

# 칼튼 손상함수를 이용한 주요장비의 취약 면적 산정과 함정 취약성 평가 방법

이장현<sup>1,†</sup>·최원준<sup>2</sup>  
인하대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
대한민국, 합동참모본부<sup>2</sup>

## Assessment of Vulnerable Area and Naval Ship's Vulnerability based on the Carleton Damage Function

Jang Hyun Lee<sup>1,†</sup>·Won Jun Choi<sup>2</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University<sup>1</sup>  
Republic of Korea, Joint Chiefs of Staff<sup>2</sup>

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.

This paper deals with the calculation of vulnerable areas of critical components required for the assessment of naval ship's vulnerability. Taking into account the effectiveness of threatening weapons, the probability density function of damage was used to assess vulnerable areas or vulnerabilities of critical components. It is shown that the vulnerable area of critical component can be simply computed from the damage function. Considering the weapon effectiveness of fragmentation and explosion on the target, both Carleton Damage Function and Rectangular Cookie Cutter Function representing the probability of damage are applied to the vulnerable area assessment. Carleton damage function is utilized to describe the weapon-target interaction in the vulnerability analyses. A problem of blast effect against an assumed naval ship is chosen as a case study. Vulnerability is evaluated by applying the suggested method to the equipments arranged in the engine room of the virtual ship.

**Keywords** : Naval ship survivability(함정 생존성), Vulnerability(취약성), Damage function (손상 함수), Critical component(핵심 구성품), Carleton damage function(칼튼 손상 함수), Live fire test(실사격시험), Weapon effectiveness(무기 효과)

### 1. 서론

함정의 생존성은 피격성, 취약성, 회복성의 합으로 정의된다. 취약성은 피격 후 주어진 위협환경에 따른 함정의 손상 정도를 의미하며 (Kim et al., 2011), Ball (1985; 2003)이 제시한 취약 면적 기반의 항공기 생존성 평가 방법에서 취약성 평가의 이론적 근거를 찾을 수 있다 (Pei et al., 2009). Ball and Calvano (1994)는 Ball (1985)의 이론을 기반으로 함정 생존성 분석 절차를 제시하였으며, Lillis (2002)는 취약 면적 방법을 이용하여 경비정의 간이 취약성 방법을 제시하였다. Kim and Lee (2012)도 취약 면적 기반으로 간이 분석 기법을 이용하여 다중 관통 위협에 노출된 함정 추진시스템의 취약성을 분석하였으며, Shin et al. (2012)은 초기 설계단계에서 적용할 수 있는 함정 취약성 분

석 프로그램 사례를 제시하였다. 그러나 취약 면적의 결정 방법에 대한 이론적 방안을 찾기가 어렵고, 대부분 주요 구성품의 취약 면적 값을 가정한 정성적 연구 결과를 제시하였다. Lynch et al. (1997)과 Driels (2013)는 취약 면적 기반의 항공기 취약성 평가 도구인 COVART(Computation of Vulnerable Area Tool)를 제시하고 관통 효과에 따른 취약성 평가 과정을 소개하였으나 핵심 이론을 찾기는 어렵다 (Kim & Lee, 2012). Pei et al. (2006; 2007; 2009)도 단일 관통 실험식과 Markov chain을 혼합하여 다중 관통에 의한 항공기 취약성을 평가하였으나, 관통 실험식을 이용한 산술적인 방법으로 손상 정도를 평가하였기 때문에, 주요 구성품의 취약 면적을 구하기 어렵다. 이러한 이유로 동일한 무기체계에 대해 일관성 있는 취약성 값을 계산하기 어렵고 정성적인 평가를 제시할 수밖에 없다 (Fielding & Nilubol, 2004). 한편으로 취약성의 상대적 개념으로 위협 무기 효과를 분석하는 방법

이 개발되어 왔다 (Chusilp et al., 2014; Driels, 2013). 무기 효과는 특정 무기가 표적에 피해를 입힐 수 있는 가능성의 통계적 값을 의미하며, 통상 특정한 무기에 의한 피격체의 살상 확률 (Probability of Kill)을 효과로 사용하고 있다 (Choi et al., 2017). 실사격 시험의 어려움 때문에 무기효과 값은 대부분 JTCG/ME (2001)가 제공하는 JMEM(Joint Munitions Effectiveness Manual)의 데이터로 부터 찾고 있다, 또는 실사격 실험의 통계 처리와 시뮬레이션을 결합하여 효과도를 계산하는 방법이 있다 (Bloom et al., 1994; Driels & Shin, 2004; Chusilp et al., 2014; Choi et al., 2017). 다만, 이러한 무기 효과도 이론을 함정 취약 면적 계산에 적용한 연구나 구체적인 과정을 제시한 연구는 찾아보기 어렵다. 이러한 배경에서 본 연구는 위협 무기 효과도 분석 방법을 역으로 이용하여 구성품의 취약 면적을 산정하는 일관성 있는 방법을 제시하고자 하였다. 위협 무기의 효과 특성에 따라 구성품의 취약 면적을 산정할 수 있는 방법을 제시하고, Kim & Lee (2012)가 제시한 취약성 분석법에 적용하여 가상 함정의 취약성을 평가 결과를 제시하였다.

## 2. 함정 생존성 개요

함정의 생존성( $P_{Survive}$ )은 피격성( $P_H$ ), 취약성( $P_K$ ), 회복성( $P_R$ )의 세 가지 확률 지표를 이용하여 식 (1)과 같이 정량적으로 정의하였다 (Ball, 2003). 함정이 손상 후에 회복할 능력이 없다고( $P_R=0$ )가정하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 다시 정리할 수 있다. 함정의 손상 지표( $P_K$ )는 식 (3)과 같이 피격성과 취약성의 곱으로 표현할 수 있다 (Lillis, 2002; Otsin, 2005).

$$P_{Survive} = 1 - [P_H \times P_{K/H} \times (1 - P_R)] \quad (1)$$

$$P_{Survive} = 1 - [P_H \times P_{K/H}] \quad (2)$$

$$P_K = P_H \times P_{K/H} \quad (3)$$

여기서,  $P_{K/H}$ 는 피격조건에서 전손(Kill)확률 값을 의미한다. 취약 면적 기반의 취약성 평가방법은 주요 구성품의 취약 면적 또는 취약 확률 값을 이용한다. 함정 취약성 평가 절차는 Ball (1985), Kim et al. (2011) 그리고 Kim and Lee (2014)의 방법을 이용하였다. 주요 구성품을 선택하고, 각 주요 구성품의 위협 무기에 의한 취약 면적을 반영하였다. 함정의 주요 구성품은 임무수행 능력과 관련되어 생존성에 영향을 미치는 장비를 의미하며 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 및 FTA(Fault Tree Analysis)를 이용하여 구해야 한다 (Kim & Lee, 2014). 식 (4)는  $i$  번 구성품의 취약확률을 산정하는 식을 나타낸다. 여기서  $A_{vi}$  와  $A_{pi}$ 는  $i$ 번 구성품의 취약 면적과 전체 투영 면적을 의미한다.

$$P_{k_i/h_i} = A_{vi}/A_{pi} \quad (4)$$

여기서,  $P_{k_i/h_i}$ 는  $i$  요소의  $j$  피격에 의한 살상 확률(Probability of kill)을 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 취약성과 상대적인 개념인 무기 효과 관점에서 피격 부위에 손상 확률함수(damage function)를 적용하여 주요 구성품의 취약 면적 산출 방법을 제시하고자 한다.

## 3. 취약성 면적 계산 과정

### 3.1 손상함수(damage function)

본 절은 손상 확률을 이용하여 주요 구성품의 취약 면적 산정 과정을 제시하였다. 이를 위하여 Driels (2013)의 무기효과도 분석 방법을 이용하여 손상 확률을 구하고 이를 취약확률로 가정하였다. 앞 장에서 정의한 주요 구성품의 취약 면적( $A_{vi}$ )은 고유의 면적( $A_{pi}$ )과 손상 확률로 가정하였다. 따라서 주요 구성품의 취약 면적은 식 (5)와 같이 고유 면적과 위협 무기로부터 발생하는 손상 확률( $P_{di}$ )의 곱으로 표현할 수 있다.

$$A_{vi} = P_{di} \times A_{pi} \quad (5)$$

피격체의 손상 확률은 위협 무기가 목표물을 손상시킬 수 있는 확률 척도를 의미한다. 특정한 위치에서 위협 무기에 의한 살상 확률( $P_k$ ) 식 (6) 과 같이 칼튼 손상 함수로 가정하였다 (Lucas, 2003; Driels, 2013). 이는 위협 무기가 피격체의 원점에 도달하였을 때 각 점에서 일어나는 손상 확률(또는 취약성)을 가우시안 분포(Gaussian) 분포로 가정한 것이다. 따라서 식 (6)은 피격체 원점에 위협 무기가 가해질 때 점( $x, y$ )에서  $P_k$  값을 의미한다.

$$P_k(x, y) = \exp \left[ -\frac{4x^2}{WR_d^2} - \frac{4y^2}{WR_r^2} \right] \quad (6)$$

여기서,  $WR_r$  과  $WR_d$ 는 위협 무기의 반경을 의미하며 위협 무기의 치명도(lethality)와 관련이 있는 변수이다 (Driels, 2013). Fig. 1에 식 (6)의 함수를 표현하였다.  $L_{ET}$  와  $W'_{ET}$ 는 피격체에 나타난 손상 확률 분포의 유효 등가 폭 (deflection) 및 등가 높이 (range)를 의미한다.

치명도는 칼튼 손상함수가 차지하는 면적으로 정의한다. 파편 (Fragmentation) 위협 무기에 의한 치명도는 다음 식 (7)에 보인 유효 면적(MAE<sub>F</sub>, Mean Area of Effectiveness for Fragmentation)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} MAE_F &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[ -\frac{4x^2}{WR_d^2} - \frac{4y^2}{WR_r^2} \right] dx dy \\ &= \pi \times WR_r \times WR_d \end{aligned} \quad (7)$$

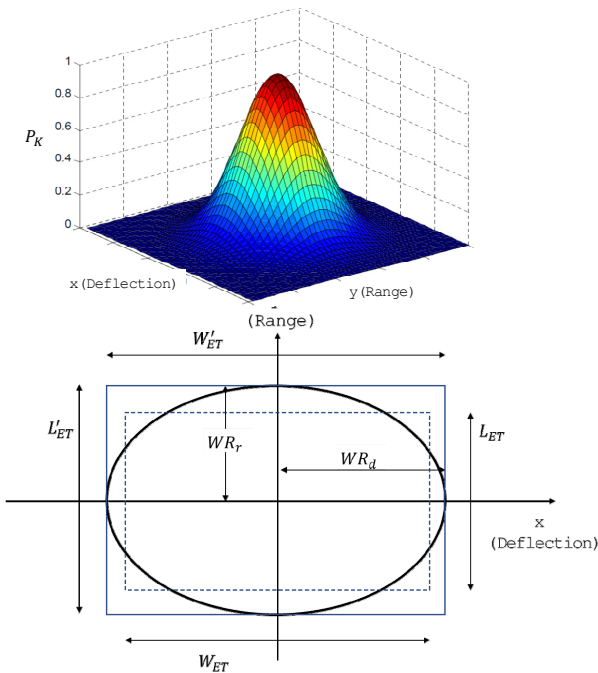


Fig. 1 Carleton damage function and the elliptical approximation by effective target length and width

$WR_r$  과  $WR_d$  의 비율( $a$ )을 이용하면 피격체의 등가 높이와 등가 폭은 각각 식 (8)과 식 (9)로 표현된다.

$$L'_{ET} = 2 \times WR_r = 1.128 \sqrt{MAEF \times a} \quad (8)$$

$$W'_{ET} = 2 \times WR_d = \frac{L'_{ET}}{a} \quad (9)$$

여기서,  $a(WR_r / WR_d)$ 는 경험식으로 위험 무기 입사각을 이용하여 계산한 상수 값이며 Chusilp et al. (2013)이 제시한 식 (10)을 이용하면 충돌 입사각( $J$ )의 함수로 계산할 수 있다.

$$a = \frac{WR_r}{WR_d} = MAX[1 - 0.8 \cos(J), 0.3] \quad (10)$$

등가 길이를 이용하면 칼튼 손상함수는 식 (11)으로 다시 정리할 수 있다.

$$P_k(x, y) = \exp \left[ -\frac{4x^2}{L'^2_{ET}} - \frac{4y^2}{W'^2_{ET}} \right] \quad (11)$$

만약 1차원을 가정하면, 단일 피격체의 단 방향 손상 확률(SSPD: Sing Sortie Probability of Damage)은 Fig. 2에 보인 것과 같이 피격체에 정확한 타격이 가해지는 정확성 척도의 확률 밀도 함수( $g(x)$ )와 1차원 칼튼 손상함수( $c(x)$ )의 적분으로 정

의할 수 있다. 각 함수는 식 (12)~ 식 (13)에 제시하였다 (Åkesson, et al. 2013; Driels, 2014).

$$SSPD = E[c(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) c(x) dx \quad (12)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{x^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (13)$$

$$c(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{4x^2}{L'^2_{ET}} \right] \quad (14)$$

여기서,  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 는 피격체의 중앙 점으로부터 수평한 폭(deflection) 방향 및 수직인 높이(range) 방향의 오차위치에 피격될 확률의 표준편차를 의미한다.

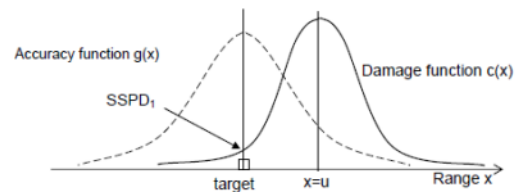


Fig. 2 SSPD for a single target against a unitary target (Driels, 2013)

따라서 피격체의 수평 방향과 수직 방향의 형상을 고려한 단일 피격체의  $x, y$  방향의 손상 확률(SSPD)은 각각 식 (15)과 식 (16)과 같다.

$$SSPD_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ \frac{-4x^2}{L'^2_{ET}} \right] \exp \left[ \frac{-x^2}{2\sigma_x^2} \right] dx \quad (15)$$

$$SSPD_y = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ \frac{-4y^2}{W'^2_{ET}} \right] \exp \left[ \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right] dy \quad (16)$$

위험 상황에서 오차거리를 포함하는 2차원 평면상에 대한 손상 확률(SSPD)은 식 (17)과 같이 각 방향에서 손상 확률의 곱으로 표현할 수 있다 (Driels, 2004). 따라서 단일 하중에 의한 손상 확률(SSPD)은 식 (17)과 같다.

$$SSPD = SSPD_x \times SSPD_y \quad (17)$$

따라서 임의의 피격체 영역에서 좌표평면 손상 확률( $SSPD_x$ ,  $SSPD_y$ )을 이용하면 투영면적( $A_p$ )으로부터 취약 면적( $A_v$ )을

구할 수 있다. 즉, 식 (5)에 제시한 취약 면적은 식 (18)로 변환하여 계산할 수 있다.

$$A_v = SSPD \times A_p \tag{18}$$

### 3.2 파편(fragmentation)에 의한 손상 확률

본 절에서는 위협 무기가 파편 효과를 가지고 있는 경우에 대한 손상 확률을 구하고자 한다. 식 (15)과 식 (16)에 상수  $\alpha$ 와  $\sigma_u$ 를 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$SSPD_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{-x^2}{2\sigma_u^2} \right] dx \tag{19}$$

$$= \frac{\sigma_u}{\sigma_x} \left\{ \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{-x^2}{2\sigma_u^2} \right] dx \right\}$$

여기서,  $\alpha = (8\sigma_x^2 + L_{ET}^2)/L_{ET}^2$ ,  $\sigma_u = \sigma_x/\alpha$ 을 의미한다. 식 (18)에서 괄호 안의 값을 적분하면 1이 된다. 따라서 손상 확률  $SSPD_x$ 과  $SSPD_y$ 는 다음과 같이 단순화된 값으로 표현할 수 있다.

$$SSPD_x = \frac{L'_{ET}}{\sqrt{(8\sigma_x^2 + L_{ET}^2)}} \tag{20}$$

$$SSPD_y = \frac{W'_{ET}}{\sqrt{(8\sigma_y^2 + W_{ET}^2)}} \tag{21}$$

파편이 피격체 중앙으로부터 벗어날 기대 값을 각각 REP(Range Error Probable), DEP(Deflection Error Probable)으로 가정하면, REP와 DEP는 표준 편차와 관련이 있다. 68 % 표준편차의 신뢰도를 감안하면 range 방향에 총 충격 점의 50 %가  $\pm REP$  범위에 놓인다. DEP도 유사하게 정의하면  $REP=0.6745\sigma_x$ ,  $DEP=0.6745\sigma_y$ 의 관계를 갖는다.

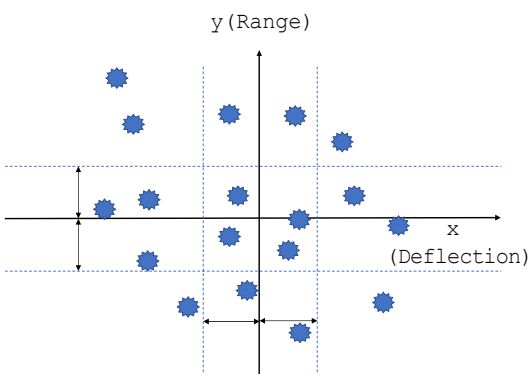


Fig. 3 Definition of REP and DEP in the target plane

따라서 파편에 의한 손상 확률 SSPD는 다음 식 (22)와 같이 계산될 수 있다.

$$SSPD = \frac{L'_{ET} \times W'_{ET}}{\sqrt{(17.6REP^2 + L_{ET}^2)} \sqrt{(17.6DEP^2 + W_{ET}^2)}} \tag{22}$$

### 3.3 폭발(blast)에 의한 손상 확률

폭발 위협의 경우 위협 무기가 피격되어 폭발이 시작되는 지점으로부터 확산되는 손상가능 영역에 대하여 구역 별 손상 확률 값을 통해 취약 면적을 산정할 수 있다. 폭발여파에 따른 손상영역을 직사각형 모양으로 단순화하여 해당 영역에 포함되는 구성품의 손상 확률을 산정하는 방법인 Rectangular Cookie cutter 방법을 이용하여 주요 구성품 별 손상 확률을 지정하였다 (Driels, 2004). 따라서 손상함수  $c(x)$ 는 다음 식 (23)과 같이 상수로 가정할 수 있다.

$$c(x) = \begin{cases} P_{CD} = 1 & \text{for} \left( -\frac{L_{ET}}{2} < x < \frac{L_{ET}}{2} \right) \\ P_{CD} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{23}$$

위험 무기가 폭발(blast)이면, 손상함수는 직사각형으로 단순히 가정할 수 있다(Fig. 1). 또한 유효 길이와 유효 폭은 동일한 값  $L_{ET}$ 으로 가정할 수 있다.  $MAE_B$ 는 식 (7)과 동일한 방법으로 구한 유효 면적 값이다.

$$L_{ET} = W_{ET} = \sqrt{MAE_B} \tag{24}$$

Rectangular Cookie cutter 방법은 Fig. 4와 같이 폭발 위협체가 피격되는 지점을 기준으로 직사각형 모양의 임의 구역 별 손상 확률 값을 산정하는 방법이다. 예를 들어 Fig. 4의 폭발 여파 시 손상영역을 색이 다른 4개의 영역으로 지정한다고 했을 때, 각 영역에서의 손상 확률은 손상여파의 확률밀도함수(PDF)를 이용하여 각 영역의 길이 별로 산정할 수 있다. 식 (25)와 식 (26)은 Cookie cutter 방법을 적용하였을 때 손상 확률이다.

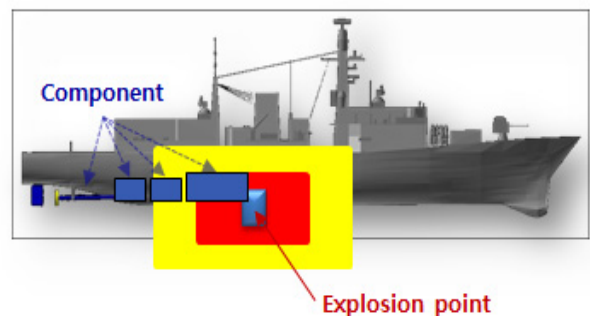


Fig. 4 Rectangular cookie cutter function applied on a virtual ship

$$SSPD_x = \frac{P_{CD}}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right] dx \quad (25)$$

$$= \frac{P_{CD}}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-L_{ET}/2}^{L_{ET}/2} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right] dx$$

$$SSPD_y = \frac{P_{CD}}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] dy \quad (26)$$

$$= \frac{P_{CD}}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{-W_{ET}/2}^{W_{ET}/2} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] dy$$

### 3.4 시스템 취약성 분석 예시

본 절은 앞서 언급한 손상 확률을 기반으로 가상의 함정 추진 시스템을 대상으로 취약성 분석 과정을 제시하였다. 취약확률 산정 절차는 ①위험 특성 별 주요 구성품의 손상 확률 계산, ②손상확률 주요 구성품의 취약 면적 계산, ③구성품의 이중화(redundancy), 배치(layout) 및 위치를 고려한 시스템의 취약성 계산 과정으로 구성하였다. Fig. 5는 본 예시에서 가정한 가상 함정의 추진시스템과 주요 구성품을 보인 것이다. 해석의 단순화를 위해 주요 구성품의 위치와 형상은 Fig. 6에 보인 것과 같이 가정하였으며, Table 1은 주요 구성품의 위치(좌표)와 면적(presented area)을 정리하였다.

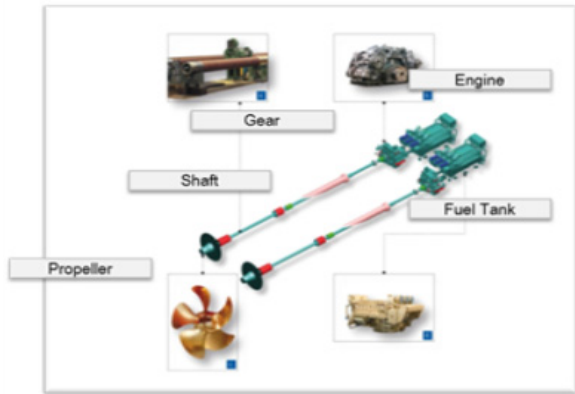


Fig. 5 Critical component of propulsion system

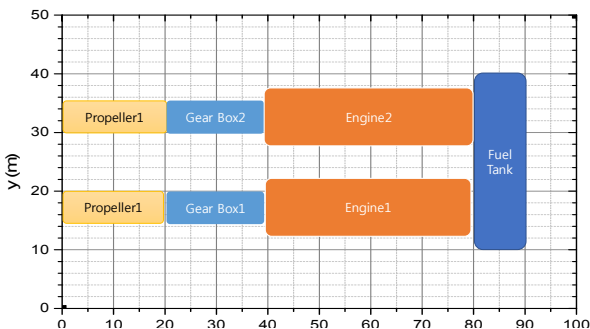


Fig. 6 Assumed location of critical components

Table 1 Presented area for critical component

Components	Location				Area ( $A_p$ )
	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	
Propeller1	0	20	15	20	100
Propeller2	0	20	30	35	100
Gear box1	20	40	15	20	100
Gear box2	20	40	30	35	100
Engine1	40	80	12	22	400
Engine2	40	80	28	38	400
Fuel tank	80	90	10	40	300

Fig. 4에 나타난 바와 같이 임의의 지점에 폭발 위험 무기가 피격되었다고 가정했을 때, Rectangular Cookie Cutter 방법에 의하여 폭발 지점에서부터 LET(Effectiveness Target Length) 별 손상 영역 내에서 손상 확률은 식 (25)과 식 (26)을 이용하여 산정하였다. 다만, 각 구성품의 위치를 고려하면 식 (27)과 같이 취약확률을 계산할 수 있다.

$$SSPD = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right] dx \int_{y_1}^{y_2} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] dy \quad (27)$$

이때 위험 무기의 효과도 특성은 Table 2와 같이 가정하였다. 위험 무기의 특성은 유효 면적( $MAE_B$ )과 파편의 50%가 위치하는 폭(REP, DEP)으로 대변하였다. 이러한 효과도 특성 값은 위험 무기의 효과도 실사격 시험의 값을 이용하면 좀 더 체계적일 수는 있을 것이다 (Lee & Hong, 2017; Choi et al., 2017). 다만, 본 연구는 실 사격 값을 가정하여 사용하였다. 각 손상영역에서 손상 확률 값을 이용하여 주요 구성품 별 취약 면적은 식 (5)에 의거하여 Table 3에 나타난 바와 같이 산정할 수 있다.

Table 2 Attribute of blast impact

Attribute	Input data			Derived data	
	$MAE_B$	REP	DEP	$\sigma_x$	$\sigma_y$
Value	10,000	50	25	74.13	37.06

Table 3 Presented area for critical component

Components	Probability of damage			Area $A_v$
	SSPDx	SSPDy	SSPD	
Propeller1	0.106	0.048	0.005	0.512
Propeller2	0.106	0.037	0.004	0.390
Gear box1	0.099	0.048	0.005	0.476
Gear box2	0.099	0.037	0.004	0.362
Engine1	0.154	0.097	0.015	5.973
Engine2	0.154	0.072	0.011	4.472
Fuel tank	0.028	0.253	0.007	2.121

Kim et al. (2012)이 제시한 취약 면적 기반의 취약성 분석 기법을 기반으로 시스템 취약확률을 산정하였다. 비이중화(non-redundancy)를 가진 장비가 비겹침(non-overlap)으로 가정하여 피격된 i번 구성 요소의 취약성( $P_{k/h,i}$ )를 고려하여 식(28)과 같이 취약확률( $P_{K/H}$ )을 구하였다.

$$P_{K/H} = \sum_{i=1}^n P_{k/h,i} = \sum_{i=1}^n \frac{A_{vi}}{A_{total}} = 0.01 \quad (28)$$

계산에 의하면 약 10%의 취약확률로 평가되었다. 다만, 본 예제는 가상의 무기 체계를 대상으로 적용한 것이므로 정량적인 의미보다는 제안한 방법의 적용 가능성을 위한 것이다.

### 4. 결론

본 연구는 함정의 취약성 분석에 필요한 주요 구성품의 취약 면적을 산정하기 위한 방안을 제시하였다. 취약 면적을 정량적으로 산정할 수 있도록 손상함수를 적용한 효과도 계산법을 이용하였다. 특히, 무기 효과도에 의한 피격체의 손상 계산 방법을 이용하여, 피격된 구성품 입장에서 취약성을 계산하는 방법을 제안하였다. 같은 손상 확률함수를 적용하여 취약 면적을 계산하는 과정을 정식화하여 제시하였으며, 제안한 방법을 이용하여 간략한 생존성 평가 예제를 제시하였다. 최종적으로는 단순한 계산식을 이용하여 취약 면적을 구할 수 있음을 보였으나, 다중 관통을 비롯한 여러 가지 위협을 고려한 이론적인 전진이 추가로 필요하다고 사료된다. 또한, 예제에 사용된 무기의 효과도 및 함정의 추진기는 정량적인 의미보다는 절차를 제시하기 위하여 모두 가정된 가상의 체계로만 활용하였다. 실제 위협 무기의 여파에 의한 손상 확률함수의 특성 및 위협 무기별 손상확산은 고려되지 않았다. 여전히 무기의 효과도 특성을 가정해야 하는 한계는 있으나, 동일한 효과도를 가진 위협 무기에 대한 다양한 피격체의 취약성을 상대적으로 비교할 수 있는 장점이 있다고 사료된다. 물론 무기 효과도는 JMEM의 데이터와 같은 실사격 실험 데이터를 사용하거나, 시뮬레이션을 결합하여 효과도를 계산할 수 있을 것으로 생각된다. 다양한 손상 함수의 유형을 고려한 취약성 특성을 비교할 필요도 있다고 사료된다.

### 후 기

이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2018년 조선해양산업 퇴직인력활용 전문인력양성사업, 과제번호: N0002361)

### References

Åkesson, B.M., Lappi, E., Pettersson, V.H., Malmi,

E., Syrjänen, S., Vulli, M., & Stenius, K., 2013. Validating indirect fire models with field experiments. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 10(4), pp.425-434.

Ball, R.E., 1985. *The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design*. 1st Edition. AIAA Education Series: Monterey, California.

Ball, R.E., 2003. *The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design*. 2nd Edition. AIAA Education Series: Monterey, California.

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.

Bloom, J.B., Reese, R.M. & Hopkins, T.M., 1994. Live fire test and evaluation for ships. *Naval Engineers Journal*, 106(3), pp.228-245.

Choi, Y.H., Lee, K.T., Pyun, J.J., Jang, Y.C., 2017. A study on Pk(Probability of Kill) calculation method of the direct fire weapon system using simulation. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 26(3), pp.115-123.

Chung, J.H. & Kwon, J.I., 2008. Survivability analysis of a naval ship using the MOTISS program(1): theoretical background. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, Republic of Korea, pp.13-15 November 2008.

Chusilp, P., Charubhun, W., & Koanantachai, P., 2014. Monte carlo simulations of weapon effectiveness using Pk matrix and carleton damage function. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 4(4), pp.280-285.

Driels, M., 2013. *Weaponneering: conventional weapon system effectiveness*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Driels, M. R., & Shin, Y. S., 2004. *Determining the number of iterations for Monte Carlo simulations of weapon effectiveness*. Naval Postgraduate School: Monterey, California.

Fielding, J.P. & Nilubol, O., 2004. Integration of survivability assessment into combat aircraft design for operational effectiveness. *Proceedings of the 24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Yokohama, Japan, 29 August - 3 September 2004, pp.1-10.

JTCG/ME(Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness), 2001. *Survivability models*

- and simulations*. Aerospace systems survivability handbook series–Volume 5. JTCG/AS-01-D007.
- Kim, K.S., Lee, J.H. & Hwang, S.Y., 2011. Simplified vulnerability assessment procedure for the warship based on the vulnerable area approach. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 85(5), pp.404–413.
- Kim, K.S. & Lee, J.H., 2012. Vulnerability assessment procedure for the warship including the effect of shotline and penetration of fragments. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(3), pp.254–263.
- Kim, K.S. & Lee, J.H., 2014. Integrated survivability assessment given multiple penetration hits. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(1), pp.69–76.
- Kim, K.S., Lee, J.H., Son, G.J. & Jhun, J.I., 2012. A study of the procedure for integrated survivability assessment. *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, Pyeongchang, Republic of Korea, 1–3 February 2012. pp.824–840.
- Lee, H.C. & Hong, Y.G., 2011. A study on the generation method of effectiveness data for surface to surface artillery System). *Journal of Korea Academia–Industrial Cooperation Society*, 12(7), pp. 3197–3206.
- Lillis, J.A., 2002. *Analysis of the applicability of aircraft vulnerability assessment and reduction techniques to small surface craft*. Naval Postgraduate School: Monterey, California.
- Lucas, T.W., 2003. Damage functions and estimates of fratricide and collateral damage. *Naval Research Logistics (NRL)*, 50(4), pp.306–321.
- Lynch, D.D., Kunkel, R.W. & Juarascio, S.S., 1997. *An analysis comparison using the Vulnerability Analysis for Surface Target(VAST) Computer Code and the Computation of Vulnerable Area and Repair Time (COVARTIII) Computer Code(No. ARL–MR–341)*. Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, Aberdeen, Maryland.
- Otsin, N., 2005. *Development of a combat aircraft operation and cost–effectiveness design methodology*. Ph.D. Thesis. Granfield College of Aeronautics, Granfield University.
- Pei, Y., Song, B. & Han, Q., 2007. Method for assessing vulnerability of aircraft to spray fragments of missile. *Systems Engineering–Theory & Practice*, 27(2), pp.161–166.
- Pei, Y., Song, B., Han, Q. & Ou, B., 2006. Aircraft vulnerable–area decomposition method in the overlapping region of components. *Journal of Aircraft*. 43(4), pp.1138–1144.
- Pei, Y., 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.
- Shin, Y.H., Kwon, J.I., Chung, J.H. & Sajdak, A.W., 2012. Development of vulnerability analysis program for review of warship survivability at concept design stage. *The 4th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures*, Jeju, Republic of Korea, 19–22 June 2012, pp.151–162



이장현

최원준