

탄두의 관통 효과를 고려한 함정 취약성 평가 절차에 관한 기본 연구

김광식¹·이장현²†

인하대학교 대학원 조선해양공학과¹

인하대학교 조선해양공학과²

Vulnerability Assessment Procedure for the Warship Including the Effect of Shotline and Penetration of Fragments

KwangSik Kim¹·JangHyun Lee²†

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering College of Engineering, Graduate school, INHA University¹

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering College of Engineering, INHA University²

Abstract

The survivability of warship is assessed by susceptibility, vulnerability and recoverability. Essentially, a vulnerability assessment is a measure of the effectiveness of a warship to resist hostile weapon effects. Considering the shot line and its penetration effect on the warship, present study introduces the procedural aspects of vulnerability assessments of warship. Present study also considers the prediction of penetration damage to a target caused by the impact of projectiles. It reflects the interaction between the weapon and the target from a perspective of vulnerable area method and COVART model. The shotline and tracing calculation have been directly integrated into the vulnerability assessment method based on the penetration equation empirically obtained. A simplified geometric description of the desired target and specification of a threat type is incorporated with the penetration effect. This study describes how to expand the vulnerable area assessment method to the penetration effect. Finally, an example shows that the proposed method can provide the vulnerability parameters of the warship or its component under threat being hit through tracing the shotline path thereby enabling the vulnerability calculation. In addition, the proposed procedure enabling the calculation of the component's multi-hit vulnerability introduces a propulsion system in dealing with redundant Non-overlapping components.

Keywords : Survivability(생존성), Vulnerability(취약성), FMEA: Failure Mode and Effect Analysis(고장모드분석), FTA: Fault Tree Analysis(결함수 분석), Penetration equation(관통식), COVART(Computation of Vulnerable Areas and Repair Time), Shotline(피격선)

1. 서론

1.1. 연구 배경

함정은 전투상황에서 위협 무기에 노출되어 피격 받을 경우 전투 체계 및 선체 구조의 손상을 겪는다. 이러한 전투 상황에서 함정의 기능과 임무를 수행할 수 있는 가능성을 함정의 생존성으로 정의한다. 함정의 생존성은 일반적으로 피격성(Susceptibility), 취약성(Vulnerability), 회복성(Recoverability)으로 구성된 세 가지의 확률적 지표를 이용하여 정량적으로 표현한다(Ball, 1985). 특히, 취약성 또는 취약확률은 적대적 위협 무기의 피격을 받았을 경우에 함정이 가진 기능과 임무 수행능력을 상실할 수 있는 가능성을 의미한다. 정확한 취약성 평가는 실선 실험을 통해서 장비 및 의장 시스템을 이루는 구성품의 취약면적 또는 취약확률을 얻는

것이 바람직하지만(Bloom, et al., 1994), 비용을 감안하여 이론적 절차를 통해 정성적인 평가를 수행하는 것이 일반적이다. 함정의 취약성 분석을 위한 이론적 토대는 Ball (2003)이 제시한 취약면적 기반의 항공기 취약성 분석 방법에서 찾을 수 있다. Ball and Calvano (1994)는 항공기 생존성 분석을 위한 모델을 함정에 적용하기 위한 기초적인 절차만 간략하게 소개하는 데 그쳤다. 또한 국내에서도 함정 생존성과 관련된 요소기술들이 발전하고 있으나, 적용 가능한 취약성 분석 절차가 필요한 실정이다(Kim, et al., 2011). Lillis (2002)는 취약면적 기반의 항공기 취약성 해석 모델을 사이클론급 경비정 (Cyclone-class patrol craft)의 취약성 분석에 적용함으로써 항공기 취약성 모델을 함정에도 적용할 수 있음을 증명하였으며, Kim, et al.(2011)도 취약면적을 기반으로 비 폭발성 다발 관통탄 및 접촉 폭발탄의 파편에 의한 함정의 취약성 계산 절차와 예제를 제시하였다. 취약면적 기반 해석 방법은 함정의 초기 및 기본 설계 단계에서 활용할 수 있는 간

이 해석 방법이다. 그러나 취약면적 기반의 평가방법은 각 구성품의 취약 확률 값 또는 취약 면적과 각 구성품 별로 피격 여부가 이미 알려진 상태에서 계산이 이루어져야 하는 제약 조건을 가지고 있다. 또한 폭발 압력(Blast pressure) 및 파편 관통(Fragment penetration) 과 같은 무기 효과도에 따라서 각 구성품의 피격 여부를 반영할 수 있어야 한다(Kim, et al., 2011; Driels, 2004). 즉, 취약면적 기반 모델은 각 구성품의 피격 여부를 판단하는 과정이 추가되어야 한다.

본 연구는 취약면적 기반의 평가 절차에 탄두 특성에 따른 관통 효과를 반영하고자 한다. 피격선(shotline) 별로 관통자(Penetrator)에 따른 각 구성품의 피격 여부를 판단하기 위한 절차를 제시함으로써 취약 면적 기반 방법을 개선하고자 한다. 다만, 피격선을 가진 파편의 관통 효과를 대상 무기로 가정하였다.

1.2. 관련 연구

Driels (2004)는 무기 효과도와 피격선을 고려하여 Ball (2003)이 제안한 취약면적 기반 모델을 개선시켜 COVART (Computation of Vulnerable Area Tool) 모델을 제시하였다. COVART 모델은 목표물 표면에 피격선을 생성시키고, 각 피격선 별로 관통 효과에 따른 구성품의 취약 확률을 고려하여 전체 취약성을 평가한다. 이 때 상용 프로그램인 FASTGEN(Fast shotline generator) 또는 BRL-CAD을 이용하여 3차원 CAD 모델에 피격선을 중첩시켜 취약성 평가에 필요한 입력 값을 생성시킨다(ITT Corporation, 2010). FASTGEN은 항공기 피격 예측 모델로서 취약성 분석에 필요한 피격선 데이터를 생성하는 기능을 제공하고 있다(SURVIAC, 2011). 피격선을 생성하는 방법은 특정 방향으로부터 표적을 통과하는 평행선을 투사하도록 하고, 이와 교차하는 내외부 구성품을 파악하도록 한다. 이를 위해서 구성품을 삼각형, 원, 직육면체 등과 같이 단순화된 형상으로 표현한다. COVART 모델은 미국 국방성의 항공기 취약성 분석에 적용되고 있으나, 원천 기술은 비공개되고 있다. 상용화된 프로그램으로는 FOI(Swedish Defence Research Agency)에서 개발한 AVAL(Assessment Of Vulnerability And Lethality), QinetiQ사에서 개발한 Survive가 있으며, 취약면적 기반의 모델과 피격선 모델을 동시에 고려하고 있는 것으로 판단된다(Pugh, 2010). Shotline에 따른 피격 지점에서 관통 효과는 파편과 입사체의 질량, 속도 등을 고려하여 실험 또는 비선형 유한요소해석 등이 필요하다(Graswald, et al., 2010; Gama & Gillespie, 2011). 그러나 유한요소해석 등에는 많은 계산시간과 모델링의 어려움이 있기 때문에, 관통식으로 주어지는 실험식을 이용하여 파손 정도를 파악하는 것이 현실적이다(JTCG/ME, 1985; Lynch, et al., 1997; U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2005). Pei, et al. (2006)과 Pei, et al. (2009)는 항공기 취약성 분석에 피격선과 관통식을 이용한 절차와 사례를 제시하였다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 취약면적 기반의 취약성 평가 방법은 탄두 특성에 따른 위협무기의 진전을 고려하지 않은 방법이

며, 본 논문은 취약면적 기반의 함정 취약성 해석 절차에 피격선과 관통식을 적용시킴으로써 취약성 평가 절차를 보완하였다. 위협무기체계의 효과도 특성은 Friedman (2006)이 제시한 값을 이용하였으며, JTCG (2001)의 M&S (Modeling & Simulation) 데이터와 미 연방 항공국(FAA: The Federal Aviation Administration)에서 수행한 실선 실험인 LFT&E(Live Fire Test and Evaluation)의 결과 데이터를 활용하였다. 또한, 취약성 평가의 주요 절차는 취약면적 방법과 COVART 방법을 결합하여 적용하였다. 이 과정에서 주요 구성품 (Critical component)을 정립하고, 취약성 확률 계산하는 절차 및 예제를 제시하였다.

2. 취약성 평가 절차

함정의 취약성은 피격 시 위협무기의 영향에 대하여 견디는 능력이 부족한 정도를 나타낸다. 따라서 취약성 감소는 위협무기에 의한 손상 가능성 저감과 생존성의 향상을 의미한다(Kim, et al., 2011; Ball & Calvano, 1994). 본 장에서는 함정의 취약성 평가 절차를 간략하게 정리하고자한다. 함정의 취약성을 파악하기 위해서는 위협 무기 체계 분석, 주요 구성품 정립, 구성품의 취약면적 가정, 위협무기의 탄두 특성에 따른 관통 여파에 대한 분석, 그리고 취약성 계산 과정 등이 필요하다(Table 1). 그 과정은 크게 (1)위협 무기 체계 분석, (2)주요 구성품 선정, (3) 취약성 계산의 세 단계로 구별된다. 각 단계 별로 적용되는 방법 및 순서를 Fig. 1에 도시하였다.

Table 1 The procedure for vulnerability assessment

Procedure	Definition	Consideration
(1) Weapon System Analysis	Analysis threat	Warhead, Mission & Kill Type
(2) Critical Component	Define the critical component	Mission-Function-System-Component
(3) Vulnerability Assessment	Vulnerability assessment for critical component	Hit number, Penetration Equation

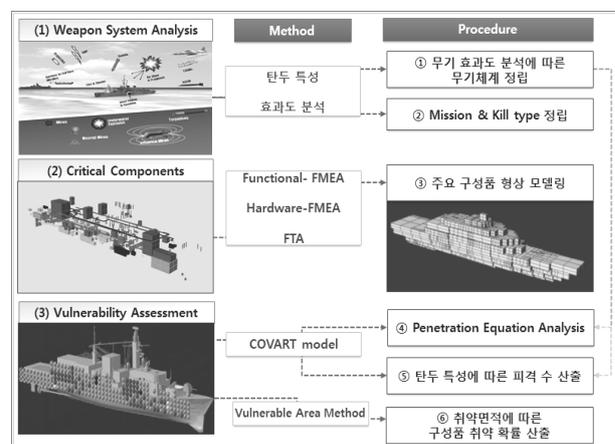


Fig. 1 Procedure for vulnerability assessment of warship

2.1. 위협 무기 체계 정립

위협 무기의 효과도, 파괴 특성과 탄두 특성 등에 따라 분류하는 단계이다. 즉, 탄두 특성, 파괴 특성 및 효과도가 동일한 위협 무기 체계 별로 모델링하는 단계이다. 본 연구에서는 어뢰와 같은 수중무기를 제외한 해상 무기를 대상으로 효과 특성에 따라 무기 체계를 분류하였다(Fig. 2). 무기 체계의 성능 및 속성은 Friedman (2006)이 제시한 함정의 위협 무기 체계를 참조하였다. 무기 효과는 크게 폭발에 의한 충격파와 가스구체 압력파, 그리고 관통력에 의한 손상으로 구분할 수 있다 (Lee, et al., 2007). 충격파와 압력파에 의한 구조 손상이 함정에 치명적이지만, 효과도 분석에 많은 계산시간과 해석이 필요하므로, 본 연구는 우선 관통에 의한 효과만을 고려하여 예제를 정립하고자 한다.

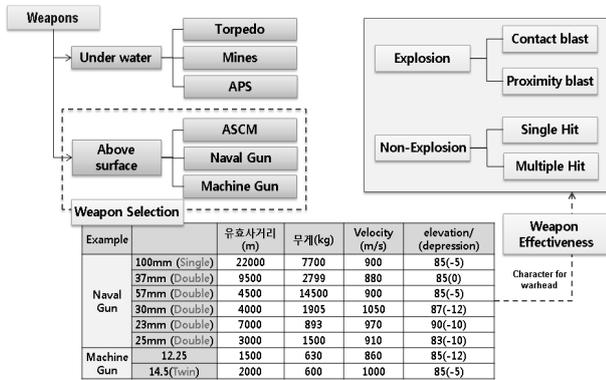


Fig. 2 Classification of weapon system based on the effectiveness (Modified from Kim, et al. (2011))

다음 단계는, 피격 후 함정 또는 구성품에 손상이 발생할 경우에 함정의 임무 수행 정도에 따른 취약 정도(Kill Level)를 정의하여야 한다. 본 연구에서는 함정이 가진 임무는 기능적인 역할을 기준으로 크게 두 가지로 가정하였다. 첫째는 ‘항해(Navigation)’ 기능이고, 다른 하나는 각 함정에 부여되는 전투 및 탐지 등의 ‘설계 임무(Design Mission)’로 정의하였다. 함정이 피격된 후에 임무의 수행 정도에 따라 취약 정도(Kill Level)를 5가지로 나누어 정의하였다 (Table 2).

Table 2 Definition of kill level

Kill Level	Definition
Attrition Kill	Warship damage that prevents it from returning to base
Mission Abort Kill	Possible warship damage that prevents an ingressing warship
Possible Mission Abort kill	Warship damage that prevents an ingressing warship
Mission Denial Kill	Warship damage that prevents an navigate abilities
Possible Mission Denial kill	Possible warship damage that prevents an navigate abilities

2.2 주요 구성품 (Critical component) 정립

함정의 구성품은 피격(Hit)에 의하여 손상을 입을 수 있으나, 손상된 모든 구성품이 함정의 임무수행에 영향을 미치는 것은 아니다. 따라서 손상되었을 경우 Kill Level에 영향을 미치는 것만을 주요 구성품 (또는 핵심 구성품)으로 정의하며, 취약성 및 생존성에 영향을 주는 것으로 가정한다. 주요 구성품 정립 과정은 Table 3에 요약한 것과 같이 손상 모드 분석 (FMEA), 결함수 분석 (FTA)를 거쳐서 주요 구성품을 결정한다. Fig. 3은 주요 구성요소를 결정한 후에 진행되는 취약성 평가 절차에 필요한 데이터 및 생성 과정을 간략하게 표현하고 있으며, 각 구성 요소의 취약 확률은 LFT&E를 통하여 이미 주어진 것으로 가정하였다.

Table 3 FMEA and FTA analysis for components of warship

Procedure (Method)	Input	Output
(1) Failure mode and effect analysis to function of component	Mission & Function	Integrated FMEA Table (Functional + Hardware)
(2) Failure mode and effect analysis to component	SWBS(*) for warship	
(3) Fault tree analysis using Integrated FMEA Table	Integrated FMEA Table	Fault Tree
(4) Define the critical component	FMEA Table FTA Tree Kill Mode	Critical Component

(*) SWBS: System Work Breakdown Structure

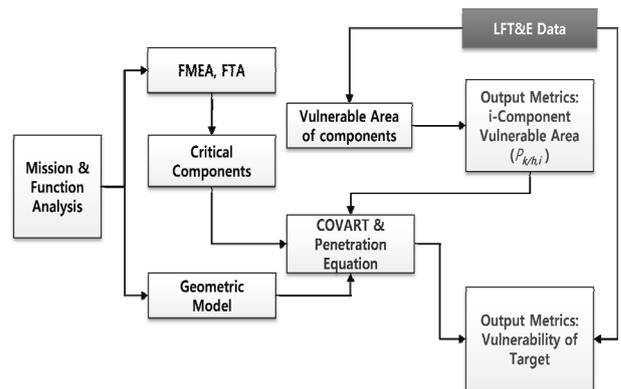


Fig. 3 Procedure FMEA and FTA followed by vulnerability assessment

(1) 기능 손상모드 분석 (Functional FMEA): 함정을 구성하는 모든 시스템 및 구성품의 고장 및 손상 모드 분석 과정이다. 본 연구에서는 손상모드 분석을 크게 두 가지 단계로 나누어 정의하였다. 그 중 첫 번째로 기능 손상모드 분석은 함정의 임무를 수행하는데 필요한 기능(Function)들의 손상모드 분석이다. 이 단계에서

수행하는 FMEA 는 함정의 주요 기능, 기능과 관련된 시스템 및 구성품을 정의한다. Fig. 4는 몇 개의 기능과 추진 시스템을 대상으로 수행한 기능 손상모드 분석 결과의 일부를 설명하고 있다. FMEA는 대상 시스템 구성과 고장 유형에 따른 기능 요소 및 장비에 대하여 단계 별로 수행하여야 하지만, 이는 매우 광범위한 분석이 필요하기 때문에 본 연구에서는 Fig.4에 보인 것과 같이 추진기 시스템의 일부 구성 요소에 대해서만 수행하였다.

Functions		Propulsion SYSTEM					
		Engine	Fuel oil tank	Oil Pipe	shaft	Gear box	Propeller
General	Concrete						
	Supply oil	Fuel oil on oil filter	X	X			
Generating propulsion power	Supply oil through pipe		X	X			
	supply fuel oil through injector	X		X			
	Generate propulsion power	X			X		
Reduce number of revolution	Provide controlling	X			X	X	X
	Operate shaft line(1)				X		
	Gear box(input)				X	X	
	Reduce number of revolution					X	
Transmit propulsion power	Gear box(output)				X	X	
	Operate shaft line(2)				X		
	Operate Hub on propeller				X		X
	Operate propeller				X		X

Fig. 4 Functional FMEA for propulsion system

(2) 구성품 손상모드 분석 (Hardware FMEA): 이 단계는 기능, 의장 시스템의 구성품, 고장 유형, 그리고 고장에 따른 효과 및 여파를 분석한다. 함정의 구성품들에 대한 고장모드 분석을 위해서는 함정의 SWBS(System Work Breakdown Structure)에 정의된 구성품을 고려하여 고장 및 손상모드를 분석하여야 한다. Fig. 5는 함정의 SWBS 체계 일부를 보이고 있다. 본 연구에서는 SWBS 분류 체계 중 추진시스템의 일부 구성품을 가정하여 고장 및 손상 모드(FMEA) 해석을 수행하였으며, 이 결과를 Fig. 6에 정리하였다. FMEA를 수행 절차는 Ball (2003)과 Xu, et al. (2002)가 제시한 방법을 이용하였으며, Fig. 6은 추진시스템을 구성하는 구성품이 피격으로 인하여 손상을 받았을 경우에 발생하는 고장 유형을 비롯하여 연관된 다른 구성품에 미치는 영향과 이에 따른 단계적인 고장 모드를 나타내고 있다. 예를 들어 기어 박스 피격에 따른 고장 발생 시 엔진에서 발생하는 동력을 프로펠러로 전달해 줄 수 없으며 이에 따른 고장여파는 추진력의 상실을 비롯하여 최종적으로는 조종불가 상태인 Mission Denial Kill Level로 이어지는 것으로 가정하였다. Fig. 7은 본 연구에서 수행한 임무, 요구기능, 시스템, 구성품 간의 관계를 정의한 모식도이다. 이러한 고장 및 여파에 대한 분석은 앞서 정의한 임무수행에 따른 Kill Level(Table 2)과 Fig. 4의 함정의 임무 수행에 필요한 기능들과 연관된 구성품의 분석표를 기반으로 결정할 수 있다. 하지만 FMEA 분석 자체는 정성적인 평가이기 때문에 FMEA 결과의 정량적인 검증을 위해서 FTA(Fault Tree Analysis) 분석이 뒤따라야 한다. FTA 분석을 위해서는 함정에 부여된 임무와 이를 수행하기 위해 요구되는 기능들(Functional-FMEA), 그리고 요구 기능을 수행하기 위한 시스템 및 구성품들간의 연관관계(Hardware-FMEA)를 분석해야 한다.

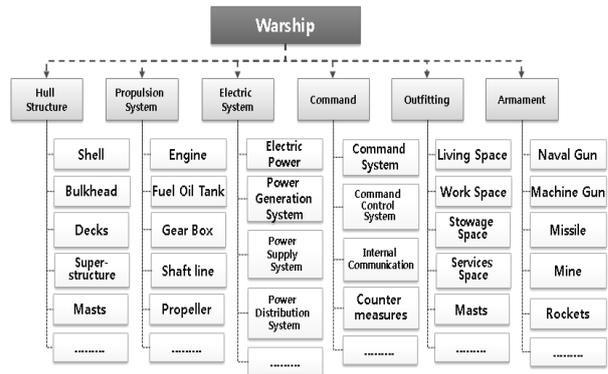


Fig. 5 SWBS(System Work Breakdown Structure) for warship

Item	General Function	Failure modes	Cause	failure effects			Failure detection Method	Kill Level	
1	Engine Module	Generating Propulsion Power	Stop	Fuel Oil System Failure	Engine Failure	Loss of Engine	Loss of Propulsion	Alarm	Mission Denial kill
			Stop	Exhaust Valve Failure	Engine Failure	Loss of Engine	Loss of Propulsion	On watch	Mission Denial kill
			Stop	Cooling System Failure	Engine Failure	Loss of Engine	Loss of Propulsion	Alarm	Mission Denial kill
			Stop	Lubrication System Failure	Engine Failure	Loss of Engine	Loss of Propulsion	Alarm	Mission Denial kill
			Stop	Crankshaft Failure	Engine Failure	Loss of Engine	Loss of Propulsion	On watch	Mission Denial kill
			Reduced Function	Piston Function failure	Engine Failure	Loss of Engine	Loss of Propulsion	On watch	Mission Denial kill
2	Fuel Oil Tank	Supply Fuel Oil	Non-supply oil	Empty oil	Non-supply Oil	Engine failure	Loss of Propulsion	On watch	Mission Denial kill
			Non-supply oil	Pipe line failure	Non-supply Oil	Engine failure	Loss of Propulsion	On watch	Mission Denial kill
3	Gear Box	Reduce number of revolution	No Power Transmittal	Transmission Failure	Gear Box Failure	No Power Transmittal	Loss of Propulsion	On watch	Possible Mission Denial kill
4	Shaft Line	Transmit Propulsion Power	No Power Transmittal	Damage by warhead	No Power transmittal	Propeller Failure	Loss of Propulsion	On watch	Possible Mission Denial kill
5	Propeller	Propulsion	Reduced Thrust	Damage by warhead	Reduces function	Reduces speed	Loss of Propulsion	On watch	Possible Mission Denial kill

Fig. 6 Hardware FMEA for propulsion system

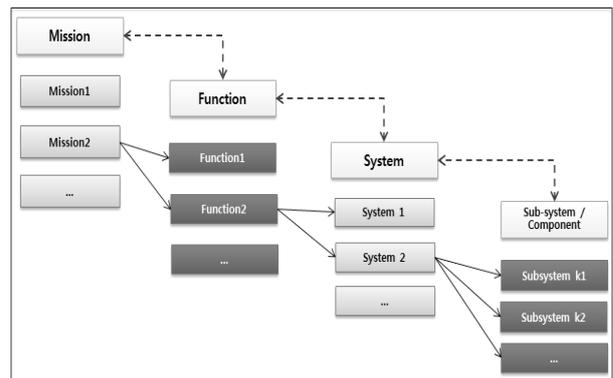


Fig. 7 Associated relationship between mission, function, system and component

(3) 결함수 분석(FTA): 고장 및 손상 모드 분석에서 각 구성품 손상에 따른 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 결함수 분석(FTA)을 수행한다. Fig. 8은 Fig. 4와 Fig. 6에 보인 FMEA 결과로부터 얻은 결함수 분석 결과이다. 각 사건 또는 구성품을 기본 사상 단위로 결함수를 구성하는데, 각각의 기본 사상에 대한 손상(고장) 확률 값과 연결 게이트 정보를 토대로 각각의 상위 사상 및 연관된 사상을 비롯하여 정상사상에 대한 손상 확률 값을

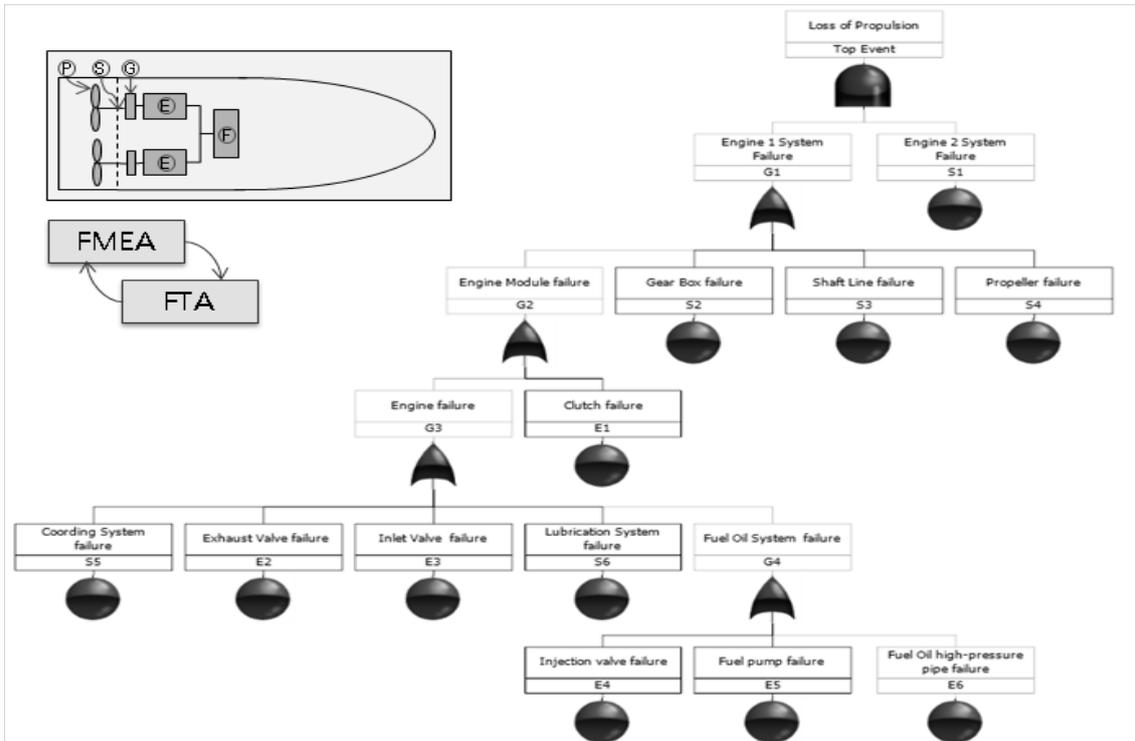


Fig. 8 Fault tree analysis transformed from FMEA

얻을 수 있다. 이는 각각의 기본 사상에 대한 손상 여파(Kill Mode)를 정량적으로 평가할 수 있으며, FTA 분석을 통해 얻어진 손상 여파(Kill Mode) 정보는 이전 단계인 FMEA Table과 비교하여 그 타당성을 판단하는데 활용하였다.

(4) 주요 구성품(Critical or vital component) 정립: 주요 구성품은 함정의 임무 수행과 연관된 구성품들을 결정하는 단계로서 FMEA와 FTA를 통해 얻은 결과로부터 함정 임무 수행과 연관된 기능들의 상실에 영향을 미칠 수 있는 구성품을 주요 구성품으로 정하였다. 다만, 본 연구는 문제의 단순화를 위해서 엔진구역 피격 시에 fuel oil system, engine, propeller, gear box 가 Mission Denial Kill Level에 영향을 미치는 주요 구성품으로 가정하였다.

2.3 취약확률 계산

취약확률은 피격 무기의 효과도 특성, 손상되는 주요 구성품의 취약 면적 등을 고려하여 계산한다. 위협 무기의 효과도는 크게 폭발에 대한 입력과 파편에 의한 관통 여파로 구분할 수 있다. 본 연구는 우선 파편에 의한 효과도만을 고려하였다. 앞서 언급한 것과 같이 취약면적 기반의 평가 방법에 관통 효과 및 관통선을 적용하여 취약성을 평가하는 절차를 제시하였다. 취약 확률 평가 과정은 Table 4에 요약하였다.

(1) 구성품 형상 정의: 구성품의 3차원 형상을 정의한다. 그러나 장비의 엄밀한 형상을 모두 반영하는 것은 어렵기 때문에, 간략화된 형상으로 표현하는 것이 적절하다. MOTISS™ (Chung &

Kwon, 2008a)는 구성품의 형상을 AABB(Axis Aligned Bounding Box) 방법으로 정의하고 있으며, Survive도 단순한 직사각형 형태로 구성품을 단순화시켜 표현하고 있다 (Chung & Kwon, 2008b). 본 연구도 구성품의 엄밀한 3차원 형상 대신 직사각형으로 단순화 할 수 있다고 가정 하였다.

(2) 피격 수 산출: 무기 효과도 특성에 따른 피격 수를 정하기 위해서는 위협 무기의 제원과 속성 정보가 필요하다. 본 연구에서는 Friedman (2006)의 자료로부터 무기체계의 속성을 이용하였다. 무기 특성에 따른 피격 수 계산과정은 다음 절에서 예제를 통해 설명하였다.

Table 4 Procedure of vulnerability assessment

Procedure (method)	Input	Output
(1) Define the area for critical component	Shape for component	Area
(2) Calculate the hit number on component	Weapon system	Hit Number
(3) Determine whether warhead penetrate or not	Penetration Equation	Damaged component
(4) Calculate the vulnerability	Vulnerable area	Vulnerability

(3) 관통 여부 판단: 이 단계에서는 피격선에 놓인 구성품의 피격 및 관통 여부를 평가하는 과정이다. Fig. 9는 피격선과 구성품 간의 교차 관계를 개념적으로 표현한 것이다. 그림에서 v_r, m_r 은 각각 입사체(Projectile) 또는 파편(Fragment)의 속도

및 질량을 의미하며, v_i, m_i 는 i -번 구성품을 관통한 후의 잔류 속도 및 질량을 의미한다. $p_{k/h,i}$ 는 i -번 구성품의 피격 시 취약 확률을 의미한다.

관통 기구(Mechanics)는 크게 플러그(plugging) 관통 모드와 피탈(petaling) 관통 모드로 구별하지만, 실제는 두 모드가 혼재한다. 전자는 Fig. 10에 보인 것과 같이 원통형 입사체에 의한 손상이며, 후자는 썩기형 입사체에 의한 손상을 의미하지만, 두 모드가 혼합되어 있다. 이러한 관통의 효과는 관통 물체의 크기, 형상, 질량, 재료 특성, 입사 속도, 피격선의 경사도 (obliquity), 투영 면적(Presented area)에 따라 달라진다. Fig. 11은 입사체와 목표와의 상호 위치 관계를 개념적으로 표현한 것이다. 각 피격체의 관통 특징은 비선형 충돌 해석 또는 실험을 통하여 얻을 수 있을 것이다. 비선형 충돌 해석은 물리적 특징을 묘사할 수 있는 장점이 있으나, 취약성 확률 평가에 직접 적용하기에는 많은 해석 시간 등의 단점이 있다. 따라서 개별 취약성 평가에는 비선형 충돌 해석을 적용하지만, 본 취약성 평가에는 실험식을 적용한다.

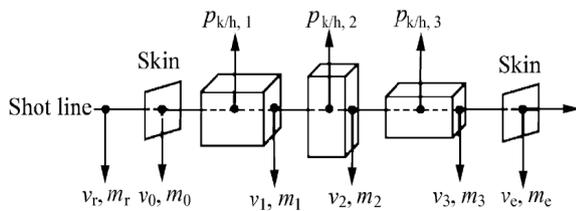


Fig. 9 Intersection between shotline and components

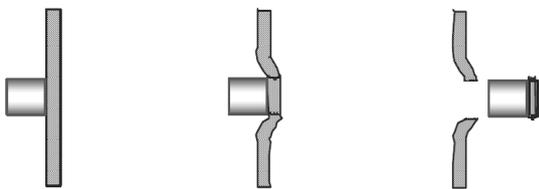


Fig. 10 Schematic model of plugging penetration mode

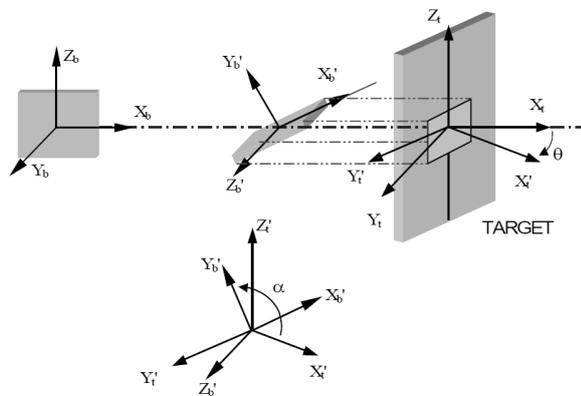


Fig. 11 Fragment impact and obliquity angles of penetration (FAA, 2005)

관통에 의한 효과도는 실험(LFT&E) 및 충격 해석 등을 통해서 평가할 수 있으며, 취약성 평가에 있어서 관통 효과도는 통상 실험

험으로부터 얻은 관통식을 이용한다(JTCG/ME, 1985). 항공기는 관통에 의하여 치명적인 생존성 손실이 일어나기 때문에 실선 실험을 이용하여 효과도를 파악하고 관통식을 정립하고 있다. 현재까지는 미국 연방 항공국(FAA, 2005)에서 수행한 실험 자료와 JTCG/ME (1985)에서 공개한 ‘Penetration Equations Handbook for Kinetic-Energy Penetrators (U)’에서 제시한 관통식이 취약성 평가에 가장 널리 사용되고 있다. 다음의 식(1)은 JTCG/ME (1985)에서 정의한 잔류 속도 식 (Residual velocity equation)으로 입사체가 목표물을 관통한 후 잔류 속도(V_r)를 의미한다. 식(2)의 V_{50} 은 FAA에서 제시한 값으로 탄도한계 (Ballistic limit)로 정의하며, 탄이 관통을 일으키는 최소 속도를 의미한다. 탄도 한계는 (V_{50}) 상수 값이지만, LFT&E 과정에서 입사 무기에서 발생한 파편의 50%가 관통을 일으켰을 때의 속도 값으로 정의한다. 관통 탄이 목표물에 도달하여 관통이 일어나게 되면 탄이 가지고 있던 이동속도는 감소하지만, 관통 이후에 탄이 가지고 있는 잔류 속도는 “0”이 아니므로 초기 관통 이후에 잔류하고 있는 탄의 속도를 계산해야한다. 식 (1)은 미국 JTCG/ME에서 정의하고 있는 관통 후 잔류 속도 산정 식이다. 이 과정은 피격선에 놓인 구성품을 대상으로 잔류 속도가 ‘0’이 될 때까지 반복적으로 수행한다.

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

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

식의 각 변수는 다음과 같은 의미를 가지며, SI단위이다.

- V_i = 입사체의 초기 충격 속도(Impact velocity)
- V_{50} = 탄도 한계 (50%의 파편이 관통하는 속도)
- V_r = 관통 후 잔류 속도
- ρ = 목표물(Plate)의 비중량(Specific weight)
- t = 목표물의 두께
- A_p = 입사체의 투영 면적
- θ = 입사체의 입사 경사도(Obliquity)
- W = 입사체의 중량
- L = 투영 면적의 길이(Presented area perimeter)
- G_d = 동적 전단 계수(Dynamic shear modulus)
- m = 입사체의 질량

본 연구는 ASTM (1999) 에서 제시한 사용한 G_d 값을 이용하였으며, 이 값들을 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Dynamic shear modules for steel and aluminum

Material	Dynamic shear modules
Steel	1,300 GPa
Aluminum	210 MPa

(4) 취약 확률 계산(Probability of Kill/Hit): 함정의 취약확률을 산출하는 방법으로는 Carleton Damage Function(Driels, 2004)을 이용한 분석 기법이나 취약면적을 이용한 분석 기법 등이 존재한다. 본 연구에서는 취약면적 기반의 취약성 평가 절차를 적용하였으며(Kim, et al., 2011), 무기 효과도 특성을 반영한 취약 확률 계산 절차는 다음의 3장에서 예제를 통해 설명하였다.

3. 취약성 계산 예

본 장은 앞에서 제시한 절차에 따라 가상의 위협 무기에 의한 취약성을 계산하는 절차를 설명하였다. 약 80m 급의 프리깃함을 예로 가정하였으나, 실선 정보 대신에 가상의 정보를 대상으로 수행하였다. 취약 확률 계산 절차는 Table 6에 정리하였다.

Table 6 Procedure for calculation of probability of kill

Procedure	Consideration
(1) Weapon system analysis	Velocity, Range, TNT, ETC
(2) Define critical component	Criticality for component
(3) Calculate hit number	Hit number on component
(4) Determine penetration	Damaged component
(5) Vulnerability assessment	Calculation the vulnerability

(1) 위협 무기 선정: 본 예제는 근접 폭발 (Proximity blast) 효과를 가진 무기의 피격을 가정하였으며, 폭발 탄의 피격 횟수는 단발 (Single shot)로 가정하였다. 여기에 근접 폭발 시 폭발 압력에 따른 손상 여파는 고려하지 않고 폭발 시 발생하는 파편에 대하여 손상여파를 평가하였다. Table 7은 가상의 위협무기에 대한 주요 속성 정보를 요약한 것으로, 폭발에 따른 파편 수를 결정짓는 자료로 활용된다.

Table 7 Attribute of assumed weapon(Friedmen, 2006)

Weapon	Projectile	Range (m)	Weight (kg)	Velocity (m/s)	Evaluation/Depression
Missile	Proximity blast	40,000	2,095	272	100-300

(2) 주요 구성품 선정: 주요 구성품은 추진시스템을 대상으로 수행한 FMEA 결과를 바탕으로 정의하였다. Fig. 12는 예제로 가정한 추진시스템을 이루는 주요 구성품의 간략 형상과 면적 및 취약면적을 정리한 것이다. 한편, Fig. 13은 COVART 모델에서 사용하는 취약면적 실험식의 예이다(David, et al., 1997). 이 값은 기동력 상실(mobility kill)을 대상으로 철강재 입사체의 중량과 속도에 따른 취약면적(A_c)의 변화를 도시한 것이다. 각 단품의 취약면적 또는 취약확률은 무기 체계의 종류, 효과도에 따른 추적된 자료가 필요하다. 그러나 본 연구의 대상이 되는 함정 재료 및 무기 체계에 따른 취약면적 실험식은 주어지지 않은 상태이기 때문에 Pei, et al. (2009)이 언급한 바와 같이 취약 면적의 값은 상수로 가정하였으며, 구성품의 총면적(A_p)의 약 80%를 취약면적(A_c)으로 가정하였다. 상기 미비점은 LFT&E를 통하여 얻은 값 또

는 공개된 활용 가능한 값을 확보하여야만 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

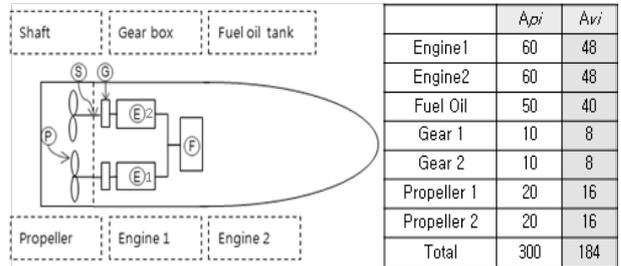


Fig. 12 Example of critical components

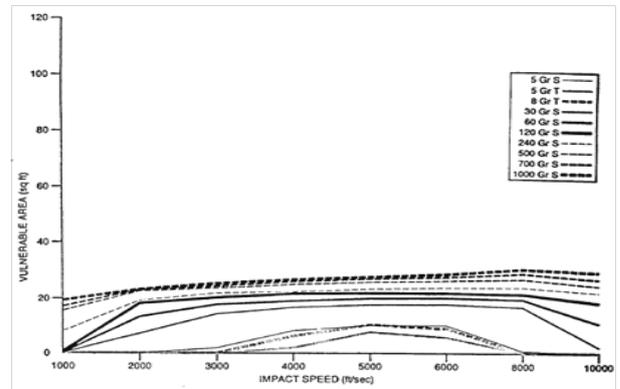


Fig. 13 Plot of vulnerable areas depending on impact velocity (David, et al., 1997)

(3) 피격 수 계산: 이는 함정 전체 또는 각각의 구성품에 피격되는 수를 지정하는 단계이다. Table 7에 정의한 비 접촉 근거리 폭발탄(Proximity blast)의 탄두 속성 정보를 이용하여 피격 수를 계산하는 방법은 식 (3)에 정리하였다(Driels, 2004). 주어진 구성품 면적(A_p)과 파편에 영향을 받는 면적(A_c)의 비와 생성되는 총 파편 수(K)의 곱으로 계산하였다. Table 8은 각 구성품에 입사하는 파편 수를 계산한 결과이다. 생성되는 총 파편 수는 70개, 폭발 지점과의 거리(r)는 80m, 폭발 시 파편의 진행 방향(θ)은 40° (Radian=0.7)로 가정하였다.

$$N = \frac{A_p}{A_c} \cdot K \quad < A_c = r^2 \theta > \quad (3)$$

Table 8 Hit number of fragment for each component

Components		Area	Hit number
Propulsion System	Engine 1	60	0.938
	Engine 2	60	0.938
	Fuel Oil Tank	50	0.781
	Gear box 1	10	0.156
	Gear box 2	10	0.156
	Propeller 1	20	0.313
	Propeller 1	20	0.313
The rest		70	-
Total		300	4.688

(4) 관통식 적용: Fig. 9 및 관통식에서 언급한 바와 같이 피격선에 놓인 구성품을 대상으로 관통 여부를 판단해야 한다. 본 예제에서는 앞서 결정한 파편 수를 바탕으로 Fig 14와 같이 기관실을 관통하는 방향으로 탄이 이동하는 피격선을 가정하고 관통식을 적용하였다.

함정 내의 모든 구성품은 선체 내에 구성되어 있기 때문에, 우선 파편이 선체 외판을 관통하는지에 대한 여부부터 파악해야 한다. 탄두의 초기 관통 여부는 탄의 초기 충돌 속도에 기반하며 그 식은 식 (2)와 같다. 또한 초기 관통 이후에 잔류하게 되는 탄두의 잔류속도는 식 (1)과 같은 방법으로 계산한다. 이들 식을 이용하여 탄의 잔류 속도가 더 이상 구성품을 관통할 수 없는 속도에 이르기까지 반복적으로 분석하게 된다.

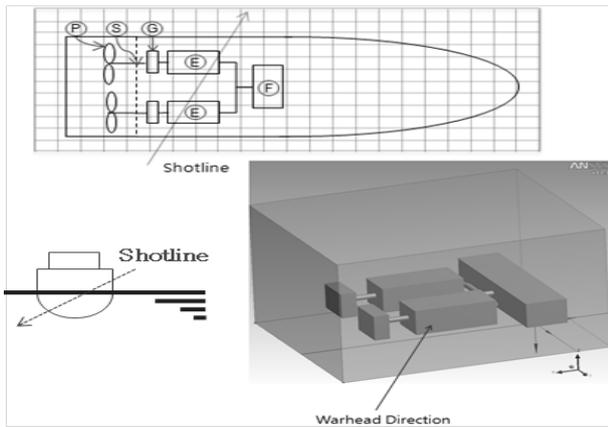


Fig. 14 Warhead direction and it's shotline

앞서 주어진 간략 모델의 외판에 대한 관통 여부를 판단한 표는 Fig. 15와 같다. 탄두의 초기 충돌 속도는 Table 7에 추정된 위협무기의 이동속도와 동일하다고 가정하였으며, 선체 외판과 엔진 외벽의 두께는 각각 15mm, 5mm로 가정하였다.

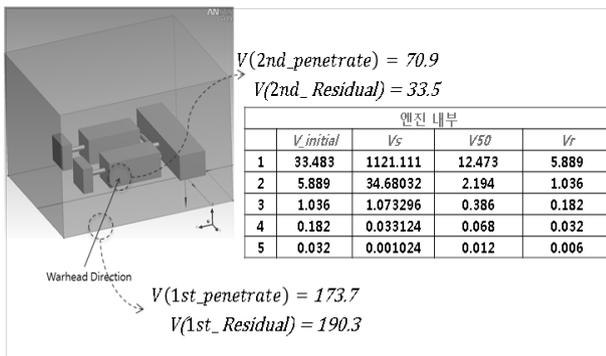


Fig. 15 Application of penetration equation to the critical components

Fig. 15에서 계산한 것과 같이 선체 외판을 관통할 수 있는 발사체의 최소 속도($V_{1st_penetration}$)가 173.7m/s 이기 때문에 300m/s로 이동하는 탄에 대해서는 관통이 발생하게 되고, 관통 후 잔류 속도는 190.3m/s로 계산 되었다. 그러나 선체 외판 관통 후에 탄두에 잔류하고 있는 속도가 '0'이 아니기 때문에 이후에

마주치는 구성품에 대하여 관통 여부를 반복적으로 분석하여야 한다. 예제에서 외판 관통 후 탄이 마주치는 구성품은 엔진①이 되고 잔류속도에 대한 엔진①의 관통 여부를 판단한 결과 초기 엔진 외벽은 관통될 수 있지만 엔진 내부의 복잡한 구성으로 인해 더 이상 관통이 일어나지 않는 것으로 파악되었다. 따라서 탄두가 엔진 내부에 박히게 되고 취약 확률 분석은 관통이 발생하는 엔진①을 대상으로 분석하였다.

(5) 취약확률 계산: 취약확률은 관통식을 적용하였을 때 손상된 구성품을 고려하여 계산하였다. 본 절의 예제 모델에서는 Redundant 구성품을 포함하고 있으므로, 취약면적 기반 계산법 중에서 다중 피격 해석 모델을 적용하여야 한다. 다중 피격에 의한 취약성 평가는 아래와 같은 네 가지 방법(Kim, et al., 2011; Ball, 2003)이 있다. Poisson 모델은 관통의 수가 정수가 아닌 실수인 경우에 사용하며 폭발 탄두에서 비산되는 파편들에 의한 취약성 평가에 적합한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 Poisson 방법을 이용하였다.

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

Poisson 모델에서의 관통의 수는 무작위 피격 수(E)로 정의한다. 발사된 탄이 시스템 위 또는 이외 지역에 골고루 분포하여 입사된다면, Fig. 16에 보이는 것처럼 Spray Zone(A_s) 상에 관통 탄이 피격되는 밀도(ρ)와 시스템 전체에 예상되는 피격 수는 식 (4)를 이용하여 계산 할 수 있다. 그리고 예상 피격 수(E)에 따른 시스템 취약확률(P_k)은 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다. Fig. 17은 Poisson 모델을 이용하여 위에 언급한 예제 모델에 대해 주요 구성품 피격에 따른 취약확률을 계산한 예시이다.

$$E = \rho \cdot A_p \quad (4)$$

$$\rho = M / A_s$$

$$P_K = 1 - e^{-E \cdot P_{K/H}} \quad (5)$$

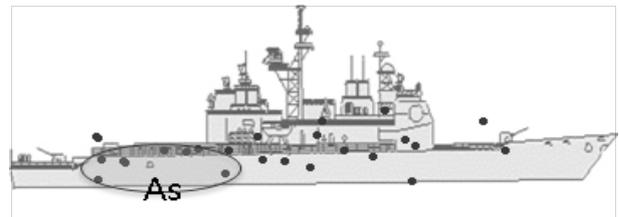


Fig. 16 Hit number on spray zone

본 연구에서 대상으로 삼은 예제는 잉여(Redundancy)를 가진 장비가 비겹침(Non-overlap)으로 존재하는 시스템으로 가정하였다 (Fig. 17). 식(6)는 피격된 i -번째 구성 요소의 취약성($P_{K/i}$)을 고려하여 대상 시스템의 취약확률($P_{K/H}$)을 구하기 위한 식이다.

$$P_{K/H} = \sum_{i=1}^n P_{k/h,i}$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{A_{vi}}{A_{total}} \text{ (except Redundancy)}$$

(6)

여기서, A_{vi} 는 i -번 구성 요소의 취약 면적을 의미한다.

Fig. 17의 실선으로 표시된 피격선의 경우 엔진의 피격과 손상에 따른 함정 전체 취약 확률은 0.447로 계산 되었다. 이는 Redundant 구성품으로 인해 단일 피격(Single Hit)에 의해 엔진 1번이 손상되어 역할을 할 수 없다고 해도 엔진 2번이 추진 능력을 부족하지만 대신할 수 있기 때문에 전체 취약확률에 크게 높지 않은 것을 파악할 수 있다. 하지만 점선으로 표시된 전체 피격수에 따른 취약확률의 경우 높게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 피격선에 경우 외판 관통 후 바로 구성품으로 이어지는 배치를 가정하였기 때문에, non-redundant 구성품인 연료 탱크의 취약확률이 높아지는 것에 대한 결과로 파악할 수 있다. 실제로는 선체 외판 내부의 보강재 등으로 인해 관통 후 탄 또는 파편의 잔류속도는 낮아질 것이며 이에 따라 구성품의 취약확률도 낮게 산정될 것이다.

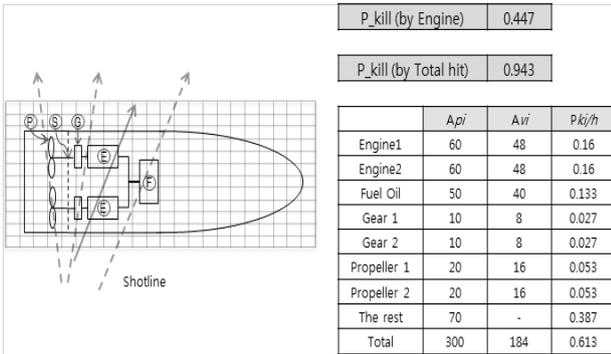


Fig. 17 Vulnerability assessment based on the poisson vulnerability model for multiple hit

본 절에서는 구성품의 redundant 배치 여부에 따라 취약확률이 변화하는 것을 파악할 수 있었으며, 이는 향후 설계 단계에서 구성품의 구성 및 배치에 따른 취약 확률을 감소 방안 모색으로 확장될 필요가 있다. 또한 Fig. 13에 언급한 바와 같이 탄두의 충돌속도(Impact velocity)의 변화에 따라 손상면적(Vulnerable area)과 취약확률이 변화하므로 이러한 취약면적의 데이터베이스를 확보할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문은 함정 생존성 요소 중 취약성 평가를 위한 절차정리하고 예제를 제시하였다. 특히 COVART 모델에서 사용하는 관통 효과를 취약 면적에 반영하기 위한 절차를 중심으로 설명하였다. 본 연구에서 수행한 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 함정이 전투 환경에서 마주칠 수 있는 위협에 대해 정의하였으며, 위협 무기의 특성을 정리하기 위한 방안을 제시하였다.
- (2) 위협 무기를 효과도 특성, 탄두 특성에 따라 분류하여 제시하였다.
- (3) 함정의 구성품을 대상으로 FMEA, FTA 과정을 이용하여 함정 취약성과 관련된 주요 구성품의 추출 절차를 제시하였다.
- (4) 구성품의 손상 여부를 판단하기 위하여 가정된 피격선에 놓인 구성품에 관통식을 적용하였다.
- (5) 취약 면적을 이용한 취약성을 평가 방법과 피격 수 계산, 관통식을 적용하여 취약 확률을 계산하는 과정을 제시하였다.

본 논문에서는 관통탄에 의한 효과를 중심으로 취약 확률 계산 과정을 제시하였다. 그러나 실제 전투 환경에서는 관통탄에 의한 효과보다는 폭발 효과에 따른 압력과 충격파에 의한 취약성 평가가 고려되어야한다. 본 논문에서는 폭발 압력에 의한 효과도 반영 방법은 고려하지 않았으나, 폭발 압력에 의한 효과도 추정식 등이 추가로 반영될 필요가 있으며 이를 위한 추가 연구를 진행 중이다. 그리고 임의로 가정한 탄두 진행방향과 피격 위치를 정식화할 수 있는 연구와 더불어 취약 면적 산정 또는 구성품의 취약 확률 산정을 위한 현실적인 방법을 추가로 연구할 필요가 있다.

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 기관께 감사드립니다.

참 고 문 헌

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1999. *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*, E1876-99. Available at: <http://www.astm.org> [Accessed 20 August 2011].

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*. 2ndEd. 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.

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.

- Chung, J.H. & Kwon, J.I., 2008a. 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, November 2008, pp.330-339.
- Chung, J.H. & Kwon, J.I., 2008b. Survivability Analysis of A Naval Ship Using the MOTISS Program-(2): A Numerical Example. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, Republic of Korea, November 2008, pp.340-348.
- David, L. Robert, W.K. & Stephanie, S.J., 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*, Army Research Laboratory, ARL-MR-341.
- Driels, M., 2004. *Weaponing: Conventional weapon System Effectiveness*. AIAA education series: Virginia.
- Friedman, N., 2006. *World Naval Weapon Systems*. 5th Ed. The U.S. Naval Institute.
- FAA(The Federal Aviation Administration), 2005. *Advanced Aircraft Materials, Engine Debris Penetration Testing*. Virginia: NTIS.
- Graswald, M. Brown, R.E. Sinibaldi, J.O. Nolte, T. & Rothe, H., 2010. Vulnerability of Mortar Projectiles by Intercepting Fragmentation Warheads. *Journal of Applied Mechanics*, 77(5), pp.051804-1, 051804-8.
- Gama, B.A. & Gillespie, J.J.W., 2011. Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites. *International Journal of Impact Engineering*, 38(4), pp.181-197.
- ITT Corporation, 2010. *COVART 6.1: FASTGEN Legacy Mode User's Manual, Joint Aircraft Survivability Program*, Report JASPO-M-07-03-030.
- JTCG (Joint Technical Coordinating Group on Aircraft Survivability), 2001. *Survivability models and simulations. Aerospace systems survivability handbook series-Volume 5*. JTCG/AS-01-D007.
- JTCG/ME, 1985. *Penetration Equations Handbook for Kinetic-Energy Penetrators(U)*. Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness (Anti-Air). 61 JTCG/ME-77-16, Revision 1-15.
- 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*, 48(5), pp.404-413.
- Lee, S.G. Kwon, J.I. & Chung, J.H., 2007. Integrated Structural Dynamic Response Analysis considering the UNDEX Shock Wave and Gas Bubble Pulse. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.148-153.
- Lillis, J.A., 2002. *Analysis of the applicability of aircraft vulnerability assessment and reduction techniques to small surface craft*. Master's Thesis. Monterey, California: Naval Postgraduate School.
- 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*, U.S. Army Research Laboratory. ARL-MR-341.
- Pei, Y. Song, B. & Han, Q., 2009. Shot Line Geometric Description Method for Aircraft Vulnerability Calculation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 22(5), pp.498-504.
- Pei, Y. Song, B. & Han, Q., 2006. A Generic Calculation Model for Aircraft Single-hit Vulnerability Assessment Based on Equivalent Target. *Chinese Journal of Aeronautics*, 19(30), pp.183-189.
- Pugh, R., 2010. *A Rapid Maritime Concept Vulnerability Analysis Tool*. Available at: http://qinetiq.com.au/home/defence/defence_solutions/sea/survive/conferences.Par.7579.File.pdf [Accessed 20 August 2011].
- SURVIAC (Survivability/Vulnerability Information Analysis Center). *FASTGEN 4*. Available at: <http://www.bahdayton.com/surviac/fastgen.htm> [Accessed 20 August 2011].
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2005. *Advanced Aircraft Materials, Engine Debris Penetration Testing, DOT/FAA/AR-03/37*, Office of Aviation Research and Development Washington, D.C.
- Xu, L. Tang, L.C. Ho, S.L. & Zhu, M.L., 2002. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 75, pp.17-29.

