Yang, et al. (2009)은 항공기 취약성 평가에 취약 면적 이론을 적용하여 항공기를 겹침 요소 (Overlapping Components)로 모델링한 후에 다발 관통탄(Multiple-hit)에 의한 취약성 평가를 수행하였다. 이 연구도 이론적 기반은 Ball (2003)이 제시한 취약 면적 방법으로 판단된다.

본 연구에서 제시하는 함정의 취약성 평가 절차와 모델의 이론적인 배경은 Ball & Calvano (1993)이 제안한 함정 생존성 정의와 Ball (2003)의 함정 구성품의 취약면적을 기반으로 취약성

계산 방법에 기반을 두고 있다. Ball이 제안한 취약성 평가 절차 이론을 바탕으로 함정의 취약성을 평가 절차 및 예제를 제시하고자 한다.

2. 함정 취약성 평가 순서

2.1 생존성 및 취약성의 확률 정의

함정의 생존성은 적대적 환경을 견디거나 회피할 수 있는 능력으로 정의되며 취약성은 피격 시 위협무기의 영향에 대하여 견디는 능력이 부족한 정도를 나타낸다. 따라서 취약성을 감소시키는 것은 위협무기에 의한 손상의 가능성을 줄인다는 것을 의미하고 이는 곧 생존성의 향상을 의미하기도 한다 (Lim, 2006). 일반적으로 생존성은 다음과 같은 확률 값으로 계산한다.

- Susceptibility = P_H
- Vulnerability = $P_{K/H}$
- Killability = $P_K = P_H \cdot P_{K/H}$
- Survivability = $P_s = 1 - P_K$

여기서, Killability(치사율)는 공격에 의하여 기능을 상실하는 확률을 의미한다. 생존성을 구성하는 확률 값을 좀더 상세하게 표현하면 Fig. 1과 같다.

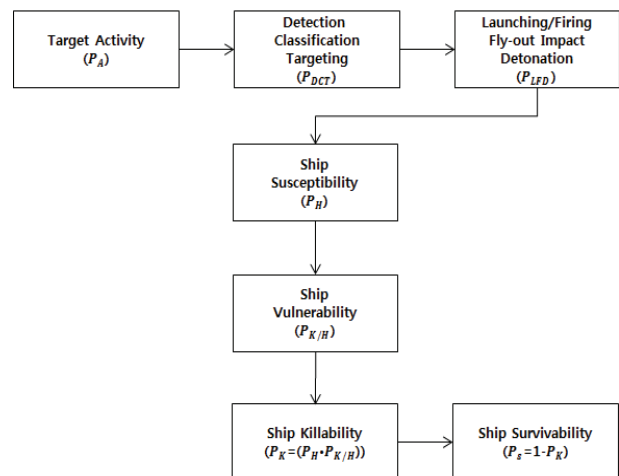


Fig. 1 The probabilities of survivability assessment (Ball & Calvano, 1993)

여기서, P_A , P_{DCT} , P_{LFD} 는 각각 위협 무기가 활성화 될 확률, 적이 아함을 인지 및 분류하여 공격 목표로 삼을 확률, 그리고 적의 무기가 발사되어 효과를 발휘할 확률을 의미한다. 따라서 $P_{K/H}$ 는 취약 확률을 의미하며, 이는 피격당하는 상황을 가정한 조건부 치사도 확률을 의미한다. 본 연구에서는 $P_{K/H}$ 을 계산하기 위한 절차에 국한하여 기술하고자 한다.

2.2 함정 취약성 평가의 사전 절차

함정의 취약성을 파악하기 위해서는 위협무기 정의, 임무를 수행에 필요한 함정 구성품, 그리고 위협 무기 별 구성품의 취약확률 등을 먼저 정의하여야 한다. 이를 간략하게 정리하면 Fig. 2와 같다. 함정 취약성 평가 절차는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. ① 함정이 가지는 임무와 더불어 발생 가능한 위협 무기 체계에 대한 분석을 수행하고, ② 위협에 대상이 되는 함정을 구성하는 시스템 및 구성품을 정립한 다음에, ③ 취약성 확률 계산을 수행한다. 이 과정에서 치사 유형(Kill Type), 위협 무기 별로 피격에 따른 구성품의 손상 구조 분석 (Fault Tree Analysis) 및 FMEA(Failure Model & Effect Analysis) 등을 수행하여 주요(Critical) 구성품을 선정하여야 한다. 선정된 위협 무기와 각 구성품의 기하학적 특징과 취약 확률을 이용하여 최종적인 함정 취약 확률을 구한다.

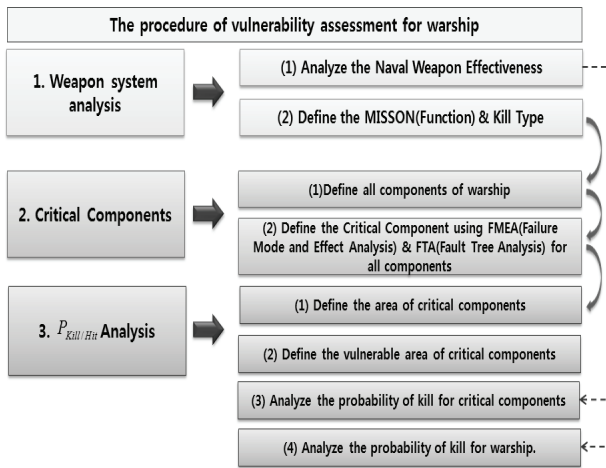


Fig. 2 Macro procedure of vulnerability assessment

위협 무기는 각각의 효과도 및 파괴 특성, 탄두 특성 등을 고려하여 분류한 다음 적용하였다. 본 논문에서는 위협 무기체계 중 수중무기를 제외한 해상 위협무기를 대상으로 Fig. 3의 우측에 보인 것과 같이 네 가지 유형만을 고려하였다.

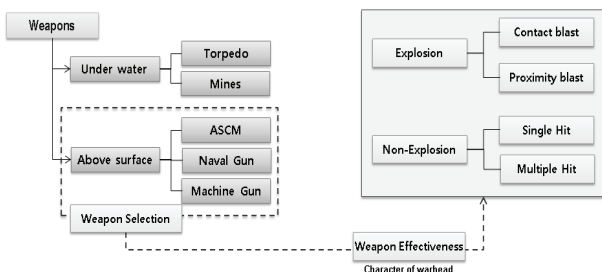


Fig. 3 Category of weapon system and threat

주요 구성품(Critical Component)은 FMEA와 FTA를 통해 얻어진 분석 자료를 이용하여 임무(Mission) 수행에 직접 영향을 미칠 수 있는 함정 내 장비 및 시스템 중에서 선정하여야 한다. 따라서 주요 구성품은 피격에 의한 손상 때문에 상실하는 임무

상실 등급(Kill Level)과 관련된 장비 및 시스템을 정해야 한다. 본 연구에서는 추진기, 엔진, 변속기, 연료 탱크 등이 항해 임무 상 실과 관련된 주요 구성품이라고 가정하였다. Kill Level, FTA, FMEA 및 주요 구성품 선정과정은 별도로 좀 더 상세한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2.3 취약 확률 분석 절차 및 방법

피격(Hit) 후 발생하는 손상(Damage)에 대한 취약 확률을 계산하는 주요 순서는 Fig. 2에 간략하게 요약하였다. 해상 위협 무기의 탄두 특성을 고려하고 주요구성품의 취약 확률과 구성품의 위치 특성을 반영하여 계산하는 각 순서는 Table 1에 다시 정리하였다.

Table 1 Procedure of vulnerability assessment

Procedure	INPUT	OUTPUT
(1) Define all components of warship	Form of critical component	Area of critical component
(2) Define the Vulnerable area for critical components	Area of critical component	The Vulnerable area for critical components
(3) Analyze the probability of kill for critical components	The Vulnerable area for critical components	The probability of kill for critical components
(4) Analyze the probability of kill for warship	Weapon effectiveness and The probability of kill for critical components	Analyze the probability of kill for warship

(1) 주요 구성품 단순화: 선정된 주요 구성품의 3차원 형상으로부터 피격 면적을 구한다. 여기서 취약 확률은 함정 부품 및 시스템을 엄밀한 3차원 형상으로 가정하는 것이 아니라 단순화된 형상으로 가정하는 과정에서 구한 값이라는 점을 감안하여야 한다. 이러한 이유로 MOTISS™는 구성품의 형상 모델링 기법으로 AABB (Axis Aligned Bounding Box)을 선택하였으며, Survive™도 단순한 직사각형 형태로 구성품을 모델링하고 있다 (Chung & Kwon, 2008). 본 논문에서도 구성품 본래의 면적만을 고려하여 2차원 직사각형으로 가정하였다.

(2) 주요 구성품 취약면적 (Vulnerable Area, A_{vi}) 결정: 구성품의 취약면적은 가장 핵심적인 값이다. 취약면적은 실제 전투의 손상 결과로부터 구한 데이터를 바탕으로 선정하여야 한다. 즉 손상 결과를 실측한 후에 특정 위협에 대한 취약면적을 계

산하여야 한다. 또한 각 위협 무기 별로 반복적인 LFT(Live Fire Test)를 통해 위협 무기와 함정의 충돌 속도, 충돌 면 등의 함수로 취약면적을 정의하여야 한다. 하지만 실증적이고 정확한 취약면적에 대한 정보가 부족하기 때문에 현재로서는 각 구성품의 취약면적에 대한 실제 정보를 획득하기 어려운 상황이다. 본 연구에서 임의로 구성품 면적(A_{pi})의 약 80%를 취약면적(A_{vi})로 가정하였다. 이는 향후 별도의 연구를 통해 지속적으로 축적해야할 핵심 데이터로 판단된다. Fig. 4는 가정된 주요 구성품의 면적과 취약 면적을 그림으로 표현한 것이다.

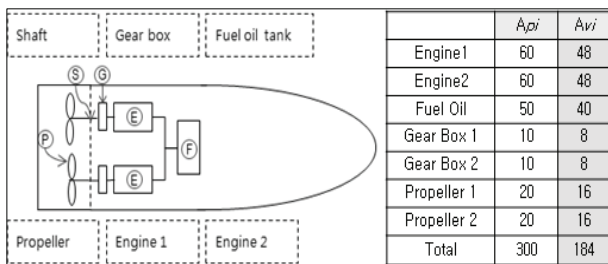


Fig. 4 Example of critical components of propulsion system assumed for movement kill

(3) 구성품 취약확률(Probability of Kill, $P_{k_i/hi}$) 산출: 구성품의 취약확률은 식 (1)에 보인 것과 같이 구성품의 취약 면적 비율로 정의하였다. 이는 피격 후 i번째 구성품의 취약확률을 구하는 간략 식이다. Table 2에 취약확률 계산에 필요한 변수들을 정의하였다.

$$P_{k_i/hi} = A_{vi}/A_{pi} \tag{1}$$

Table 2 Variable for vulnerability assessment

Definition	Component (i th)	Warship
The probability of kill for i_th components(i_th components hit)	$P_{k_i/hi}$	$P_{K/H}$
The probability of kill for i_th components(j_th components hit)	P_{k_i/h_j}	-
The probability of hit for i_th components(Random hit)	$P_{hi/H}$	-
The probability of kill for i_th components(Random hit)	$P_{ki/H}$	-
The probability of survival for i_th components(i_th components hit)	$P_{si/H}$	$P_{S/H}$
The vulnerable area for i_th components(or warship)	A_{vi}	A_v
The area of i_th component(or warship)	A_{pi}	A_p

(4) 함정 취약 확률 계산(Probability of Total Kill, $P_{K/H}$): 함정의 취약확률은 ①위협무기의 효과 특성, ②구성품의 잉여(redundancy) 특성, 그리고 ③구성품 위치에 따른 겹침(overlap)특성을 고려한 후 구성품의 취약면적을 적용하여 계산한다. Table 3은 잉여 특성과 겹침 특성의 종류를 나열한 것이다. 위협의 방향과 구성품의 겹침 양상, 잉여재 존재 여부에 따라 취약성이 변화하는 것은 이후 뒷장에서 예제로서 설명하고자 한다.

Table 3 The attributes of critical components in view of overlap and redundancy

Overlap	Non-redundant Components
	Redundant Components
Non-overlap	Non-redundant Components
	Redundant Components

3. 취약성 평가 예

본 장에서는 효과도 특성에 따라 분류된 위협 무기와 구성품의 겹침 특성 및 잉여 특성에 따른 취약성 평가 절차와 예제를 제시하였다. 취약성 평가 방법은 Fig. 2 및 Table 1에 설명한 것을 이용하였다. 예제로 사용한 함정 주요 구성품은 Fig. 4에 제시한 추진 시스템으로 정하였다. 겹침 효과와 잉여 특성은 다음과 같은 가정에 따라 반영하였다.

(1) 구성품의 겹침(Overlap)

피격을 받는 부품 또는 장비들의 위치가 겹침으로 인해 파괴 효과가 줄어든다. 따라서 겹침으로 인한 면적은 취약 면적에서 제거하는 방법으로 취약성을 감소시켰다.

(2) 잉여 (Redundancy) 특성

잉여 특성은 동일한 기능을 수행하는 장비 또는 부품이 존재하는 것을 의미한다. 따라서 둘 이상의 동일한 장비가 존재할 경우에는 취약성이 감소하고 생존확률이 증가하는 특성을 반영하였다.

(3) 위협 무기 별 취약성 평가 방법

Table 4는 각 위협 무기 종류 별로 적용한 취약성 평가 방법을 정리한 것이다. 예를 들어 비폭발성(Non-Explosive) 다중 피격(Multiple Hit)의 효과를 가진 무기에 의한 취약성 평가는 Binomial, Poisson, Markov Chain, 또는 Tree-diagram 방법을 적용하였다 (Ball, 2003).

앞서 설명한 위협 무기 효과도 특성, 겹침 특성, 잉여 특성 별로 취약 확률을 구한 예는 다음과 같다.

Table 4 Vulnerability assessment methods according to the threat type

Weapon system (Threat Effectiveness)		Based on the Vulnerable Area Method
Explosion	Contact blast	Point blast approach
	Proximity blast	Fragment and penetrator
Non-Explosion (penetration)	Single Hit	Vulnerable area
	Multiple Hit	Binomial Poisson Tree-diagram Markov chain

3.1 비 폭발성 관통 탄(Single Hit)에 의한 취약확률

본 절에서는 비 폭발성 관통 탄 및 파편에 의한 단일 피격 시 취약확률 계산 과정을 설명하고자 한다.

3.1.1 Non-Overlap, Non-redundant 구성품의 취약성 평가

Overlap 현상이 없는 Non-redundant 구성품 만을 가진 시스템에서의 취약확률은 독립적인 기능을 가지고 중복되지 않는 위치에 배치된 N개의 주요 구성품들로 이루어진 시스템의 취약확률 계산을 의미한다. 이 시스템의 취약성은 각각 구성품의 손상 시스템의 기능 손상에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 각각의 구성품은 상호간에 배타적이게 된다. 따라서 취약 확률은 전체 면적과 취약면적의 비로 나타낼 수 있으므로 시스템 전체에 대한 Non-redundant 구성품들의 취약확률은 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다. 예를 들어 Table 5와 같은 Non-redundant 구성품을 가진 추진 시스템의 비 폭발성 관통 탄의 단일 피격에 대한 시스템 취약확률을 구하면 식 (3)과 같다.

$$P_{Ki} = \frac{A_{Vi}}{\sum_{i=1}^n A_{Pi}} \tag{2}$$

Table 5 The probability of Kill for propulsion system (Non-redundant and Non-Overlap)

	A_{Pi} (m ²)	A_{Vi} (m ²)	P_{ki/h_i}	$P_{ki/H}$
Engine	60	48	0.8	0.16
Fuel Oil Tank	50	40		0.133
Gear Box	10	8		0.027
Propeller	20	16		0.053
The rest	160	-		-
Total	300	112	-	0.373

$$\begin{aligned} P_{K/H} &= P_{Ke/H} + P_{Ke/H} + P_{Ke/H} + P_{Ke/H} + P_{Ke/H} \tag{3} \\ &= 0.16 + 0.166 + 0.027 + 0.053 \\ &= 0.373 \end{aligned}$$

식 (3)에서 모든 구성품들이 Non-redundant 구성품 이므로, 단발 피격에 대한 시스템의 취약확률은 약 37.3%로 계산되었다.

3.1.2 Overlap, Non-redundant 구성품의 취약성 평가

만약 2개 이상의 구성품이 Overlap 되었을 때의 취약확률은 Overlap된 면적을 고려하여 가감 시켜야한다.

예를 들어 엔진과 연료탱크가 서로 10m²의 면적이 Overlap 되어 있다면 이들 구성품에 대한 면적은 각각 50m², 40m²로 감소 된다. 감소된 취약 면적을 토대로 식(4)와 식(5)를 이용하여 Overlap 공간의 취약면적을 계산한다.

$$P_{ko/h_o} = 1 - \prod_{i=1}^c (1 - P_{ki/h_o}) \tag{4}$$

$$A_{vo} = A_{po} P_{ko/h_o} \tag{5}$$

그러나, 실제로 Overlap 공간이 관통되면 2차 위험이 발생하는 경우가 존재하게 된다. 앞의 예시에서도 마찬가지로 관통 시 기름이 누출되고 엔진열 등에 의해 내부 화재 및 폭발 등의 2차 위험이 존재하게 된다. 따라서 실제 엔진의 취약확률은 엔진 취약확률에 연료탱크의 취약확률을 더하여 이를 전체 취약확률 계산에 반영하여야 한다. 식 (6)과 식 (7)은 2차 위험을 고려한 Overlap 공간의 취약확률 및 취약면적 계산의 예이다. 그리고 Table 6에서는 Overlap 구성품 구성 시 시스템 취약확률을 계산한 예이다. 여기서 앞의 주요 구성품의 Non-Overlap 구성에 대한 시스템 취약확률과 비교했을 때 주요 구성품의 Overlap 구성 시 취약확률이 37.3%에서 35.0%로 감소하는 것을 파악할 수 있다.

$$P_{ko/h_o} = 1 - (1 - 0.8)(1 - 0.64) = 0.928 \tag{6}$$

$$A_{vo} = 10 \times 0.928 = 9.28 \tag{7}$$

Table 6 The probability of Kill for propulsion system (Non-redundant and Overlap)

	A_{Pi} (m ²)	A_{Vi} (m ²)	P_{ki/h_i}	$P_{ki/H}$
Engine	60-10=50	40	0.8	0.133
Fuel Oil Tank	50-10=40	32		0.106
Gear Box	10	8		0.027
Propeller	20	16		0.053
Area (overlap)	10	9.28		0.928
Total	300	105.28	-	0.35

3.1.3 Non-Overlap, Redundant 구성품의 취약성 평가

본 절에서는 Redundancy를 가진 장비가 비겹침(Non-Overlap)으로 존재하는 시스템의 취약확률 계산과정을 설명하고자 한다. 단, 단발 피격에 대하여 취약확률을 계산하므로 추진 시스템의 손상이 발생하는 요인으로는 Non-redundant 구성품인 연료탱크와 기어박스 그리고 프로펠러의 손상으로 정의할 수 있다. 따라서 Table 7와 식 (8)에서 확인할 수 있듯이 단일 피격에 대해서는 Redundant 구성의 엔진은 시스템 손상에 직접적으로 관여하지 않기 때문에 시스템 취약확률 계산 시 엔진의 취약확률은 포함되지 않는다.

$$\begin{aligned}
 P_{K/H} &= \sum_{i=1}^n P_{k_i/h_i} \quad (8) \\
 &= \sum_{i=1}^n \frac{A_{v_i}}{A_{total}} (\text{except Redundant}) \\
 &= P_{kf/h} + P_{kg/h} + P_{kp/h} \\
 &= 0.133 + 0.027 + 0.053 = 0.213
 \end{aligned}$$

Table 7 The probability of Kill for propulsion system (Redundant and Non-Overlap)

	A_{P_i} (m ²)	A_{V_i} (m ²)	P_{k_i/h_i}	$P_{k_i/H}$
Engine 1	60	48	0.8	0.16
Engine 2	60	48		0.16
Fuel OilTank	50	40		0.133
Gear Box	10	8		0.027
Propeller	20	16		0.053
The rest	160	-		-
Total	300	(160-96)=64		0.533-0.32=0.213

식 (8)과 Table 7에서 확인할 수 있듯이 취약 확률은 21.3%로 계산되었다. 이를 Non-redundant, Non-Overlap 구성의 취약확률 37.3%와 비교하면 매우 취약성이 현저하게 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 Redundant 구성품에 생존성 효과라는 것을 알 수 있다. 그리고 이 상태에서 Overlap 공간이 형성되어 있는 경우의 시스템 취약확률은 앞서 언급한 Overlap 공간을 가진 Non-redundant 시스템의 취약확률 계산과 동일하게 진행할 수 있다.

3.2 비 폭발성 다발 관통 탄(Multiple Hit)에 의한 취약확률

앞서 단일 피격 시 취약확률 계산에 대한 절차를 정의하였지만, 실제 전투 환경에서는 관통 및 파편들에 의한 단일(Single) 피격보다는 다발(Multiple) 피격이 주를 이루게 된다. 따라서 다발

피격에 대한 평가 방법이 중요시되고 있으며 다발 피격에 대한 취약성 분석은 크게 다음과 같이 4가지로 방법을 적용할 수 있다.

- 이항식(Binomial) 접근 방법
- 포아송(Poisson) 접근 방법
- Tree-Diagram 방법
- Markov Chain 방법

3.2.1 이항식(Binomial) 접근

이항식 접근의 취약확률 계산은 정수 N의 관통 수를 가정한 평가방법이며, 시스템 전체 취약확률 계산은 아래 식(9)로 표현된다. 예를 들어 Table 5에 나타난 추진시스템 간략모델에 대하여 5개의 관통탄 및 파편에 의한 취약확률 계산은 식 (10)과 같다. 뿐만 아니라 아래의 식에서 시스템 전체에 대한 구성품 취약확률 ($P_{k_i/H}$)을 각각의 구성품들에 대한 피격상황(P_{k_i/h_i})으로 변경하면 주요 구성품들 각각에 대한 취약확률을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{k/NH} &= 1 - P_{survive/NH} \quad (9) \\
 &= 1 - (1 - P_{K/H})^N
 \end{aligned}$$

$$P_{k/NH} = 1 - (1 - 0.373)^5 = 0.903 \quad (10)$$

3.2.2 포아송(Poisson) 접근

포아송 접근은 이항식 접근과는 다르게 관통의 수가 실수인 경우에 사용한다. 이는 폭발 탄두에서 비산되는 파편들에 의한 취약성 평가에 적합한 방법이다. 이 때 관통의 수는 무작위 피격 수 (E)로 정의 된다. Fig. 5에 보인 것과 같이 M번의 발사된 탄이 시스템 Spray Zone(As) 위에 또는 이의 지역에 고루 분포하여 피격된다면, Spray Zone(As) 상에 관통 탄이 피격되는 밀도(ρ)와 시스템 전체에 예상되는 피격 수는 식 (11)과 같이 계산 할 수 있다. 그리고 예상 피격 수에 따른 시스템 취약확률(P_k)은 식 (12)과 같이 가정할 수 있다.

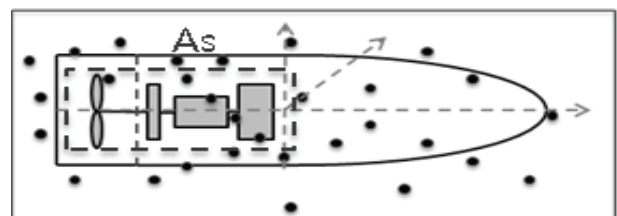


Fig. 5 Hit number for Poisson assessment

$$\begin{aligned}
 E &= \rho \cdot A_p \quad (11) \\
 < \rho = M/A_s >
 \end{aligned}$$

$$P_K = 1 - e^{-E \cdot P_{K/H}} \quad (12)$$

3.2.3 Tree - Diagram 방법

Tree diagram 접근법은 N번의 피격에 따라 Non-redundant 또는 Redundant 구성품들의 취약확률을 결정짓기 위한 방법으로 피격 횟수에 따라 각각의 구성품들의 취약확률 트리를 만들어 계산한다. 예를 들어 Table 5에 언급한 Non-redundant 구성품만을 포함하는 추진 시스템 모델에서 시스템이 2번의 피격을 받았을 때의 Tree diagram을 Fig. 6에 설명하였다. 첫 번째 피격을 받았을 때 각각의 구성품 및 시스템의 취약확률을 확인할 수 있고, 두 번째 피격을 받았을 때 각각의 구성품 취약확률은 첫 번째 피격에 따른 취약확률과 NK(No Kill)상태의 취약확률의 곱으로 표현한다(식 13).

$$P_{Ki}(2nd Hit) = P_{Ki}(1st Hit) \cdot NK(1st Hit) \quad (13)$$

여기서 첫 번째 피격에 따른 시스템 취약확률은 식 (14)에 설명한 것처럼 Non-redundant 구성품의 취약확률의 합으로 이루어지며, 두 번째 피격에 따른 시스템 취약확률은 첫 번째 피격에 따른 시스템 취약확률과 두 번째 피격에 따른 Non-redundant의 취약확률의 합으로 표현한다(식 15). 최종적으로 두 번의 피격을 거친 시스템의 생존확률은 식 (16)과 같이 전체 생존확률에서 취약확률 0.6064을 제외한 0.3936이 되며 이는 2번의 피격 이후에 남아있는 NK 상태의 확률 값과 같다.

$$P_k(1st Hit) = KF + KB + KG + KP \quad (14)$$

$$= 0.16 + 0.133 + 0.027 + 0.053$$

$$= 0.373$$

$$P_k(2nd Hit) \quad (15)$$

$$= P_k(1st Hit) + Kf + Ke + Kg + Kp$$

$$= 0.373 + (0.1003 + 0.083 + 0.0169 + 0.0332)$$

$$= 0.6064$$

$$P_s(2nd Hit) = 1 - P_k(2st Hit) \quad (16)$$

$$= 1 - 0.6064 = 0.3936$$

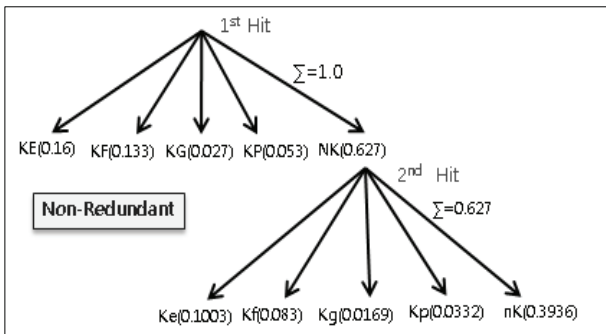


Fig. 6 Tree-Diagram for Non-redundant Components

이와 더불어 엔진이 추가된 Redundant 구성품을 포함한 모델(Table 7)을 살펴보면, Non-redundant 모델에서는 첫 번째

피격에서 NK상태로 접어들어만 두 번째 피격에 따른 취약확률을 구할 수 있었다. 하지만 Fig. 7에 보이는 것처럼, Redundant 구성품을 포함하는 모델에서는 NK 상태뿐만 아니라 Redundant 구성요소들에 대한 피격 상태에서도 다음 피격 상태의 취약확률을 구할 수 있다. 따라서 첫 번째 피격을 받았을 때 시스템 취약확률은 Redundant 구성품을 제외한 Non-redundant 구성품에 해당하는 구성품의 취약확률 합으로 표현할 수 있으며(식 17), 두 번째 피격을 받았을 때 취약확률은 식 (18)과 같이 계산할 수 있다. 그리고 2번 피격 이후의 시스템 생존 확률은 마찬가지로 전체 생존확률에서 취약확률은 식 (19)와 같다. 이는 앞서 구한 Non-redundant의 생존확률 약 61%보다 향상된 결과이다.

$$P_k(1st Hit) = KF + KG + KP \quad (17)$$

$$= 0.067 + 0.01 + 0.033$$

$$= 0.213$$

$$P_k(2nd Hit) \quad (18)$$

$$= P_k(1st Hit) + (KE1)(Ke2 + Kf + Kg + Kp)$$

$$+ (KE2)(Ke1 + Kf + Kg + Kp)$$

$$+ (NK)(Kf + Kg + Kp)$$

$$= 0.11 + 0.00189 + 0.002 + 0.0077$$

$$= 0.4318$$

$$P_s(2nd Hit) = 1 - P_k(2nd Hit) \quad (19)$$

$$= 1 - 0.4318 = 0.568$$

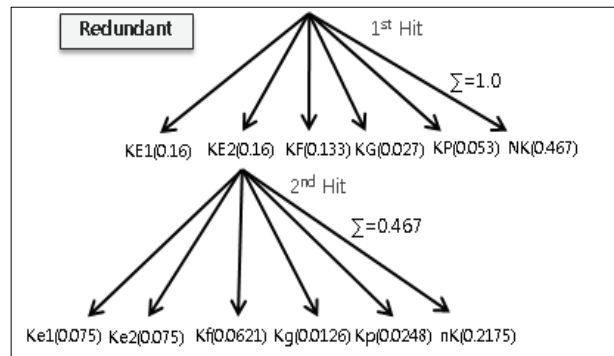


Fig. 7 Tree-Diagram for Redundant Components

3.2.4 Markov Chain 방법

마코프체인(Markov Chain)은 과거에 있었던 변화를 토대로 시스템의 여러 변수들이 갖고 있는 동적 성격을 파악하여 미래에 있을 변화를 연속적으로 예측하는 수학적 기법이다(Ball, 2003). 즉, 과거의 데이터를 토대로 변화량과 그에 따른 확률을 조사하여 변환 행렬을 구하고, 이 변환행렬로써 미래를 예측할 수 있는 기법이다. Table 7의 Redundant 구성품을 가지는 시스템에 대하여 단일 피격 시 시스템의 변수를 지정하기 위해 임무 수행에 따른 구성품들의 취약면적을 기준으로 변수를 Table 8과 같이 정의하였다.

Table 8 Example of Critical Components(Redundant)

	$A_{P_i}(m^2)$	$A_{V_i}(m^2)$	$P_{k_i/H}$
Engine 1	60	30	0.1
Engine 2	60	33	0.11
Fuel Oil Tank	50	20	0.067
Gear Box	10	3	0.01
Propeller	20	10	0.033
The rest	160	204	-
Total	300		0.32

이에 따라 구성품 취약면적에 따른 변수 값들을 정리하면 식 (20)과 같다. 행을 기준으로 열방향의 사건이 발생할 가능성을 내재하고 있는 취약면적을 열거 하였다. 예를 들어 Ke1 상태에서 Ke1 사건이 발생할 수 있는 경우는 Ke1 단일 피격 또는 NK(No Kill)상태에서만 존재하기 때문에 취약면적은 204와 30의 합으로 이루어진다. 또한 Krc상태에서 Krc사건이 발생할 취약면적이나 Knrc상태에서 Knrc 상태가 발생할 취약면적은 이미 Knrc 또는 Krc 상태이기 때문에 모든 취약면적이 대상이 된다. 그리고 여기서 이들 값들을 시스템 전체 면적으로 나누어 주면 변환행렬이 식 (21)과 같이 계산된다.

$$\begin{matrix}
 & Knrc & Krc & Ke1 & Ke2 & NK \\
 Knrc & 300 & 0 & 33 & 33 & 33 \\
 Krc & 0 & 300 & 33 & 30 & 0 \\
 Ke1 & 0 & 0 & 204+30 & 0 & 30 \\
 Ke2 & 0 & 0 & 0 & 204+33 & 33 \\
 NK & 0 & 0 & 0 & 0 & 204
 \end{matrix} \quad (20)$$

$$\begin{matrix}
 & Knrc & Krc & Ke1 & Ke2 & NK \\
 Knrc & 1 & 0 & 0.11 & 0.11 & 0.11 \\
 Krc & 0 & 1 & 0.11 & 0.1 & 0 \\
 Ke1 & 0 & 0 & 0.78 & 0 & 0.1 \\
 Ke2 & 0 & 0 & 0 & 0.79 & 0.11 \\
 NK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.68
 \end{matrix} \quad (21)$$

여기서, 각 변수가 의미하는 바는 아래와 같다.

- $Knrc$ (Non-redundant component kill)
- Krc (Both engine1 and engine2 kill)
- $Ke1$ (Engine 1 kill)
- $Ke2$ (Engine 2 kill)
- NK (None of the components kill)

생성된 변환행렬을 이용하여 초기 상태의 취약면적에 따른 취약확률에 변환행렬을 곱해주면 횡수에 따라 피격 이후의 취약

면적에 따른 손상확률을 구할 수 있다. 식 (22)는 변환행렬을 이용하여 1번 피격 시 취약면적에 따른 변수들의 손상확률 매트릭스를 나타내고 있다. 여기서 1번 피격 시 시스템의 전체 손상확률은 시스템에 직접적으로 영향을 미치는 Non-redundant 구성품의 손상확률과 동시에 발생하는 Redundant 구성품의 손상확률의 합으로 나타낼 수 있다(식 23).

$$\begin{bmatrix} Knrc & 0 \\ Krc & 0 \\ Ke1 & 0 \\ Ke2 & 0 \\ NK & 1 \end{bmatrix} [T] = \begin{bmatrix} Knrc & 0.11 \\ Krc & 0 \\ Ke1 & 0.1 \\ Ke2 & 0.11 \\ NK & 0.68 \end{bmatrix}^{(1)} \quad (22)$$

$$P_{K/H} = Knrc + Krc = 0.11 \quad (23)$$

3.3 접촉 폭발 탄에 의한 취약확률

본 절에서는 ‘접촉 시에 폭발하는 탄두’ 특성을 가진 위협무기에 의한 취약확률 계산을 보이하고자 한다. 접촉 시 폭발탄에 의한 취약확률은 폭발 압력과 파편의 영향 두 가지를 고려하여야 한다. 그 중 접촉식 폭발의 경우에는 파편에 의한 손상보다는 폭발 압력에 의해 구성품이 손상되기 때문에 폭발 압력에 따른 구조물의 파괴 정도를 직접 해석하여야 한다. 폭발 압력에 따른 구조물의 응답 해석은 Chung, et al. (2008)이 제시한 것과 같이 충격 압력에 의한 구조물의 손상 해석 과정을 거쳐야 한다. 그러나 본 연구에서는 폭발 압력의 효과는 무시하고 파편 피격에 의한 시스템 취약확률만을 계산하고자 한다. 폭발 압력의 효과를 고려한 취약확률 계산 방법은 추후 좀 더 연구되어야 할 것으로 사료된다.

접촉 폭발 시 비산되는 파편으로 인한 취약성 확률 계산을 위해서는 우선 구성품을 격자 형태로 배치하여야 한다. 그 다음으로는 격자 내 Cell에 대한 피격 확률을 산정하게 되는데 격자 내 각 Cell의 면적과 구성품 면적을 이용하여 계산한다(식 24). 그리고 각 Cell에 대한 피격확률은 총 파편수에 대한 구성품 간의 파편 피격 수를 지정하기 위한 자료로 활용된다. 본 연구에서는 각 격자에 대한 파편 수는 임의로 가정하였다.

$$P_{Hb} = Area_{cell} / Area_{presented} \quad (24)$$

총 파편 수를 비롯하여 각 Cell에 대한 파편 수를 지정한 다음 생존확률 계산하는 방법은 식 (25)와 같다. 각 구성품에 대한 취약면적을 앞서 가정하였기 때문에 가정한 취약면을 통해 취약확률을 산정한 다음 N번의 피격 수에 따라 생존확률을 산정한다. 생존확률의 경우 취약확률과 반대의 의미를 가지므로 이후에 취약확률 계산에는 최종 확률 값인 1과 생존확률과의 차이를 이용하여 파악한다.

$$P_s(\text{after the } N \text{ hits}) = (1 - P_{k/h})^{hit} \quad (25)$$

예를 들어 앞서 언급한 추진 시스템의 주요 구성품들의 폭발 파편에 대한 취약확률 계산은 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다. 주요 구성품 중 연료탱크에 대하여 취약 확률을 계산하였으며, 파편의 피격 수는 임의로 15개로 지정하였고 구성품에 대한 면적 정보는 Table 7을 바탕으로 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{k_{oil\ tank}} &= 1 - P_{s_{oil\ tank}} \\
 &= 1 - (1 - 0.133)^{15} \\
 &= 1 - 0.1176 \approx 0.8824
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

그러나 위의 취약성 값은 폭발 압력에 대한 영향을 제외하고 파편 영향만을 고려한 취약확률 값이다. 특히 접촉 폭발의 경우 폭발 시 파편에 대한 영향보다는 폭발 압력에 대한 여파로 인해 손상이 발생하기 때문에 폭발 압력에 따른 효과를 분석하여 파편에 의한 취약확률에 다시 반영할 필요가 있으며, 이는 추가적인 연구가 필요한 사항으로 판단된다.

3.4 비접촉 근거리 폭발탄에 의한 취약확률

비 접촉 근거리 폭발 탄에 의한 피격은 폭발 압력과 그에 따른 고속 파편에 의해 손상을 야기한다. 따라서 외부 폭발에 의한 시스템 취약확률도 2가지 단계를 거쳐 계산하여야 한다. 첫 번째 단계는 폭발압력에 의한 시스템의 취약성 결정 단계이고 두 번째 단계는 파편에 의한 시스템 취약성을 계산하는 단계로 구분된다. 그리고 최종적인으로 비 접촉 근거리 폭발에 따른 취약성 확률도 폭발 압력에 따른 취약확률과 파편에 따른 취약확률의 곱으로 이루어진다. 하지만 비 접촉 폭발탄에 경우 근거리와 원거리 폭발로 구분되는데 Fig. 8에서 보여 지는 것처럼 폭발압력과 사거리는 반비례 관계에 있고 이에 따른 손상확률 또한 폭발 위치와 반비례 관계에 있는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 접촉 폭발과 마찬가지로 비 접촉 근거리 폭발탄의 폭발압력 효과는 고려하지 않았다.

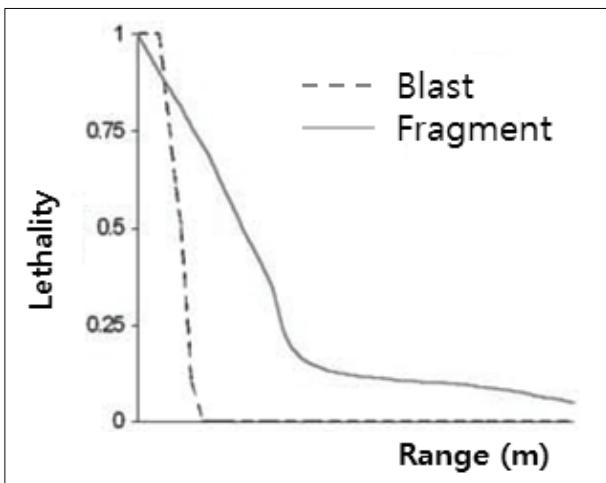


Fig. 8 The relation between damage and blast location (Dearden, 2001)

근거리 폭발 시 야기되는 파편들에 대해 취약확률을 계산하기 위해 우선적으로 폭발 시 발생하는 파편의 수와 파편의 방향을 지정해야 한다. 파편의 수를 결정하는 식은 폭발탄의 질량, 발사각, 사거리 등의 탄의 속성 값으로 결정된다. 본 연구에서는 Normal Friedman(2006)의 'World Naval Weapon systems'를 참고하여 위협무기의 속성 데이터를 정의하였으며 격자에 투영된 모델에 대해 식 (27)을 이용하여 근거리 폭발 시 투영되는 해당 구성품 면적에 도달하는 파편 수를 결정하였다.

$$N = \frac{A_p}{A_z} \cdot K < A_z = r^2\theta >
 \tag{27}$$

위 식에서 A_p 는 구성품이 가진 면적을 의미하고, r 은 폭발 지점에서 구성품까지의 거리를 의미한다. 그리고 K 는 TNT양에 따라 폭발 시 생성되는 총 파편 수를 의미하고, θ 의 경우 폭발 시 구성품 표면에 파편이 퍼지는 각을 의미한다.

폭발 후 파편의 방향(Shotline)은 보통 탄두의 세로 방향으로 위치되는데, 파편의 Spray Zone이 확산되면서 시스템 일부를 덮거나 시스템 전체를 대상으로 할 수 있다. 시스템 전체가 Spray Zone에 해당하는 경우 앞서 정의한 비 폭발성 관통 탄의 다발피격(Multiple Hit)시 취약확률 계산과 동일한 방법으로 진행할 수 있고, 시스템 일부를 대상으로 하는 경우에는 이항식 접근(식 28) 및 포아송 접근(식 29) 방법을 이용하여 근사치 계산을 수행할 수 있다. 이들 두 가지 접근법은 기본적으로 Redundant, Non-redundant 구성품으로 구성된 시스템에 해당되며 파편의 수는 단발이 아닌 다발로 정의하였다.

$$P_{K/F} = 1 - (1 - P_{k/H})^E
 \tag{28}$$

$$P_{K/F} = 1 - e^{-EP_{k/H}} = 1 - e^{-\rho A}
 \tag{29}$$

여기서 이항식 접근법의 예상되는 피격 수는 기존의 정수기반의 피격 횟수(N)에서 포아송 접근의 피격 수(E) 대체 되었을 때 주요 구성품의 Kill 확률 근사치를 의미한다. 또한 포아송 접근 방법의 경우 단순히 예상되는 피격횟수에 대한 분석보다는 파편의 Spray zone에 대한 파편 밀도를 이용하여 분석을 수행한다.

4. 결론

본 논문은 함정 생존성 요소 중 취약성을 정량적으로 평가할 수 있는 방법과 절차를 예제로써 제시하였다. 취약 면적을 바탕으로 위협 무기 특성, 겹침 특성, 잉여 특성을 감안한 취약성 평가 절차를 언급하였다. 본 논문에서 수행한 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 함정이 전투 환경에서 마주칠 수 있는 위협에 대해 탄두 특성과 피격 수 및 피격 위치를 고려하여 위협 무기를 분류하였다.
- (2) 분류된 각 위협 무기 별로 취약성 평가 절차를 제시하였으며, 이 과정에서 주요 구성품의 겹침 효과, 잉여 특성에 따라 달라지는 취약성을 예제로서 제시하였다.

본 논문에서는 관통탄에 의한 효과를 중심으로 구성품에 대한 취약 확률 계산 과정을 제시하였다. 그러나 실제 전투 환경에서는 관통탄에 의한 취약성과 더불어 폭발탄의 압력에 대한 취약성 평가 또한 중요하게 고려되어야 하는 사항이다. 본 논문에서는 폭발 압력에 의한 효과도 반영 방법은 고려하지 않았기 때문에 폭발 압력에 의한 효과도 추정식 등이 추가로 필요하며 이에 대한 연구가 보완 되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 각 구성품의 취약 면적을 산정하기 위한 과정이 추가로 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소가 지원하는 ‘생존성 기술 특화연구센터-함정 통합 생존성 향상을 위한 해석 기법 연구(ST-54)’ 과제 결과의 일부입니다. 연구를 지원한 기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Ball, R.E., 1985. *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*. AIAA education series: New York.

Ball, R.E., 2003. *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design-Second Edition*. AIAA education series: Virginia.

Ball, R.E. & Calvano, C.N., 1994. Establishing the Fundamentals of a Surface Ship Survivability Design Discipline. *Naval Engineers Journal*, 106(1), pp.71-74.

Cho, Y.J., 2009. A Study on Measuring Procedure and Analysis Technique of Ship Infrared Signature at Sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(3), pp.53-58.

Choi, W.S. Lee, H.Y. & Chung, J.H., 2009. A Study on Survivability Requirement of warship. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*. Mungyeong, Republic of Korea, 29-30 October 2009.

Chung, J.H., 2007. Current Trends in Ship Shock Trial Simulation. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 51(8), pp.70-72.

Chung, J.H. & Kwon, J.I., 2008. Survivability Analysis of A Naval Ship Using the MOTISS Program(I): Theoretical Background. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*. Changwon, Republic of Korea, 13-14 November 2008.

Chung, J.H. & Kwon, J.I., 2008. Survivability Analysis of A Naval Ship Using the MOTISS Program(II): A Numerical Example. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*. Changwon, Republic of Korea, 13-14 November 2008.

Dearden, P., 2001. New Blast Weapon. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 147, pp.80-86.

Driels, M., 2004. *Weaponneering: Conventional weapon System Effectiveness*. AIAA education series: Virginia.

Friedman, N., 2006. *World Naval Weapon Systems-5th Edition*. The U.S. Naval Institute.

JTCG/AS(Joint Technical Coordinating Group on Aircraft Survivability), 2001. Aerospace systems survivability handbook series - Volume 5. Survivability models and simulations. *JTCG/AS-01-D007*.

Kim, K.H. et al., 2009. A Study on a Dynamic Radar Cross Section Analysis Technique for a Surface Warship. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(6), pp.77-81.

Lim, G.H., 2006. *A Study of Vulnerability Analysis for Naval Vessel*. Thesis of Master Degree. Daejeon. Chungnam National University.

Park, J.G., 2006. *A Study of Establishing the Ship Susceptibility Design for Ship Survivability*. Thesis of Master Degree. Daejeon. Chungnam National University.

Yang, P. Song, B. Han, Q. & Ou, B., 2009. A Direct Simulation Method for Calculating Multiple-hit Vulnerability of Aircraft with Overlapping Components. *Chinese Journal of Aeronautics*, 22(6), pp.612-619.

