다중 관통 피격에 따른 함정 통합 생존성 분석 절차

김광식* · 이장현**

*인하대학교 대학원 조선해양공학과

**인하대학교 조선해양공학과

Integrated survivability assessment given multiple penetration hits

Kwang-Sik Kim* and Jang-Hyun Lee**

*Graduate school, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University, Incheon, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University, Incheon, Korea

KEY WORDS: Integrated Survivability 통합 생존성, Susceptibility 피격성, Vulnerability 취약성, Recoverability 회복성

ABSTRACT: Survivability assessments and vulnerability reductions are required in warship design. A warship's survivability is assessed by its susceptibility, vulnerability, and recoverability. In this paper, an integrated survivability assessment for a warship subjected to multiple hits is introduced. The methodology aims at integrating a survivability assessment into an early stage of warship design. The hull surface is idealized using typical geometries for RCS (Radar Cross Section) detection probability and susceptibility. The Vulnerability is evaluated by using the shot-line. The recoverability is estimated using a survival time analysis. This enables the variation of survivability to be assessed. Several parameters may be varied to determine their effects on the survivability. The susceptibility is assessed by the probability of detecting the radar cross section of the subject and the probability of being hit based on a probability density function. The vulnerability is assessed by the kill probability based on the vulnerable area of critical components, according to the component's layout and redundancy. Recoverability is assessed by the recovery time for damaged critical components.

1. 서 론

전투환경에 놓인 함정은 적의 탐지 시스템 및 위협 무기에 노출되어 피격 받을 경우 단발의 피격으로도 함정 또는 전투 시스템의 손상을 입을 수 있다. 이러한 이유로 전투환경에서 함정의 손상을 최소화 하고, 생존성을 향상시키기 위한 방법은 함정 획득 과정에 중요한 역할을 하고 있다. 함정의 생존성(Survivability)은 함정이 전투환경에서 설계된 기능과 임무를 수행할 수 있는 능력을 의미하며, 피격성(Susceptibility), 취약성(Vulnerability), 회복성(Recoverability)의 확률적인 지표를 통해 평가한다(Ball, 1985). 피격성은 적의 탐지 장비에 의해 아군의 함정이 식별되고 위협무기에 피격될 확률을 의미하며, 취약성은 피격 후 주어진 위협환경에 따른 함정의 손상 정도를 의미한다(Kim et al., 2011). 그리고 회복성은 손상된 함정이 기능과 임무를 회복할 수 있는 가능성과 능력을 의미한다.

이러한 함정의 생존성은 함정 설계 및 건조에 있어 중요하게

고려되어야 할 요구사항으로서, 함정 건조 가능성 검토 및 개념 연구단계부터 생존성 구성 요소간의 상호간 보완관계를 통합적으로 고려하여 평가할 필요가 있다(Kim et al., 2012).

생존성 분석에 필요한 이론적인 토대는 Ball(1985) 및 Ball(2003)이 제시한 항공기 생존성 분석 방법으로부터 찾을 수 있으며(Pei et al., 2009), 이는 육상 및 해상 전투 시스템의 생존성 분석 방법의 근간이 되고 있다. Ball and Calvano(1994)는 Ball(1985)의 이론을 기반으로 함정 생존성 분석의 개념을 제시하였으며, Lillis(2002)는 취약면적 기반의 항공기 취약성 해석법을 사이클론급 경비정(Cyclone-class patrol craft)의 취약성 분석에 적용함으로써 항공기 취약성 모델을 함정에도 적용 할 수 있음을 증명하였다. 그리고 육상 전투 시스템의 경우 Driels(2004)는 Ball(2003)의 이론을 기반으로 육상 전투 시스템에 대한 무기 효과도 분석 차원의 취약성 분석 절차를 제시하였다.

현재 국내의 함정 생존성 관련연구로는 피격성(Susceptibility) 및 취약성(Vulnerability)의 개별 특성을 평가하는 방법이 보고

Received 13 August 2013, revised 17 January 2014, accepted 13 February 2014

Corresponding author Jang-Hyun Lee: +82-32-860-7345, jh_lee@inha.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of CAD/CAM 2012 in Pyeongchang.

되었으나, 생존성 구성요소들을 통합적으로 고려한 생존성 이론 및 체계적인 방법은 아직까지 보고되고 있지는 않다 (Kim et al., 2011). 피격성의 경우 함정의 적외선 특성, 레이더 피탐 능력, 수중 방사 소음 등과 같은 피격성 지표 분석에 관한 연구가 개별적으로 진행되어 왔으며(Cho, 2009; Kim et al., 2009), 함정 취약성 연구는 Kim and Lee(2012), Shin et al.(2012) 등에서 찾을 수 있다. 그러나 함정 생존성 개별 요소들의 상호 관계를 반영한 통합 생존성 평가 방법론이 제시되어야 하며(Chung and Kwon, 2008), 이를 위해서는 개별 생존성 구성 요소를 일관성 있게 고려한 통합 생존성 분석이 필요하다. 본 연구는 함정의 생존성을 분석할 수 있는 통합적인 절차적 방법을 수립하기 위하여 함정의 생존성 구성요소인 피격성, 취약성, 회복성에 대한 분석 방법을 제시하고, 이들을 통합한 생존성 분석 방법론에 대하여 언급하고자 한다. 본 연구의 함정 통합 생존성 분석 절차의 경우 레이더 반사 단면적(RCS, Radar cross section) 탐지에 따른 다발 관통(Penetration) 피격 상황에서의 시스템 생존성 분석 예제를 통해 제시된 분석 절차를 설명하였다.

2. 함정의 생존성

함정의 생존성은 전투환경에서 적의 위협에 따른 손상을 견디고 주어진 임무와 기능을 유지할 수 있는 능력을 의미한다. 함정의 생존성은 피격성(P_H), 취약성(P_K), 회복성(P_R)으로 구성된 세 가지의 확률적 지표를 이용하여 정량적으로 정의할 수 있다(Ball, 2003). 식 (1)은 이들 생존성 확률적 지표를 이용하여 생존성을 산정하는 식을 나타낸다(Ball, 2003). 이 단계에서 함정이 손상 후에 회복할 능력이 없다고($P_R=0$) 가정하면 생존성은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 다시 말해, 함정의 파괴 정도를 나타내는 지표($P_{K\text{illability}}$)는 식 (3)과 같이 피격성과 취약성의 곱으로 표현할 수 있음을 나타낸다(Lillis, 2002).

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

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

$$P_{\text{Killability}} = P_H \cdot P_{K/H} \quad (3)$$

3. 피격성(Susceptibility, P_H) 분석

함정의 피격성은 적의 탐지 장비에 의해 함정이 식별되어 위협무기에 피격될 확률을 의미한다. 이는 함정이 적에게 탐지되어 위협무기에 명중되는 과정과 관련되므로, 함정이 발생시키는 여러 종류의 신호와 이를 탐지하고 식별하는 장비, 그리고 탐지에 따른 적의 위협무기에 대한 방어 및 기만체계 등에 대하여 분석하여야 한다(Park, 2006). 피격성은 함정의 RCS 특성, 적외선(Infra-red)성능, EMI/EMC(Electro magnetic interference/Electro magnetic compatibility) 성능, 수중 방사 소음 성능(URN, Underwater radiated noise) 등을 종합하여 평가하여야 하며, 피격성 평가 요소에 대한 연구 사례는 여러 문헌에서 찾을

을 수 있다(Cho, 2009; Lapierrea et al., 2007; Michael, 2002). 본 연구는 우선 함정의 레이더 반사단면적(RCS) 특성에 따른 피격확률 계산절차를 예제로써 통합 생존성 분석에 반영하고자 한다.

레이더 반사단면적은 레이더에서 보낸 신호가 표적(Target)에 반사되어 돌아올 때, 그 반사체의 반사량을 나타내기 위해 규정한 면적을 의미하며, 레이더 반사량은 표적(반사체)의 형상에 따라 결정된다(Michael, 2002). 레이더 반사단면적(σ)을 이용한 피격확률 계산은 적 탐지장비에 따른 탐지확률(P_D)과 탐지 이후에 발사된 위협무기에 대한 명중확률($P_{H/D}$) 값을 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 각각의 확률값에 대한 분석은 아래에 설명하였다.

$$P_H = P_D \cdot P_{H/D} \quad (4)$$

3.1 탐지확률(Probability of detection, P_D)

탐지확률(P_D)은 적 탐지장비에 의해 아군의 함정이 탐지될 확률을 의미하며, 탐지를 위한 최소한의 탐지 한계점을 의미하는 Threshold to noise ratio(T/N)값과 레이더 반사단면적(σ)에 따른 RCS 신호레벨의 잡음 정도를 의미하는 Signal to noise ratio(S/N)값을 기반으로 산정한다(식 5).

$$P_D = [1 + \frac{2(T/N)(S/N)}{2 + (S/N)^2}]e^{-2(T/N)/(2+S/N)} \quad (5)$$

함정의 선체 및 의장 시스템은 복잡한 3차원 형상을 가지고 있고 반사체의 형상에 따라 각각 다른 레이더 반사단면적 값을 가지고 있기 때문에 엄밀한 계산이 필요하다. 엄밀한 RCS 계산 과정은 본 연구와는 별도로 수행되는 것이 합리적이라고 판단되므로, 함정 형상을 간략화하여 레이더 반사단면적을 계산한 방법(Otsin, 2005)을 이용하였다. 선체 및 장비의 형상을 네 가지로 간략하게 분류하였으며, 각 단면 형상에 따라 레이더 반사단면적은 Table 1에 정리한 간략 식을 이용하여 계산하였다.

Table 1의 레이더 반사단면적(σ) 값을 이용하여 S/N 값을 분석하며, 이 값은 신호에 포함된 불필요한 잡음의 수준을 나타내는 값(dB)이다. 즉, 레이더의 신호 대비 잡음의 비(Signal to noise ratio)를 의미하며, 레이더 단면적 값을 이용하여 산정하기 때문에 레이더 반사단면적 값에 비례한다(Michael, 2002). RCS 탐지 특성에 따른 S/N 값은 식 (6)에 의하여 정의할 수 있다. 여기서

Table 1 RCS calculation formula for simple shaped targets

	Radar cross section(σ)
Flat plate	$4\pi A^2/\lambda^2$ (A = Flat plate area)
Cylinder	$2\pi a l^2/\lambda$ (a = cylinder radius, l = length)
Sphere	πa^2 (a = radius)
Cone	$8\pi L^2 \sin a/9\lambda \cos^4 a$ (a = half cone angle, L = length)

(*) λ = The radar wavelength

P 는 레이더 첨두 전력(Radar peak power)으로 안테나 수신전력을 의미하며, R 은 타겟과 탐지 장비간의 거리, λ 는 레이더 신호의 파장(Wavelength of signal), k 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant)를 의미한다. 그리고 kTB_n 값은 잡음의 정도(Noise power)를 의미하며, G 는 안테나 수신율(Antenna gain factor), L 은 레이더 반사 신호의 손실계수를 의미한다.

$$S/N = \frac{PG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 R^4 FkTB_n L} \quad (6)$$

식 (7)은 본 연구에서의 T/N 값을 산정하는 식을 나타내고 있으며(Michael, 2002), 여기서 P_{fa} 는 탐지에 따른 오류(False alarm)에 대한 확률적 값을 의미한다. 탐지에 따른 오류는 레이더 수신 신호에서 잡음을 타겟으로 오인하거나 타겟 신호를 잡음으로 오인하는 경우 발생하게 되며, 이는 실선 실험(LFT&E, Live fire and evaluation)을 통해 파악할 수 있다. Ostin(2005)은 발사된 위협무기가 목표 대비 명중되는 거리상의 오차에 따라 3차원 공간상에서의 P_{fa} 를 Fig. 1과 같이 정의하였다. 본 연구에서는 Fig. 1을 참고하여 S/N 값에 따라 파악되는 2차원 상에서의 P_{fa} 값을 임의로 가정하였다.

$$T/N = -\ln(P_{fa}) \quad (7)$$

3.2 명중확률 (Probability of hit/detection, $P_{H/D}$)

명중확률은 적의 위협무기가 도달하여 타격될 확률을 의미하며, 위협무기의 특성에 따라 계산하여야 한다(Ball, 2003). 본 연구는 관통탄에 의한 단발(Single hit) 및 다발(Multiple hit) 피격을 대상으로 확률분포 기반의 2차원 명중확률을 가정하였다. 실제전장 환경에서는 위협체가 도달하더라도 오차거리(Miss distance)가 있으므로, 명중확률 분석 대상이 되는 함정의 표적면적(이하 피격면적)에 오차거리를 포함하도록 면적을 정의해야 한다.

단발(Single) 피격의 명중확률을 계산하기 위해서는 먼저 ①

Fig. 1 Probability of false alarm according to the probability of detection and signal-to-noise ratio(Ostin, 2005)

피격면적(Target area)을 정의한다. 이는 함정 전체면적(A_{Total} : Total area)중에서 특정 시스템의 피격 면적(T_a : Target area)을 의미한다. ②피격면적을 설정한 후에 함정의 길이(Length) 또는 깊이(Depth)방향의 피격위치에 따른 확률분포를 정의한다. 피격위치에 따른 확률분포는 실제 LFT&E을 통해 얻어지는 값을 이용하여야 한다. Fig. 2(a)는 함정의 길이방향에 따른 피격위치 분포를 정규분포로 가정한 것이다. ③피격 위치에 따른 확률분포를 정의한 후에 피격면적에 따른 확률밀도함수(Probability density function)의 면적을 명중확률로 정의하였다(Fig. 2(b)). 피격위치에 따른 확률 분포를 정규분포로 가정했을 때, 단발 피격에 대한 피격확률은 식 (8) ~ 식 (10)과 같이 정의할 수 있다. 여기서 길이 방향과 깊이 방향에 대한 변수를 각각 x, y 로 가정하였으며, $x_1 \sim x_2, y_1 \sim y_2$ 는 각 평면상에서의 피격면적 구간을 의미한다. 정규분포 기반의 함정 피격 형상에서 위협무기의 Target 식별에 대한 오차확률(Error probable)은 Driels(2004)의 저서를 참고하여 식 (11)과 같이 정의하였다. 오차확률을 비롯한 명중확률 산정 시 μ, σ 는 각각 해당 확률분포에서의 평균 및 표준편차를 의미한다.

$$PDF(x) \cdot PDF(y) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} P(x)dx \cdot \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} P(y)dy \quad (8)$$

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right] dx \quad (9)$$

$$P(y_1 < y < y_2) = \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{\sigma^2}\right] dy \quad (10)$$

$$Error\ Probable = (0.6745\sigma_x, 0.6745\sigma_y) \quad (11)$$

다발 피격에 의한 명중확률($P(Hit > 1)$)은 초기 발생되는 총 파편 수(K)와 해당 표적에 피격되는 파편 수(M)를 결정하고(식

Fig. 2 The probability distribution on the target

12), 해당 피격면적(T_a)에 피격되는 파편 수를 정의해야 한다 (Driels, 2004). 산정된 파편 수에 대하여 단발피격 명중확률(P_{single})을 적용하여 다발 피격($Hit > 1$)에 따른 명중확률을 산정하였다(Driels, 2004). 식 (12)에서 Range는 파편 발생지점과 타겟간의 거리를 의미하며, θ 는 파편의 입사각을 의미한다.

$$M = \frac{T_a}{Range^2 \cdot \theta} \cdot K \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P(Hit > 1) &= \sum_{n=1}^n (1 - P_{single})^{n-1} \cdot P_{single} \\ &= P_{single} \frac{1 - (1 - P_{single})^n}{1 - (1 - P_{single})} = 1 - (1 - P_{single})^n \end{aligned} \quad (13)$$

3.3 피격성 분석 예

전장이 80m이고 높이가 3m인 함정이 Table 2의 속성정보를 가진 레이더에 의한 탐지가 예상된다고 가정하여, 추진시스템을 포함하는 임의 면적에 대한 레이더 반사단면적 및 S/N 값을 산정하였다. 본 예시 모델에서는 선체에 계산의 용이성을 위해 선체에 탑재된 의장품을 제외한 선체의 측면 형상은 평판으로 가정하였으며, 레이더 반사단면적 값은 식 (14)와 같이 계산하였다. 그리고 S/N 값은 식 (15)와 같이 산출하였다.

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} = \frac{4\pi(240)^2}{1.2^2} = 502400, \quad (\text{wavelength} = 1.2) \quad (14)$$

$$S / N = \frac{PG^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 FkTB_n L} = 12.81 \quad (15)$$

탐지확률(P_D)은 식 (15)의 S/N 값과 식 (16)의 T/N 값을 기반으로 식 (17)과 같이 산정하였다. 여기서 T/N값은 Fig. 1을 참고하여 $P_{fa} = 0.01$ 로 가정하였다.

$$T / N = -\ln(0.01) = 4.605 \quad (16)$$

$$P_D = [1 + \frac{2(4.065)(12.81)}{2 + (12.81)^2}]e^{-2(4.065)/(2 + 12.81)} = 0.942 \quad (17)$$

명중확률($P_{H/D}$)과 최종적인 피격확률(P_H) 계산은 함정의 형상 정보와 파편 수 및 입사각(θ) 등을 이용하여 계산하였으며, 추

Table 2 The attribute data for assumed radar

	Attribute data	Unit
Receiver sensitivity	1E-14	W(m)
Operation frequency	0.25	Ghz
Distance from radar	25000	m
Angle	18	θ
Noise factor	2.5E-16	w
Temperature	195	F

Fig. 3 A senario for fragment hits on target area

진 시스템을 포함하는 임의의 영역($T_a = 300m^2$)에 대하여 비접촉 근거리 폭발에 따른 다발 피격에 의한 피격확률을 계산하였다(Fig. 3). 계산 모델에서 함정 길이 및 깊이방향의 피격확률은 정규분포로 가정하였으며, 다발 피격 시 명중확률 계산을 위하여 단발 피격 시 명중확률(P_{single})은 약 34.7%로 가정하였다(Driels, 2004). Fig. 3의 시나리오에 따라 임의의 탄이 함정 외판에서 80m 떨어진 위치에서 요격되어 폭발한 상황에서 총 70개의 파편이 생성되어 목표 영역에 40° (Degree)의 입사각을 가지고 피격된다고 가정했을때, 타겟영역(T_a)에서 파편의 피격 수 및 명중확률은 각각 식 (18), 식 (19)와 같이 계산할 수 있다. 그리고 최종 피격확률은 식 (20)과 같이 약 81%로 예측되었다.

$$M = \frac{300}{80^2 \times 0.7} \cdot 70 = 4.69 \quad (18)$$

$$P_{Hit} = 1 - (1 - 0.347)^{4.69} = 0.864 \quad (19)$$

$$P_H = 0.942 \times 0.864 = 0.814 \quad (20)$$

4. 취약성(Vulnerability, $P_{K/H}$) 분석

함정의 취약성은 위협무기의 피격에 의해 발생하는 손상에 대하여 함정이 견딜 수 있는 능력으로 정의한다(Ball, 2003). 함정 취약성 평가를 수행한 연구는 Ball(2003)의 항공기 취약성 해석 모델을 기반으로 Kim et al.(2011), Kim and Lee(2012)가 제시한 취약면적 기반의 비 폭발성 다발 관통탄 및 파편에 의한 함정의 취약성 평가 사례로부터 찾을 수 있다. 취약성 분석에 널리 사용되는 취약면적 기반의 해석 방법은 함정의 초기 및 기본 설계 단계에서 활용할 수 있는 간이 해석 방법이다. 그러나 취약면적 기반의 평가법은 구성품의 취약 확률 값 또는 취약 면적과 각 구성품 별로 피격 여부가 이미 알려진 상태에서 계산이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 Kim et al.(2011)이 제시한 취약성 분석 절차 모델을 기반으로 탑재된 내부 시스템에 대한 함정의 취약성 분석 절차를 간략하게 제시하고자 한다. 함정의 취약성을 분석하는 과정은 크게 임무수행에 따른 함정 내 시스템 및 주요 구성품(Critical component) 정의, 그리고 위협

무기 별 주요 구성품의 취약확률 산정의 단계로 구별된다.

4.1 주요 구성품(Critical component) 정립

함정의 내부 구성품은 단발의 피격(Hit)에 의하여 손상을 입을 수 있으나, 손상된 모든 구성품이 함정의 임무수행에 영향을 미치는 것은 아니다. 따라서 함정의 임무수행 능력과 관련되고 손상 시 취약정도(Kill level) 및 생존성에 영향을 미치는 구성품들을 대상으로 주요 구성품(또는 핵심 구성품)을 정의하였다. 본 연구에서는 함정 내에 탑재된 모든 시스템들에 대하여 FMEA(Failure mode and effect analysis), FTA(Fault tree analysis) 분석을 통해 함정의 임무(Mission), 손상정도(Kill level)에 영향을 미치는 구성품들을 대상으로 주요 구성품(Critical component)을 정의하였다(Fig. 4).

4.2 취약확률 계산

취약확률은 피격 무기의 효과도 특성 및 주요 구성품의 취약면적 등을 고려하여 계산하였다. 위협 무기의 효과도는 크게 폭발 압력과 파편의 관통 여파로 구분할 수 있다. 본 연구는 파편에 의한 관통 효과만을 고려하였으며, 관통선(Shotline)을 적용하여 Kim and Lee(2012)의 취약성 분석 절차를 기반으로 취약성을 평가하였다. 비접촉 근거리 폭발 시 발생하는 파편 관통 위협을 가정하여 취약 확률을 계산하였다.

시스템 취약성을 분석하기 위하여, 주요 구성품을 정의하고 각 구성품에 피격되는 파편의 수를 결정하였으며 피격선에 따른 관통해석을 수행하여 손상된 주요 구성품들을 파악한 후에 손상된 구성품을 대상으로 취약확률을 계산하였다. 본 연구에서는 고장형태 영향분석(FMEA, FTA) 기법을 통해 추진 시스템의 주요 구성품을 Fig. 5와 같이 구성하였다. 그리고 식 (19)의

파편 피격수를 기반으로 각 주요 구성품의 피격 수를 가정하였다(Table 3). 각 구성품에 따른 파편 피격 수는 주요 구성품이 가진 면적의 비율에 따라 결정하였다.

이후 피격선(Shotline)에 위치한 주요 구성품을 대상으로 관통식(Penetration equation)을 적용하여 관통여부를 판단해야 한다. 본 예제는 앞서 결정한 파편 수를 바탕으로 Fig. 6와 같이 기관실을 관통하는 방향의 피격선을 가정하고 관통식을 적용하여 관통 여부를 판단하였다. 관통식은 FAA(2005)에서 정의한 관통을 일으키는 최소한의 속도인 탄도한계(Ballistic limit) 계산식과 JTCG/ME(1985)에서 정의한 잔류 속도 식 (Residual velocity equation)을 적용하였다. 식 (21)은 관통이 발생하는 최소한의 속도(Velocity)를 의미하며, 탄이 가진 속도가 V_{50} 값 이상이면 관통이 발생하게 된다. 그리고 관통 이후에 탄에 잔류하고 있는 속도는 식 (22)에 의해 계산할 수 있다(Kim et al.,

Fig. 5 The critical components for propulsion system

Fig. 4 Determination of the critical component

Table 3 Hit number of fragment on each critical component

Critical component	Presented area(m ²)	Hit number
Engine 1	60	0.938
Engine 2	60	0.938
Fuel oil tank	50	0.781
Gear box 1	10	0.156
GearBox 2	10	0.156
Propeller 1	20	0.313
Propeller 2	20	0.313
The rest	70	1.1
Total	300	4.69

2012). 따라서 이 식을 통해 탄의 이동 속도가 탄도한계 속도 이상일 때 관통이 발생된다고 판단하고 관통 이후에 탄에 잔류하고 있는 속도를 산출하였다.

이후 피격선(Shotline)에 위치한 주요 구성품을 대상으로 관통식(Penetration equation)을 적용하여 관통여부를 판단해야 한다. 본 예제는 앞서 결정한 파편 수를 바탕으로 Fig. 6와 같이 기관실을 관통하는 방향의 피격선을 가정하고 관통식을 적용하여 관통 여부를 판단하였다. 관통식은 FAA(2005)에서 정의한 관통을 일으키는 최소한의 속도인 탄도한계(Ballistic limit) 계산식과 JTCG/ME(1985)에서 정의한 잔류 속도 식 (Residual velocity equation)을 적용하였다. 식 (21)은 관통이 발생하는 최소한의 속도(Velocity)를 의미하며, 탄이 가진 속도가 V_{50} 값 이상이면 관통이 발생하게 된다. 그리고 관통 이후에 탄에 잔류하고 있는 속도는 식 (22)에 의해 계산할 수 있다(Kim et al., 2012). 따라서 이 식을 통해 탄의 이동 속도가 탄도한계 속도 이상일 때 관통이 발생된다고 판단하고 관통 이후에 탄에 잔류하고 있는 속도를 산출하였다.

$$V_{50} = \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot G_d \cdot t^2}{m \cdot \cos^2(\theta)}} \quad (21)$$

$$V_{residual} = \frac{\sqrt{V_i^2 + V_{50}^2}}{1 + \frac{\rho \cdot A_p \cdot t}{W \cdot \cos(\theta)}} \quad (22)$$

함정 내부의 구성품은 선체 내에 존재하므로, 우선 파편이 선체 외판을 관통하는지 여부를 파악하여야 한다. 관통식을 적용하여 탄의 잔류 속도가 더 이상 구성품을 관통할 수 없는 속도에 이르기까지 반복적으로 분석하여 손상을 입은 장비를 파악하였으며, Fig. 6에 관통력 분석 예제를 보였다. 탄두의 초기 충돌 속도는 300m/s로 가정하였으며, 선체 외판과 엔진 외벽의 두께는 각각 15mm, 5mm로 가정하였다. 본 예제에서 외판관통에 필요한 탄도한계 속도는 165.6m/s이므로 300m/s로 이동하는 탄두에 대하여 선체 외판에서의 관통이 발생하게 되고, 관통 후 잔류속도는 42.8m/s로 산정되었다. 그리고 외판 관통 후에 탄이 마주치는 구성품은 엔진①이 되는데 잔류속도 42.8m/s에 대한 엔진①의 관통 여부를 판단한 결과 초기 엔진 외벽은 관

Fig. 6 Penetration analysis on critical component by penetration equation

통될 수 있지만 엔진 내부의 복잡한 구성으로 인해 탄두가 엔진 내부에 박히게 되고 더 이상 관통이 일어나지 않는 것으로 파악되었다. 따라서 Fig. 6의 임의 피격선에 대한 손상 구성품은 엔진①로 결정할 수 있다.

주요 구성품 취약확률은 관통식을 적용하여 손상된 구성품을 대상으로 계산하게 된다. 본 절의 예제는 잉여(Redundant) 구성품을 포함하고 있으므로, 다중 피격 해석 모델을 적용하여야 한다. 다중 피격에 의한 취약성 평가는 포아송(Poisson)방법을 적용하여 취약확률을 계산하였다(Kim et al., 2011). 취약확률 계산 시 잉여성(Redundancy)를 가진 장비가 비겹침(Non-overlap)으로 존재하는 시스템으로 가정하였기 때문에, i 번 구성 요소의 취약성(P_{K_i/H_i})을 고려하여 대상 시스템의 취약확률($P_{K/H}$)을 구하여야 한다(식 23, 식 24). 여기서 A_{vi} 는 i 번째 구성품의 취약면적을 의미한다.

$$P_K = 1 - e^{-E \cdot P_{K_i/H_i}} \quad < E = \frac{M}{A_c} \cdot A_p > \quad (23)$$

$$P_{K/H} = \sum_{i=1}^n P_{K_i/H_i} = \sum_{i=1}^n \frac{A_{vi}}{A_{total}} \quad (24)$$

Table 4는 본 연구에서 대상으로 삼은 주요 구성품의 취약확률을 계산한 예이다. 여기서 Fig. 6의 단일 피격선의 경우 엔진의 피격과 손상에 따른 함정 전체 취약 확률은 약 52.8%로 계산되었다. 이는 Redundant 구성품으로 인해 단일 피격(Single hit)에 의해 엔진 ①번이 손상되어 기능을 상실하였다고 하더라도 잉여 구성품인 엔진 ②번이 추진 능력을 지속할 수 있으므로 전체 취약확률이 높지 않은 것을 파악할 수 있다(식 25). 하지만 앞서 산정된 전체 피격 수에 대한 주요 구성품 취약확률의 경우 높게 상승하는 것을 확인할 수 있다(식 26). 이는 Shotline이 외판 관통 후 바로 구성품으로 이어지는 배치를 가정하였기 때문에, Non-redundant 구성품인 연료 탱크의 취약확률이 높아지는 것에 대한 결과로 파악할 수 있다.

$$P_{K_engine1/H1} = 1 - e^{-4.69 \cdot 0.16} = 0.528 \quad (25)$$

$$P_{K_total/H} = 1 - e^{-4.69 \cdot 0.373} = 0.826 \quad (26)$$

Table 4 the example of P_{Ki}/h_i for critical component

Critical component	Presented area(m ²)	Vulnerable area(m ²)	P_{Ki}/h_i
Engine 1	60	48	0.16
Engine 2	60	48	0.16
Fuel oil tank	50	40	0.13
Gear box 1	10	8	0.027
Gear box 2	10	8	0.027
Propeller 1	20	16	0.053
Propeller 2	20	16	0.053
The rest	70	-	0.387
Total	300	184	0.373

5. 회복성(Recoverability, P_R) 분석

함정의 회복성은 피격된 후의 손상 회복 가능성 및 손상 통제 능력을 의미한다. 따라서 함정의 회복성은 선체의 안정성(Stability), 선체 잔류 강도 및 시스템의 손상 회복능력을 기준으로 판단하게 된다. 함정의 손상 시 회복능력을 확률로 표현하기 위해서는 충분한 LFT&E를 통해 회복능력을 정량적으로 분석할 수 있는 계산식을 확보하여야만 하며, 현재 육상 및 해상 그리고 공중 전투시스템에 대한 손상 후 회복능력을 확률로 표현한 연구 및 사례는 없는 것으로 파악된다. 본 연구에서는 회복성의 평가 지표로서 확률 값이 아닌 주요 구성품의 손상 회복 시간을 가정하였다. 따라서 회복성은 주요 구성품이 손상된 후에 시스템 회복에 필요한 평균 수리시간(MTTR, Mean time to repair)과 손상에 따른 고장 시간인 평균 고장 간격(MTBF, Mean time between failure) 값을 가정하여 분석하였다. 분석에는 RelxTM의 RAM(Reliability, Availability, Maintainability) 기능을 활용하였으며(Song et al., 2005), Fig. 7은 손상 후 평균 수

리시간을 계산한 예이다. 추진시스템의 주요 구성품 및 부품의 고장을 및 평균 수리시간을 회복성 지표로 평가하였다.

6. 함정 통합 생존성(Survivability, $P_{survive}$) 분석

앞서 언급한 개별 생존성 구성 요소인 피격성, 취약성, 회복성을 연결함으로써 아래와 같이 생존성 분석 절차를 정의하였다. (1) 함정이 적 신호탐지장비에 노출되어 피격이 된다고 가정하여 레이더 반사 단면적에 따른 피격확률을 산출하였다. (2) 손상이 예상되는 시스템 및 구성품의 취약 면적으로 바탕으로 취약 확률을 평가하였다. (3) 회복성은 확률적인 지표 대신 시스템 및 구성품의 손상 회복하는 시간을 지표로 분석하였다.

예를 들어, 앞서 생존성 구성요소에 대한 분석 시 언급한 예시모델의 경우 피격확률이 81.4%이고 모든 피격 지점에 대한 전체 시스템 취약확률이 82.6%라면, 치명도(Killability)는 식 (27)과 같이 약 67.2%로 파악할 수 있으며, 생존확률은 식 (28)과 같이 32.8%로 산정할 수 있다. 그리고 회복성은 현재 연구단계에서 함정 회복성의 지표를 확률론적인 방법이 아닌 회복시간을 기준으로 접근하였기 때문에 회복성 지표는 생존 확률 계산과는 다르게 함정 시스템 손상 시 회복할 수 있는 시간으로 평가하였다. 이는 향후 회복성 지표를 확률로 표현할 수 있는 방법을 강구하여 생존확률 계산식에 반영할 예정이다.

$$P_{Killability} = P_H \cdot P_{K/H} = 0.814 \times 0.826 = 0.672 \quad (27)$$

$$P_{Survive} = 1 - [0.672] = 0.328 \quad (28)$$

7. 결 론

본 연구는 함정의 통합 생존성 해석법을 목적으로 생존성을 구성 요소인 피격성, 취약성, 회복성의 순차적 분석 절차를 제

Fig. 7 The example of recoverability assessment for the damaged component

시하였으며, 이들을 통합한 생존성 분석 절차를 간략한 예를 통하여 설명하였다. 특히 피격성과 취약성은 피격확률과 취약확률과 같은 확률론적인 척도로 제시하였으며, 회복성은 손상 회복시간으로 정의하였다. 그러나, 실제 함정의 생존성 분석을 위해서는 보다 다양한 성능 지표와 분석 기법을 적용하여 평가해야 한다. 피격성의 경우 RCS 이외에 적외선 특성, 수중 방사 소음 특성(URN) 등을 반영하여 피격 확률을 제시하여야 하며, 폭발탄의 압력 및 파괴 등에 의한 취약 확률식 등이 취약성 평가에 추가로 반영되어야 한다. 또한 회복성은 손상 회복시간 이외에 승조원의 회복 능력 훈련 정도, 침수에 따른 복원성, 화재 통제 능력 등에 대한 회복능력이 반영되어야 한다. 또한 본 연구를 진행하는데 있어 임의로 가정한 탄두 진행방향(Shotline)과 피격위치를 정식화할 수 있는 알고리즘이 추가되어야 한다. 향후 연구로는 앞서 언급한 다양한 생존성 분석 이론을 보완하고 여러 피격 시나리오를 고려한 M&S(Modeling & Simulation) 기반의 통합 생존성 분석 방법을 연구할 예정이다.

후 기

이논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업(계약번호 UD120019OD) 및 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학의 부 해양플랜트특성화대학의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ball, R.E., 1985. The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design. 1st Edition, New York.
- Ball, R.E., 2003. The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design. 2nd Edition, New York.
- Ball, R.E., Calvano, C.N., 1994. Establishing the Fundamentals of a Surface Ship Survivability Design Discipline. Naval Engineers Journal, 106(1), 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), 53-58.
- 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 Society of Naval Architects of Korea, Changwon Republic of Korea, 330-339.
- Driels, M., 2004. Weaponing: Conventional Weapon System Effectiveness. AIAA Education Series, Virginia.
- Federal Aviation Administration(FAA), 2005. Advanced Aircraft Materials-Engine Debris Penetration Testing. Office of Aviation Research and Development, Washington, D.C.
- JTCG/ME, 1985. Penetration Equations Handbook for Kinetic-Energy Penetrators(U). Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness(Anti-Air), JTCG/ ME-77-16.
- Kim, K.H., Kim, J.H., Choi, T.M., Kim, Y.H., Cho, D.S., 2009. A Study on a Dynamic Radar Cross Section Analysis Technique for a Surface Warship. Journal of Ocean Engineering and Technology, 23(6), 77-81.
- 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), 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), 254-263.
- 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, 824-840.
- Lapierrea, F.D., Marcel, J.P., Acheroy, M., 2007. Design of an Infrared Ship Signature Simulation Software for General Emissivity Orofiles. 2nd International IR Target Background Modeling and Simulation Workshop Toulouse, France.
- Lillis, J.A., 2002. Analysis of the Applicability of Aircraft Vulnerability Assessment and Reduction Techniques to Small Surface Craft. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- Michael, O.K., 2002. Radar Systems, Peak Detection and Tracking. Oxford, Newnes.
- Otsin, N., 2005. Development of a Combat Aircraft Operation and Cost-Effectiveness Design Methodology. The degree of doctor, Granfield College of Aeronautics, Granfield University.
- Park, J.K., 2006. A Study of Establishing the Ship Susceptibility Design for Ship Survivability. The Degree of Master, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chung-Nam National University, Dae-Jeon.
- 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(1), 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, 151-162.
- Song, J.Y., Lee H.S., Jang, J.S., Jung, J.Y., Ha, S.D., 2005. Failure Mode and Effect Analysis, Criticality Analysis. 1st Edition, Kyo-Woo-Sa, Seoul.