



공학박사 학위논문

전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법론

A Methodology for Integrated Reliability Analysis of Combat Systems



한국해양대학교 대학원

컴퓨터공학과

황 훈 규





공학박사 학위논문

전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법론

A Methodology for Integrated Reliability Analysis of Combat Systems



한국해양대학교 대학원

컴퓨터공학과

황 훈 규



본 논문을 황훈규의 공학박사 학위논문으로 인준함.



2015년 12월 23일

한국해양대학교 대학원



목 차

제 1 장 서 론
1.1 연구의 필요성
1.2 연구의 배경
1.3 연구의 목적
제 2 장 관련 연구 5
2.1 신뢰성 분석
2.1.1 신뢰성과 대표적인 분석 기법 5
2.1.2 FTA 기법······· 7
2.1.3 FMECA 기법······9 이/ QF 다시
2.2 전투 시스템과 신뢰성 분석
2.2.1 전투 시스템의 정의 및 기능
2.2.2 전투 시스템과 신뢰성 저하 과정
2.2.3 전투 시스템의 기능별 피해 기준 정의

2.2.4 선행 연구의 한계점 14



제 3 장 모델링 및 시뮬레이션 기반의 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 1
3.1 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정
3.2 신뢰성 분석을 위한 모델 베이스 구축
3.2.1 전투 시스템의 구성 요소 속성 모델링
3.2.2 전투 시스템의 영향 요소 모델링
3.2.3 전투 시스템의 3차원 구성 요소 모델링 30
3.2.4 위협 모델링
3.3 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정(1단계)42
3.4 모델 선택 및 생성(2단계)······4
3.5 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행(3단계)47
3.6 통합 신뢰성 분석(4단계)
3.6.1 중요도와 피격 확률의 활용 52
3.6.2 피해 기준별 상실 확률 분석 53
3.6.3 구성 요소별 위험도 분석



제 4	4 장 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 방법론의 검증 59
	4.1 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템 개발 59
	4.2 분석 및 활용 사례62
	4.2.1 전차의 통합 신뢰성 분석62
	4.2.2 전차의 장갑 보강 후 통합 신뢰성 분석96
	4.3 선행 연구와 본 연구의 비교
제 5	5 장 결 론
참고	그문헌
부록	루 A 분석 및 활용 사례 2(고속정의 통합 신뢰성 분석) 120
부록	록 B 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템의 매뉴얼 163





그림 목차

그림 2.1 FTA 기법의 용어와 표기법의 예
그림 2.2 전투 시스템의 신뢰성 저하 과정
그림 3.1 제안하는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정
그림 3.2 관통 및 손상 분석의 예
그림 3.3 전차의 3차원 구성 요소 모델링 35
그림 3.4 고속정의 3차원 구성 요소 모델링
그림 3.5 3차원으로 모델링한 전차의 구성 요소(측면)
그림 3.6 3차원으로 모델링한 전차의 구성 요소(상부면)
그림 3.7 3차원으로 모델링한 고속정의 구성 요소(측면)
그림 3.8 3차원으로 모델링한 고속정의 구성 요소(상부면)
그림 3.9 중요도 산정 과정
그림 3.10 가중치 트리 생성 과정 44
그림 3.11 생성된 모델의 예 46
그림 3.12 다중 피격선 기반 피격 확률 분석 개념도 48
그림 3.13 피격에 의한 영향 분석 개념도 149
그림 3.14 피격에 의한 영향 분석 개념도 2
그림 3.15 피격에 의한 영향 분석 개념도 3
그림 3.16 통합 신뢰성 분석을 위한 주요 기법
그림 3.17 정상 사건의 확률 계산 예제 (AND 게이트) 55
그림 3.18 정상 사건의 확률 계산 예제 (OR 게이트) 55



그림 4.1 개발한 시스템 구조도
그림 4.2 개발한 시스템의 사용자 인터페이스
그림 4.3 위협 모델 설정
그림 4.4 전차의 가중치 트리
그림 4.5 F-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리 68
그림 4.6 M-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리
그림 4.7 A-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리 69
그림 4.8 S-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리 69
그림 4.9 C-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리 70
그림 4.10 생성된 시뮬레이션 구조
그림 4.11 전면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과
그림 4.12 전면 구성 요소별 피격 확률 분석 결과 75
그림 4.13 측면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과
그림 4.14 측면 구성 요소별 피격 확률 분석 결과
그림 4.15 구성 요소별 중요도 계산 결과
그림 4.16 F-Kill 관련 구성 요소의 FT 85
그림 4.17 M-Kill 관련 구성 요소의 FT
그림 4.18 A-Kill 관련 구성 요소의 FT
그림 4.19 S-Kill 관련 구성 요소의 FT 87
그림 4.20 C-Kill 관련 구성 요소의 FT



그림	4.21	K-Ki	ll 관련	구성	요소의] FT·	• • • • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	88
그림	4.22	피해	기준별	상실	확률	분석	결과	•••••	• • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	89
그림	4.23	위험	도 분석	결과	•••••	• • • • • • • • • •	• • • • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	• • • • • • • • • •	•••••	95
그림	4.24	피해	기준별	상실	확률	비교(전면)	•••••	•••••		•••••	• • • • • • • • • •	•••••	102
그림	4.25	피해	기준별	상실	확률	비교(즉면)		•••••		•••••	• • • • • • • • •	•••••	103
그림	4.26	피해	기준별	상실	확률	비교(평균)	.,,,,.,,			•••••	• • • • • • • • •	•••••	104
그림	4.27	구성	요소별	위험:	도 분⁄	석 결	라 비	교		••••••	•••••	•••••	•••••	·107
				Z UD					ST					
				1		19	45		Ì					
					X	õH C		10/						



표 목차

표 2.1	FMECA 테이블의 예 10
표 2.2	전투 시스템의 기능별 피해 기준
표 3.1	전투 시스템 구성 요소의 유형별 속성
표 3.2	방호 성능 변화 배율
표 3.3	위협에 따른 연료 및 폭약의 화재 발생 유무
표 3.4	연료 및 폭약의 영향력 및 영향 범위
표 3.5	선정한 전차의 주요 구성 요소 및 유형
표 3.5	선정한 전차의 주요 구성 요소 및 유형(계속)
표 3.6	선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형
표 3.6	선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형(계속)
표 3.7	정의된 위협 속성
표 3.8	중요도의 점수 기준
표 3.9	피격 확률의 점수 기준
표 4.1	사용자 요구 명세
표 4.2	설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성 64
표 4.2	설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성(계속)65
표 4.2	설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성(계속)66
표 4.3	전면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과(일부)
표 4.4	구성 요소별 전면 피격 확률
표 4.5	측면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과(일부)



표 4.6 구성 요소별 측면 피격 확률
표 4.7 산정된 전차의 구성 요소별 중요도
표 4.8 피해 기준별 상실 확률 분석 결과(전면/측면/평균)
표 4.9 FMECA 결과 및 구성 요소별 위험도
표 4.9 FMECA 결과 및 구성 요소별 위험도(계속)92
표 4.10 분석된 구성 요소별 통합 위험도
표 4.11 설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성
표 4.12 구성 요소별 전면 피격 확률 비교(보강 전/보강 후) 98
표 4.13 구성 요소별 측면 피격 확률 비교(보강 전/보강 후) 99
표 4.14 피해 기준별 상실 확률 비교(보강 전/보강 후)
표 4.15 구성 요소별 위험도 비교 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
표 4.16 기존 연구와 본 논문의 비교



A Methodology for Integrated Reliability Analysis of Combat Systems

Hun-Gyu Hwang

Department of Computer Engineering,

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Combat systems accomplish missions in military domains and should be reliable. The reliability of the combat systems is the ability of avoidance and tolerance of damage from threats. To build high-reliable combat systems, reliability analysis for each component in combat systems is required in the design phase. The component should be improved in performance through the analysis. For this reason, many researches have highlighted the reliability analysis of combat systems and most of them are based on modeling and simulation because combat systems as analysis targets are very dangerous and the purpose of analysis is limited to certain areas such as military domains. Such researches, however, are restricted to analysis targets (eg. armored fighting vehicles and warships) and analysis purposes (eg. penetration and flash-fire).





In order to alleviate the limitations, this thesis proposes a methodology of integrated reliability analysis for combat systems based on modeling and simulation. The proposed methodology consists of four steps: The first step specifies user requirements and defines a analysis scenario. The second step selects models of components in a combat system and generates the models for simulation. The third step generates a simulation architecture which consists of the models and conducts a simulation to compute hit probabilities of the models. The final step analyzes integrated reliability for the combat system and, for analyzing reliability, uses two methods which this thesis proposes: The first method calculates occurrence probabilities of kill-criteria based on hit probabilities for function-level reliability analysis by using the fault tree analysis (FTA) technique. The second method analyzes criticalities of components based on importances and hit probabilities for component-level reliability analysis by using the failure mode, effectiveness and criticality analysis (FMECA) technique. For verifying the proposed methodology, this thesis develops a integrated reliability analysis system for combat systems. Through various experiments, this thesis has observed that the proposed methodology is promising for reliability analysis for combat systems.

Consequentially, the proposed methodology can overcome the limitations of previous researches, can analyze the reliability of combat systems against various types of threats, and can evaluate the integrated reliability based on function-level and component-level analysis in the design phase of combat systems.

KEY WORDS: Integrated reliability analysis; 통합 신뢰성 분석; Survivability analysis; 생존성 분석; Vulnerability analysis; 취약성 분석; Combat systems; 전투 시스템.



- x -

약어 정의

A-Kill	Armor-Kill
APFSDS	Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot
APS	Active Protection System
ANB	Ammonium Nitrate B
BOM	Bill Of Materials
CA	Criticality Analysis
CAD	Computer Aided Design
CE	Chemical Energy 945
C-Kill	Communication-Kill
COMPB	Composition B
DEVS	Discrete Event System Specification
DEW	Directed Energy Weapon
F-Kill	Firepower-Kill
FMEA	Failure Mode and Effectiveness Analysis
FMECA	Failure Mode, Effectiveness and Criticality Analysis

Collection

FT	Fault Tree
FTA	Fault Tree Analysis
HEAT-MP	High Explosive Antitank Multipurpose
IGES	Initial Graphics Exchanges Specification
KE	Kinetic Energy
K-Kill	Catastrophic-Kill (Total-Kill)
LFT&E	Live-Fire Test and Evaluation
M&S	Modeling and Simulation
M-Kill	M(mobility)-Kill
MTBF	Mean Time Between Failure
PBX	Plastic-Bonded Explosive
РКМ	Patrol Killer Medium
RBD	Reliability Block Diagram
RE	Relative Effectiveness
RHA	Rolled Homogeneous Armor
RPN	Risk Priority Number
SES/MB	System Entity Structure/Model Base
S-Kill	Sensor-Kill
TNT	Trinitrotoluene



제1장서론

1.1 연구의 필요성

전투 시스템은 국방과 관련하여 주어진 임무를 수행하는 시스템을 의미한다. 육상의 전차, 해상의 함정, 공중의 전투기 등을 대표적인 예로 들 수 있으며, 전투뿐만 아니라 정찰, 수송, 지원 등의 목적을 가진 시스템들도 전투 시스템의 범주에 포함된다. 전투 시스템은 위협에 대한 피해를 감내하여 성공적으로 임 무를 수행할 수 있는 신뢰성이 확보되어야 한다[1]. 이를 위해서는 설계 단계에 서부터 총탄, 포탄, 미사일, 어뢰 등의 위협에 대한 전투 시스템의 신뢰성을 분 석하고, 분석된 내용을 충분히 반영하여 구성 요소의 교체나 보강과 같은 성능 개선이 통합적으로 이루어져야 한다[2-4].

전투 시스템의 신뢰성을 분석하기 위한 가장 좋은 방법은 실제 위협과 전투 시스템을 이용하여 실험하고, 그 결과를 바탕으로 전투 시스템의 신뢰성을 분 석하는 실사격 실험 및 평가(LFT&E)이다. 하지만 이러한 방법은 실험의 위험성 때문에 시공간적 제약이 있으며, 많은 경제적 손실을 야기하는 등 여러 문제점 을 수반한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 과거부터 국방 분야에 모델링 및 시뮬레이션(M&S) 기법이 도입되어 활용되고 있다. 또한, 모델링 및 시뮬레 이션을 기반으로 전투 시스템의 신뢰성 분석하는 것에 관한 연구가 필요하다 [5-9]. 하지만 전투 시스템의 신뢰성 분석을 목적으로 하는 시스템은 국방 분야 의 보안적인 특성 때문에 거의 공개되어 있지 않은 실정이다. 알려진 몇몇의 외국산 상용 분석 시스템[10-13]은 분석 목적과 적용 대상이 고정되어 있고, 수



정할 수 없으므로 사용자의 요구에 대한 대응이 어렵다. 따라서 이러한 문제점 들을 보완할 수 있는 신뢰성 분석 방법에 관한 연구와 이를 적용한 시스템의 개발이 요구된다[9, 14-15].

1.2 연구의 배경

Collection

최근, 전투 시스템의 신뢰성 분석에 관한 연구는 전투 시스템 하나만을 대상 으로 하는 것이 아니라, 전술 통제 본부를 비롯해 모든 전투 시스템을 포함한 전투 환경 전체를 대상으로 하는 것으로 변화하고 있다. 하지만 전투 환경 전 체를 대상으로 하는 분석의 정확도가 향상되기 위해서는 개별 전투 시스템에 관한 신뢰성 분석부터 통합적으로 이루어져야 한다.

이와 관련하여 [16]의 연구에서는 SES/MB 프레임워크 및 DEVS 형식론을 전 차에 적용하여 전차의 구조를 모델링하고, 이를 기반으로 전차의 신뢰성 분석 을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, [10-11]의 연구에서는 전투 시스템의 신뢰성 분석을 위한 기초 연구로서 전차의 관통 분석 프로그램을 개발하였다. 이밖에도 [17-19]의 연구에서는 위협에 대하여 함정을 구성하는 요소의 위치와 면적에 따른 취약 확률을 정의하였으며, 이를 기반으로 함정의 신뢰성을 분석 하는 방법을 제안하였다. [20]의 연구에서는 함정에 대한 위협을 분석하고, 함 정의 주요 구성 요소를 결정하기 위한 방법으로 대표적인 신뢰성 분석 기법인 FTA 기법 및 FMECA 기법을 이용하였으며, 취약 면적을 기반으로 피격에 의해 변화하는 신뢰성을 수학적으로 해석하였다. [21]의 연구에서는 전투기의 구성 요소를 상용 3차원 CAD 소프트웨어인 CATIA로 모델링하고, 이를 기반으로 FTA 기법을 적용하여 신뢰성을 분석하는 방법을 제안하였다.

1.3 연구의 목적

전투 시스템의 신뢰성 분석에 관한 기존 연구들은 다음과 같은 한계점을 가 지고 있다. (1) 분석의 대상이 되는 전투 시스템이 전차나 함정 등으로 한정되 어 있고, (2) 분석의 목적이 피격, 관통, 손상, 화재 등으로 그 범위가 제한되어 있기 때문에 이러한 영향 요소들을 통합적으로 고려하기 위한 접근이 필요하 며, (3) 신뢰성 분석의 대상이 되는 주요 구성 요소를 결정하기 위한 목적으로 FTA 기법 혹은 FMECA 기법을 사용한 사례는 있으나, 전투 시스템의 신뢰성 분석을 위한 목적으로 FTA 및 FMECA 기법이 도입된 사례가 거의 없다. 또한, (4) 피격에 의한 신뢰성 분석에 있어서는 관통을 기본 전제로 하였기 때문에 전투 시스템의 방호 성능은 고려되지 않았고, (5) 취약 면적을 기반으로 피격 확률을 분석하였으며, (6) 제안한 방법론의 증명을 위해서 확률 기반의 수학적 방법 등을 사용하였으나, 모델링 및 시뮬레이션 기반의 신뢰성 분석 시스템을 개발하여 증명한 사례가 거의 없다.

따라서 이러한 한계를 보완하기 위하여, 본 논문에서는 분석의 대상이 되는 전투 시스템의 종류를 다양하게 설정할 수 있도록 (1) 전투 시스템의 구성 요 소를 장갑, 일반 부품, 치명 부품, 승무원으로 구분하여 모델링하였으며, (2) 3 차원 CAD를 기반으로 구성 요소를 모델링하였다. 피격에 의한 영향이 고려된 여러 가지 목적의 분석을 수행할 수 있도록 (3) 구성 요소에 대한 관통, 손상, 화재(폭발), 충격에 의한 영향을 모델링하며, 이러한 영향 요소를 통합적으로 고려하기 위한 방법을 제시한다. 다양한 위협에 대한 신뢰성 분석이 이루어 질 수 있도록 (4) 전투 시스템에 피해를 줄 수 있는 위협의 특성을 분석하여 모델 링하며, 모델링된 구성 요소, 영향 요소, 위협을 모델 베이스로 구축한다. 또한, 수학적 증명이나 상용 소프트웨어를 이용한 신뢰성 분석이 아닌 제안한 방법을 기반으로 개발한 시스템을 통해 (5) 3차원 다중 관통선 기반으로 구성 요소별 피격 확률을 분석하기 위한 방법을 제안하고 시뮬레이션을 수행한다. (6) 전투



제안하며, (7) 구성 요소별 위험도 분석을 위하여 중요도를 산정하는 기법을 제 안한다.

본 논문에서는 이러한 일련의 내용을 4단계의 전투 시스템의 통합 신뢰성 분 석 과정으로 체계화하였다. 제안하는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정은 1단계의 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정, 2단계의 모델 선택 및 생성, 3단계의 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행, 4단계의 통합 신뢰성 분석 으로 이루어진다. 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석을 위해서 분석된 피격 확률 을 기반으로 FTA 기법을 적용한 후, 기능 수준(function-level)의 신뢰성 분석인 피해 기준(kill criteria)별 상실 확률 분석을 수행한다. 또한, 중요도와 피격 확률 을 기반으로 FMECA 기법을 적용한 후, 구성 요소 수준(component-level)의 신뢰 성 분석인 구성 요소별 위험도(criticality) 분석을 수행한다. 제안한 방법론을 적 용하여 모델링 및 시뮬레이션 기반 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템을 개 발하며, 이를 통해 제안한 방법론의 유용성을 검증한다. 본 논문에서 제안하는 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 방법을 적용하면 기존 연구의 한계를 극복할 수 있고, 모델링 및 시뮬레이션을 기반으로 다양한 종류의 위협에 대한 분석을 수 행할 수 있으며, 영향 요소를 고려한 피해 기준별 상실 확률 및 구성 요소별 위험도를 기반으로 설계 단계에서의 전투 시스템 신뢰성을 통합적으로 분석할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 관한 내용을 다루고, 3장에서는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법론을 제안한다. 또한, 4장에서 는 개발한 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 시스템을 이용하여 제안한 내용을 검증하는 것에 관한 내용을 다루며, 5장의 결론 및 향후 연구로 끝을 맺는다.

d Collection

제 2 장 관련 연구

2.1 신뢰성 분석

2.1.1 신뢰성과 대표적인 분석 기법

일반적으로 시스템의 신뢰성이란, 시스템이 주어진 조건에서 요구되는 기능 을 정상적으로 수행할 수 있는 능력을 의미한다. 따라서 시스템의 정상적인 기 능 수행을 위해서는 구성 요소의 고장 등으로 인해 신뢰성이 저하될 가능성을 분석하고, 이에 따라 사전에 적절한 조치를 취해주어야 계속적인 요구 기능의 수행이 가능하다. 일반적으로 신뢰성 분석은 시스템의 운용 측면에서 고장 등 으로 인한 사고를 미리 방지하기 위한 예방정비 등 유지보수의 목적을 가진다. 이때, 시스템이나 구성 요소의 고장 확률 등을 활용하며, 고장 확률은 시스템이 나 구성 요소의 수명 주기를 활용하는데, 주로 매뉴얼 상의 평균 사용 시간 (MTBF)이나 통계적인 근거를 기반으로 결정한다. 이러한 신뢰성 분석을 위해 여러 기법들이 존재하는데, 분석의 목적에 따라 적절한 기법을 선택해서 적용 해야 한다.

시스템의 신뢰성 분석을 위해 널리 활용되는 대표적인 분석 기법으로 FTA, RBD, FMEA/FMECA가 있는데, 이러한 기법들은 시스템의 신뢰성을 분석할 수 있도록 해주는 기법이다. 먼저, FTA 기법은 시스템의 고장과 그 원인이 되는 구성 요소의 관계를 논리적인 트리 구조로 표현하여 고장 확률 기반의 시스템 신뢰성을 분석하며[22-24], RBD 기법은 전체 시스템을 구성하는 요소 간의 관 계를 블록도로 표현하여 각 구성 요소의 신뢰성을 바탕으로 전체 시스템의 신





뢰성을 분석한다[25]. FMECA 기법은 시스템에서 발생 가능한 고장 모드(유형) 를 정의하고, 고장 모드를 발생시키는 원인과 고장 모드가 시스템에 끼치는 영 향을 분석하기 위한 기법을 의미한다. 또한, FMECA 기법은 FMEA 기법을 기 반으로 위험도 분석(CA)까지도 포함하여 수행하는 것을 의미한다. 최근에는 사 실상 FMEA 기법과 FMECA 기법의 용어는 그 의미의 큰 구분 없이 FMECA로 통용된다[26-27].

일반적으로 FTA, RBD, FMECA 기법 중 하나만 선택하여 적용해도 시스템의 신뢰성 분석이 가능하지만 각각의 기법을 상호 보완하고 분석의 정확도를 높이 기 위하여 여러 기법을 복합적으로 활용하기도 한다. FTA 기법은 시스템의 고 장(실패)에 초점을 맞추고 있으며, RBD 기법은 시스템의 정상 동작에 초점을 맞추고 있다는 점과 각 기법의 표현 방법을 제외하면 일반적으로 신뢰성 분석 에 두 가지 기법 중 어떤 기법을 적용하든 분석 결과는 논리적인 역(logical inverse)의 관계를 가진다. 따라서 FTA 기법과 RBD 기법을 동일한 목적으로 함 께 사용하는 경우는 거의 없다. 반면에 FMECA 기법은 FTA 기법과 마찬가지로 고장에 초점을 맞추고 있으므로 상호 보완적인 측면에서 주로 이 두 가지 기법 이 함께 사용된다.

FTA 기법의 목적은 고장의 원안을 찾고 고장의 발생 확률을 분석하는 것이 며, FMECA 기법의 목적은 구성 요소가 특정 고장 모드를 발생시킬 가능성에 관한 구성 요소별 위험 우선순위를 분석하는 것이다. 즉, FTA는 기본적으로 특 정 고장의 원인을 분석하기 위한 하향식(top-down)기법이고, FMECA는 구성 요 소가 특정 고장 모드로 인한 고장 영향을 발생시킬 위험도가 얼마나 높은지를 분석하기 위한 상향식(bottom-up) 기법이다. 본 논문에서는 각각의 신뢰성 분석 결과를 상호 보완하고 통합적인 분석을 수행하기 위해서 FTA 기법 및 FMECA 기법을 활용하며, 이러한 두 기법을 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석에 적용하 기 위한 방법을 제안한다.





2.1.2 FTA 기법

d Collection

FTA 기법은 1960년대 초 미 공군의 미사일 발사 제어 시스템의 안전성 분석 을 위해 처음 개발되었으며, 그 후 항공, 우주, 철도, 발전 설비 등 안전성이 강 조되는 분야에서 시스템의 신뢰성 분석을 위해 널리 사용되고 있는 대표적인 기법이다[28]. 기본적으로 FTA 기법은 하향식 분석 기법으로, 특정 고장을 발생 시키는 사건(event)과 그 원인을 논리 기호인 AND 혹은 OR 게이트를 이용하여 트리 구조로 표현함으로써 해당하는 고장과 그 원인이 되는 구성 요소 간의 관 계 및 고장 발생 확률을 분석하는 것이 목적이다.

그림 2.1과 같이 FTA 기법의 가장 상위 노드에는 고장 명칭이 위치하는데, 이를 정상 사건(top event)이라고 부른다. 정상 사건의 아래에는 고장의 원인이 되는 노드가 위치하는데, 이를 사건(event) 혹은 기본 사건(basic event)이라고 부 른다. 이때, 사건은 하위 레벨에 노드가 존재하는 노드를 의미하고, 기본 사건 은 말단 노드를 의미하며, 상위 레벨의 노드와 하위 레벨의 노드는 각각의 논 리적인 관계에 따라 AND 혹은 OR 게이트로 연결된다. 일반적으로 FTA 기법 에서는 정상 사건 및 사건과 같이 하위 레벨에 노드가 존재하는 경우에는 사각 형으로 표현하며, 기본 사건과 같이 하위 레벨에 노드가 존재하지 않는 경우에 는 타원으로 표현한다. 또한, FTA 기법에서 정상 사건이 발생할 확률은 기본 사건이 발생할 확률을 기반으로 하여 상향식 분석으로 응용되어 계산되며, 일 반적으로 FTA에서 AND 게이트 및 OR 게이트로 연결된 노드 간의 확률 계산 은 식 (2.1)과 같이 정의된다[21-24]. 여기서 *P_{fault}*는 정상 사건이 발생할 확률을 의미하고, *P_{CFi}는 정상 사건과 관련된 하위 사건의 구성 요소의 고장 발생 확률* 을 의미한다.



그림 2.1 FTA 기법의 용어와 표기법의 예 Fig. 2.1 An example of terms and notations for FTA

$$P_{fault} = \begin{cases} \prod_{i=1}^{n} P_{CF_i} & \text{if } AND \text{ gate} \\ 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{CF_i}) \text{ if } OR \text{ gate} \end{cases}$$
(2.1)

국외에서는 과거부터 FTA 기법 등을 활용하여 시스템의 신뢰성에 관한 설계 및 분석을 수행하고 있으나, 국내에서는 비교적 최근에 들어서야 철도나 항공 등의 분야에 점차 도입되고 있다[25, 29-32]. 이와 관련하여 [29]의 연구에서는 철도 차량 시스템의 제동 장치의 유지보수 및 비용 측면에서의 안전성을 향상 시키기 위한 목적으로 FTA 기법을 이용하였고, [30]의 연구에서는 철도 신호 내장형제어기의 결함을 검출하기 위한 워치독 타이머의 결함으로 인하여 고장 이 은폐되는 것을 분석하기 위한 목적으로 FTA 및 FMECA 기법을 도입하였으 며, [31]의 연구에서는 보행 안전을 위하여 도시 철도 승강장의 안전 발판의 신 뢰성을 분석하기 위하여 FTA 기법을 적용하였다. 또한, [32]의 연구에서는 로켓 시스템의 신뢰성 분석의 첫 단계로 로켓 모터의 정성적인 신뢰성 분석을 위해 FTA 기법 및 FMECA 기법을 활용하였다.

1945

- 8 -



2.1.3 FMECA 기법

Collection

FMECA는 1950년대 제트엔진 항공기의 개발에 있어 설계를 위한 신뢰성 분 석을 위하여 최초로 사용되었고, 1960년대에 NASA의 아폴로 프로그램 등 항 공, 우주 분야에 다양하게 활용되었으며, 그 후, 산업 전반에서 시스템의 신뢰 성을 분석하기 위해 활용되고 있다[32-34]. FMECA 기법은 시스템을 개발의 초 기 단계부터 잠재적인 고장과 그 영향을 찾아내어 분석함으로써 잠재적인 고장 발생의 가능성을 제거 혹은 감소시키는 것이 목적이다. FMECA 기법에서는 기 본적으로 고장 모드, 고장 영향, 구성 요소별 위험 우선순위(RPN) 등의 정보를 포함하고 있는 테이블 형태의 분석 결과가 도출된다. 이를 활용하여 고장 모드 가 시스템에 어떤 영향을 끼치는지를 비롯하여 고장 모드의 원인이 되는 구성 요소가 무엇인지, 고장 모드를 발생시킬 가능성이 있는 구성 요소별 위험 우선 순위는 어떠한지를 상향식으로 분석할 수 있다[35-39].

FMECA 기법에서는 구성 요소의 고장 모드 및 영향에 관한 위험 우선순위를 결정하기 위하여 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detection)의 세 가 지 기준을 이용한다. 여기서 심각도는 구성 요소의 고장으로 인한 영향의 심각 한 정도를 나타내는 것이고, 발생도는 구성 요소의 고장이 발생할 가능성을 나 타내는 것이며, 검출도는 고장 및 원인의 검출 가능성을 나타내는 것이다. 각각 은 1부터 10까지의 값을 가지며, 이를 위한 점수 기준의 정의가 필요하다. FMECA 기법에서는 점수 기준에 의해 변환된 심각도, 발생도, 검출도를 적용하 여 위험 우선순위를 분석하며, 위험 우선순위의 계산식(RPN)은 식 (2.2)와 같다. 여기서, S는 심각도, O는 발생도, D는 검출도를 의미한다. 표 2.1은 FMECA 기 법을 적용한 후, 분석된 결과인 FMECA 테이블의 예를 나타낸 것이다[22-25].

$$RPN = S \times O \times D \tag{2.2}$$

표 2.1 FMECA 테이블의 예

구성 요소명	고장 모드	고장 영향	심각도	발생도	검출도	RPN
구성 요소 A1		그가 여하 ^	1	2	3	6
구성 요소 A2	1 18 F F A	<u>ту 28 ч</u>	2	3	4	24
구성 요소 B1	고장 모드 B	고장 영향 B	10	10	10	1000

Table 2.1 An example for FMECA table

추가적으로 FMECA 기법을 신뢰성 분석에 적용할 때에는 분석 목적에 따라 식 (2.2)와 같이 심각도, 발생도, 검출도의 세 가지 기준을 기반으로 계산되는 위험 우선순위를 이용할 수도 있고, 식 (2.3)과 같이 심각도와 발생도의 두 가 지 기준을 기반으로 계산되는 위험도를 이용할 수도 있다[68]. 여기서, C는 위 험도(criticality), S는 심각도, O는 발생도를 의미한다.

1945

ÓŁ

 $C = S \times O$

(2.3)

[35]의 연구에서는 철도 차량의 도어 시스템의 신뢰성을 분석한 후, 그 결과 에 대한 대책을 마련하기 위하여 FMECA 기법을 적용하였고, [36]의 연구에서 는 고속철도 차량의 공기 제동 장치에 대한 예방 정비의 유지보수성을 분석하 여 이를 개선하기 위한 목적으로 FMECA 기법을 활용하였으며, [37]의 연구에 서는 고속철도 차량의 마찰 제동 장치의 고장 발생 원인을 찾은 후, 제동 장치 의 구조를 개선 및 보강하기 위하여 FMECA 기법을 도입하였다. 또한, [38]의 연구에서는 도시 철도 차량의 가변 전압 및 주파수 인버터의 고장 원인 분석 및 개선 대책을 위해 FMECA 기법을 적용하였고, 도시 철도 차량의 신호 설비 의 위험 요소 분석 및 개선 절차를 도출하기 위하여 FMECA 기법을 도입하였



으며, [39]의 연구에서는 고속철도 차량의 모터 감속기의 고장 분석 및 개선 방 안의 도출을 위하여 FMECA 기법을 활용하였다. 이 밖에도 [33]의 연구에서는 가전제품의 위험 요소를 파악하고 최적 설계를 하기 위하여 FMECA 기법을 도 입하였으며, [34]의 연구에서는 발전 설비의 유지보수 계획의 수립을 위하여 FMECA 기법을 활용하였다.

2.2 전투 시스템과 신뢰성 분석

2.2.1 전투 시스템의 정의 및 기능

Collection

전투 시스템이란 육상, 해상, 수중, 공중 등에서 국방과 관련된 임무를 수행 하는 병력/화력, 시설 등을 의미하며, 전투뿐만 아니라 정찰, 수송, 지원 등의 목적을 가진 시스템들도 포함된다[1]. 대표적으로 육상에는 전차, 장갑차 등이 있고, 해상에는 구축함, 호위함, 초계함, 고속정 등이 있다. 또한, 수중에는 잠수 함이 있으며, 공중에는 전투기, 폭격기, 정찰기, 수송기 등이 있다[2-4].

전투 시스템의 대표적인 기능으로는 공격, 이동, 방어, 탐지, 통신이 있다. 성 공적인 임무 수행을 위해서 이들 기능이 모두 중요하지만 전투 시스템은 그 목 적에 따라 각기 다른 기능에 특화되어 있다[43-45]. 예를 들어, 전차는 기동력을 바탕으로 여러 위협을 극복하고 적을 공격하여 무력화시키는 것이 목적이기 때 문에 다른 기능들에 비해 상대적으로 이동, 방어, 공격 기능에 특화되어 있다 [46-47]. 반면에 수송 차량이나 수송기 등 수송 목적의 전투 시스템은 신속하고 안전한 수송을 위하여 이동과 방어 기능에 특화되어 있으며, 정찰기 등 정찰 목적의 전투 시스템은 상대적으로 이동과 탐지 기능에 특화되어 있다[48-49].

2.2.2 전투 시스템과 신뢰성 저하 과정

전투 시스템은 위협에 대한 피해를 회피하거나 감내하여 성공적으로 임무를 수행하는 것이 목적이다. 전투 시스템은 전투 환경 등과 같이 다양한 변수가 존재하는 조건에서 임무를 수행하기 때문에 그 과정에서 여러 위협에 노출될 수 있다. 만약, 전투 시스템이 총탄, 포탄, 미사일, 어뢰 등의 위협에 의해 피격 된다면 전투 시스템을 구성하는 구성 요소인 장갑이나 외판의 관통, 구성 요소 의 손상, 화재(폭발), 충격을 비롯하여 승무원의 부상 혹은 사망 등의 피해가 발생할 수 있으며, 이로 인해 임무 수행을 위해 필수적인 기능을 상실할 수 있 다. 즉, 그림 2.2에 나타낸 것과 같이 위협에 의한 피격으로 전투 시스템의 구 성 요소가 손상되면, 해당 구성 요소가 담당하는 고유의 기능을 상실하게 되고, 이는 곧 전투 시스템의 임무수행 능력에 영향을 주기 때문에 신뢰성 저하와 직 결된다.







따라서 전투 시스템의 신뢰성은 "전투 시스템이 위협에 의한 피해를 회피하 거나 감내하여 계속적인 임무수행이 가능한 정도"로 정의할 수 있으며, 성공적 인 임무수행을 위해서는 전투 시스템의 신뢰성이 확보되어야 한다[44]. 이를 위 해서는 피격 시 전투 시스템이 위협으로부터 받는 피해의 정도가 분석되어야 하고, 그로 인한 영향에 관한 분석 등이 이루어져야 한다. 이러한 여러 분석 과 정을 통해 전투 시스템의 신뢰성이 통합적으로 분석되어야 하며, 전투 시스템 의 설계 단계에서부터 분석된 내용을 충분히 반영하여 구성 요소의 교체나 보 강과 같은 성능 개선이 체계적으로 이루어져야 한다[2-4].

2.2.3 전투 시스템의 기능별 피해 기준 정의

앞서 언급했듯이 전투 시스템의 주요 기능으로는 공격, 이동, 방어, 탐지, 통 신 기능이 있는데, 피격으로 인해 구성 요소가 손상되면 이러한 기능의 부분 혹은 전체가 상실될 수 있다. 전투 시스템의 신뢰성 분석에서는 이러한 기능 상실의 정도와 피해의 유형을 나타내기 위하여 피해 기준을 사용한다[49-53]. 본 논문에서는 전투 시스템의 주요 기능과 관련한 피해 기준으로, 공격 기능의 상실을 F-Kill, 이동 기능의 상실을 M-Kill, 방어 기능의 상실을 A-Kill, 탐지 기 능의 상실을 S-Kill, 통신 기능의 상실을 C-Kill이라고 표현한다. 또한, 완파의 경우를 K-Kill이라고 표현하며, 이러한 여섯 가지 피해 기준을 표 2.2에 정리하 였다. 예를 들어, 전투 시스템의 이동 기능과 관련된 구성 요소가 손상되어 이 동이 불가능한 상태가 되면, 전투 시스템은 이동 기능을 상실한 상태가 되고, 이를 M-Kill 상태라고 표현한다. 공격 기능과 관련된 두 개의 구성 요소 중 하 나가 손상되면, 공격 기능이 부분적으로 상실되고 50%의 F-Kill 발생했다고 표 현한다. 또한, 전투 시스템의 주요 기능을 상실하여 임무수행이 불가능한 상태 가 되면, 이를 K-Kill 상태라고 표현한다[16, 43-45].



표 2.2 전투 시스템의 기능별 피해 기준

Table 2.2 Kill criteria of combat systems

피해 기준	의미
F-Kill	공격 기능 상실
A-Kill	방어 기능 상실
M-Kill	이동 기능 상실
S-Kill	탐지 기능 상실
C-Kill	통신 기능 상실
K-Kill	완파

2.2.4 선행 연구의 한계점

최근, 전투 시스템의 신뢰성 분석에 관한 연구는 전투 시스템 하나만을 대상 으로 하는 것이 아니라, 전술 통제 본부를 비롯해 모든 전투 시스템을 포함한 전투 환경 전체를 대상으로 하는 것으로 변화하고 있다[14-15]. 하지만 전투 환 경 전체를 대상으로 하는 분석의 신뢰성을 높이려면, 개별 전투 시스템에 관한 신뢰성 분석부터 체계적으로 이루어져야 한다.

전투 시스템의 신뢰성 분석을 위하여 [17-19]의 연구에서는 함정의 전투 환경 에서 위협, 함정의 구성 요소, 위협에 따른 구성품의 취약 확률을 정의하여 구 성품의 위치와 면적에 따른 취약 확률로 신뢰성을 평가하는 방법을 제안하였 다. 취약 면적을 기반으로 하여 함정의 단순 모델을 이용하여 이동 기능과 관 련된 구성 요소의 신뢰성을 분석하는 방법을 제안하였다. 또한, [20]의 연구에 서는 함정에 대한 위협을 분석하고, 취약 면적을 기반으로 피격에 의한 함정의 신뢰성 변화를 수학적으로 분석하였으며, 분석 대상이 되는 주요 구성 요소를 결정하기 위한 방법으로 FTA 및 FMECA 기법을 이용하였다. 이들 연구에서는 신뢰성 분석의 대상과 목적이 함정과 피격으로 제한되어 있으며, 방호 성능을



고려하지 않았다.

[54]의 연구에서는 여러 척도를 적용하여 전투기의 신뢰성을 퍼지 이론을 기 반으로 정성적으로 분석하는 기법을 제안하였고, [21]의 연구에서는 전투기의 구성 요소를 상용 3차원 CAD 소프트웨어인 CATIA로 모델링한 후, 이를 기반 으로 FTA 기법을 적용하여 신뢰성을 분석하는 방법을 제안하였다. [55]의 연구 에서는 위협의 원리, 구조 등의 특성을 반영하여 전투 시스템을 관통하는 과정 의 물리적 특성을 이용한 신뢰성 분석 방법을 제안하였다. 이들 연구에서는 신 뢰성 분석의 대상을 전투기로 국한하고 있으며, 제안한 방법을 적용하여 컴퓨 터 기반의 신뢰성 분석 시스템을 개발하지 않고 이론적으로 검증하거나 상용 3 차원 CAD 소프트웨어에서 제공하는 기능을 통해 검증하였다.

이 밖에도 [14-15]의 연구에서는 전투 시스템의 신뢰성 분석을 위한 기초 연 구로서 전차를 대상으로 3차원 기반의 관통 분석 방법을 제안하고 제안한 방법 을 적용한 관통 분석 프로그램을 개발하였다. [9]의 연구에서는 모델링 및 시뮬 레이션을 기반으로 승무원의 대응에 따른 신뢰성의 변화를 분석하기 위한 방법 으로 SES/MB 프레임워크 및 DEVS 형식론을 적용하여 에이전트 기반 전차 신 뢰성 분석 시스템을 개발하였다. 또한, [16]의 연구에서는 SES/MB 프레임워크 및 DEVS 형식론을 전차에 적용하여 전차의 구조를 모델링하고, 이를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 구성 요소 및 장갑의 방호 성능을 설정하고, 관통 분 석식을 통해 위협의 관통 여부 및 피해 정도를 결정하였으며, 중요도를 기반으 로 전차의 신뢰성을 분석하였다. 또한, [56-57]의 연구에서는 화재에 대한 전차 의 신뢰성을 분석하기 위하여 연료 탱크 및 탄약고와 같이 화재 발생 가능성을 가진 구성 요소를 대상으로 화재의 발생 가능성을 예측하는 프로그램을 개발하 였다. 이들 연구에서는 신뢰성 분석의 대상이 전차로 국한되고 있고, 관통, 손 상, 화재 등과 같은 목적에 따라 개별적으로 분석하고 있으므로 통합적인 고려 가 이루어져야 한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 한계를 보완하기 위하여 모델링 및 시뮬레이션



기반 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법론을 제안하며, FTA 기법 및 FMECA 기법을 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석에 적용하기 위한 방법을 제안 한다. 또한, 제안한 방법을 바탕으로 전투 시스템의 통합 생존성 분석 시스템을 개발하며, 이를 통해 제안한 방법론의 유용성을 검증한다.





제 3 장 모델링 및 시뮬레이션 기반의 전투 시스템 통합 신뢰성 분석

3.1 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정

본 논문에서 제안하는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법론은 다음과 같 은 네 단계로 이루어지며, 그림 3.1에 그 과정을 도식화하여 나타냈다.

- 1단계 : 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정
- 2단계 : 모델 선택 및 생성
- 3단계 : 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행
- 4단계 : 통합 신뢰성 분석

1단계(사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정)에서는 구축된 모델 베이스를 기반으로 어떤 전투 시스템을 대상으로 신뢰성 분석을 수행할 것인지, 어떤 피 해 기준에 대한 분석이 필요한지, 어떠한 위협에 대하여 분석을 원하는지 등에 관한 사용자의 요구 명세를 수행한다. 분석 대상이 되는 전투 시스템의 구성 요소별 속성 및 가중치를 설정하고, 구성 요소 간의 관계 등을 나타내는 구조 정의를 비롯한 전투 시스템의 신뢰성 분석을 위한 시나리오를 작성한다. 또한, 설정한 전투 시스템의 구조를 기반으로 가중치 트리를 생성하고, 생성된 가중 치 트리를 기반으로 각 구성 요소별 중요도를 산정한다.





그림 3.1 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정 Fig. 3.1 Process of the reliability analysis methodology for combat systems

2단계(모델 선택 및 생성)에서는 1단계에서 작성한 사용자 요구 명세 및 시나 리오를 기반으로 구축되어 있는 구성 요소 속성 모델, 영향 요소 모델, 3D 구 성 요소 모델, 위협 모델에 관한 모델 베이스에서 각 모델을 선택하여 생성한 다. 이를 위해 1단계인 사용자 요구 명세 및 시나리오 설정 단계를 위한 모델 베이스가 구축되어야 한다.

Collection

3단계(시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행)에서는 2단계에서 생성한 모 델을 결합하여 시뮬레이션 구조를 생성하고, 설정한 위협 모델을 이용하여 다 중 관통선 기반의 피격 확률 분석 시뮬레이션을 수행한다. 이때, 구성 요소의 유형에 따른 장갑의 관통 분석, 일반 부품의 손상 분석, 치명 부품의 화재(폭 발) 분석, 승무원에 대한 충격 분석과 같은 영향 요소 분석이 함께 이루어진다.

4단계(통합 신뢰성 분석)에서는 3단계에서 도출된 구성 요소별 피격 확률을 기반으로 FTA 기법을 적용한 후, 피해 기준별 상실 확률을 도출하여 기능 수 준의 신뢰성 분석한다. 또한, 1단계에서 산정된 중요도와 3단계의 시뮬레이션을 통해 분석된 피격 확률을 기반으로, FMECA 기법을 적용하여 구성 요소별 통 합 위험도를 계산하여 구성 요소 수준의 신뢰성을 분석한다.

전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법은 이러한 일련의 과정을 통해 이루어 지게 된다. 제안하는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정을 적용하기 위해 선행되어야 하는 모델 베이스의 구축에 관한 내용을 3.2절에서 자세히 설명하 며, 1단계 ~ 4단계에 대한 각각의 내용은 3.3절 ~ 3.6절에서 자세히 설명한다.




3.2 신뢰성 분석을 위한 모델 베이스 구축

제안하는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법의 2단계인 모델 선택 및 생 성 단계에서는 1단계에서 작성한 사용자 요구 명세 및 시나리오를 기반으로 하 여 미리 구축되어 있는 모델 베이스에서 구성 요소 속성 모델, 영향 요소 모델, 3D 구성 요소 모델, 위협 모델을 선택하여 생성한다. 따라서 1단계의 사용자 요구 명세 및 시나리오 설정을 위한 모델 베이스 구축이 선행되어야 한다.

구성 요소 속성 모델 베이스는 구성 요소의 유형에 따른 속성 등을 포함하고 있으며, 영향 요소 모델 베이스는 장갑의 방호 성능, 일반 부품의 내구도, 치명 부품의 화재, 승무원의 충격 등 영향 요소의 분석과 관련된 속성 등을 포함하 고 있다. 또한, 3D 구성 요소 모델 베이스는 3차원 CAD 기반으로 모델링한 전 투 시스템의 여러 구성 요소를 포함하고 있으며, 구성 요소 속성 모델은 3D 구 성 요소 모델과 결합되어 신뢰성 분석에 활용된다. 위협 모델 베이스는 모델링 된 위협의 종류 및 관통 성능 등의 속성을 포함하고 있다.

3.2.1 전투 시스템의 구성 요소 속성 모델링

본 논문에서는 전투 시스템의 구성 요소를 "장갑(armor)", "일반 부품(normal component)", "치명 부품(critical component)", "승무원(crew)"의 네 가지의 유형으로 구분하여 구성 요소 속성 모델에 관한 모델 베이스를 구축한다. 먼저, 장갑 은 위협으로부터 전투 시스템 내부의 구성 요소나 승무원을 보호하기 위한 목 적으로 방호 성능을 가지고 있는 구성 요소를 의미하며, 치명 부품은 피격 시 화재(폭발)의 발생 가능성이 있는 구성 요소로 정의한다[57]. 승무원은 전투 시 스템의 임무 수행과 관련하여 필요한 인원을 의미하며[9], 일반 부품은 장갑, 치명 부품, 승무원을 제외한 나머지 구성 요소를 뜻한다.

장갑, 일반 부품, 치명 부품, 승무원은 각 유형에 따라 가지는 속성이 다르며, 추가적으로 구성 요소별 중요도를 산정하기 위한 가중치를 가진다. 장갑의 경



우는 방호 성능이 계산되어야 하기 때문에 종류, 두께, 재질에 따른 밀도에 관 한 속성과 가중치를 가져야 하고, 일반 부품은 두께 및 내구도에 관한 속성과 가중치를 가져야 한다. 또한, 치명 부품은 포함하고 있는 연료 혹은 폭약의 종 류에 관한 속성, 영향 범위 내 구성 요소에 대한 정보, 가중치를 가지고 있어야 한다. 승무원의 경우에는 가중치만을 속성으로 가지고, 직접 피격을 비롯하여 충격으로 인한 간접 영향을 받는다고 정의하며, 이러한 전투 시스템 구성 요소 의 유형에 따른 속성을 표 3.1에 정리하였다.

표 3.1 전투 시스템 구성 요소의 유형별 속성

유형	속성	영향 요소 분석
장갑	두께 재질(밀도) 종류 가중치	관통 분석
일반 부품	두께 내구도 가중치	손상 분석
치명 부품	연료/폭약의 종류 영향력 영향 범위 내 구성 요소 가중치	화재(폭발) 분석
승무원	가중치	충격 분석

Table 3.1 Properties for types of components



피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션 수행 시 전투 시스템의 구성 요소 속성 모델의 유형에 따라 관통, 손상, 화재(폭발), 충격에 의한 영향 분석이 이루어지 며, 이때 각 구성 요소의 속성이 사용된다. 이러한 관통, 손상, 화재(폭발), 충격 에 의한 영향 분석을 위한 영향 요소 모델에 관한 내용은 다음 절에서 자세히 기술한다.

3.2.2 전투 시스템의 영향 요소 모델링

영향 요소 모델에 관한 모델 베이스를 구축하기 위하여 구성 요소의 관통, 손상, 화재, 충격에 관한 영향에 관해서 모델링을 수행한다. 앞서 언급하였듯이 장갑의 경우 관통 분석, 일반 부품의 경우 손상 분석, 치명 부품의 경우 화재 (폭발)로 인한 영향 분석, 승무원의 경우 충격에 의한 영향 분석이 이루어진다.

(1) 관통 및 손상 분석을 위한 장갑과 일반 부품의 방호 성능 모델링 1) 전투 시스템의 방호 성능

전투 시스템의 방호 성능은 표면경화장갑이나 균질압연장갑(RHA) 등 장갑 혹은 외판의 제조 및 가공 방법과 재질에 따른 밀도, 두께 등에 의해서 결정된 다. 하지만 최근에는 위협이 계속해서 발전하여 피해가 증가함에 따라 방호 성 능을 높이기 위한 수단으로 복합장갑이나 반응장갑 등이 등장하게 되었고, 능 동방어체계(APS)와 같은 첨단 장비도 탑재되고 있다. 여기서, 복합 장갑은 여러 종류의 위협에 대응하기 위하여 장갑판 사이에 탄소 섬유나 세라믹 등의 복합 소재를 채워 넣어 방호 성능을 높인 장갑을 의미하며, 반응 장갑은 피격 순간 장갑이 폭발하여 위협의 관통 성능을 저하시키기 위한 장갑을 의미한다. 또한 능동방어체계는 레이더에 위협이 감지되면, 대응탄을 발사하여 이를 격추시켜 무력화시키기 위한 시스템을 말한다[14-15].



이처럼, 전투 시스템의 방호 성능은 장갑뿐만 아니라 다른 요소들도 종합적 으로 고려되어 결정되어야 하지만 이를 일반화하여 정량적으로 표현하기는 매 우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 전투 시스템의 방호 성능은 장갑과 일반 부 품이 가지는 것으로 정의하며, 치명 부품과 승무원은 방호 성능을 가지지 않는 것으로 정의한다. 장갑의 경우에는 단일장갑 및 복합장갑을 균질압연장갑 기준 으로 환산하여 적용하고, 일반 부품의 경우에는 내구도를 고려하여 적용한다.

2) 관통 분석식

전투 시스템이 위협에 의해 피격되면 가장 먼저 구성 요소의 관통 유무에 대 한 분석이 이루어져야 한다. 전투 시스템을 구성하는 요소는 위치에 따라 외부 에 노출되어 있어 장갑의 보호를 받지 못할 수도 있고, 내부에 있어 장갑의 보 호를 받을 수도 있다. 만약, 구성 요소가 피격되면 구성 요소의 손상 여부 및 동일 피격선상의 다른 구성 요소로 전달될 잔류 관통 성능의 분석이 이루어져 야 하고, 장갑이 피격되면 관통 분석을 비롯하여 전투 시스템 내부의 다른 구 성 요소에 미치는 영향을 분석하기 위한 잔류 관통 성능의 분석이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 위협의 관통 성능에 대한 장갑의 방호 성능 및 일반 부품 의 내구도가 고려되어야 한다. 여러 관통 분석식이 존재하지만 본 논문에서는 [10-11]에서 사용하는 관통 분석식을 응용하여 적용하였으며, 이를 식 (3.1) ~ 식 (3.3)에 나타내었다.

식 (3.1)은 RHA 대비 장갑의 방호 성능을 계산하기 위한 식으로 *ST*_{eq}는 기준 물질인 RHA 대비 장갑의 방호 성능, *L*_{path}는 피격 경로에 의한 두께, *P*_{armor}는 장갑 재질의 밀도, *P*_{RHA}는 기준 물질인 RHA의 밀도(*P*_{RHA} = 7.85g/cm³)를 의미 하며, 식 (3.2)는 일반 부품이 피격되었을 경우에 감내할 수 있는 방호 성능을 계산하기 위한 식으로 *D*_{component}는 일반 부품의 내구도, *L*_{path}는 피격 경로에 의한 두께(path length), *T*_{component}는 일반 부품이 위협의 관통 성능을 견디는 정도인 감 내도를 의미한다. 또한, 식 (3.3)은 잔류 관통 성능을 계산하는 식으로 *P*_{res}는 잔

- 23 -



류 관통 성능, P₀는 위협의 관통 성능을 의미하는데, 계산된 P_{res}가 양수 값이면 관통이 되었다는 것을 의미하며, 음수 값이면 관통되지 않았다는 것을 의미한 다[14-15].

$$ST_{eq} = \frac{L_{path} \times \rho_{armor}}{\rho_{RHA}}$$
(3.1)

$$D_{component} = L_{path} \times T_{component}$$
(3.2)

$$P_{res} = \begin{cases} P_0 - ST_{eq} & \text{if } armor \\ P_0 - D_{component} & \text{if } normal \ component \end{cases}$$
(3.3)

추가적으로, 장갑의 종류에 따른 방호 성능을 분석하기 위해서는 위협의 특 성이 고려되어야 한다. 위협의 종류로는 운동 에너지탄과 화학 에너지탄이 있 는데, 일반적으로 운동 에너지탄은 복합 장갑에 강하고, 화학 에너지탄은 균질 압연장갑에 강한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 위협의 종류 및 장갑의 종류를 고려하여 RHA 대비 방호 성능(*ST_{eq}*)이 변화하는 것으로 정의한 다. 이렇게 변화하는 관통 성능의 배율을 표 3.2에 정리하였고, 식 (3.3)은 식 (3.4)와 같이 재-정의되며, 여기서 *S_{DA}*는 방호 성능 변화 배율을 의미한다. 예를 들어, 운동 에너지탄에 의해 균질압연장갑이 피격되었다고 가정하면, 관통 분석 시 방호 성능은 '*ST_{eq}* × 1.1'과 같이 환산하여 적용한다. 만약, 장갑이 관통된 후 다른 구성 요소를 피격하더라도 배율에 의해 변화된 잔류 관통 성능을 적용 하는 것으로 정의한다.

Collection

표 3.2 방호 성능 변화 배율

Table	3.	2	Changing	rate	for	defense	ability
		_					

위협의 종류	장갑의 종류	방호 성능 변화 배율
운동 에너지탄	균질압연장갑	1.1
(KE)	복합장갑	0.9
화학 에너지탄	균질압연장갑	0.8
(CE)	복합장갑	1.2

 $P_{res} = P_0 - (ST_{eq} \times S_{DA}) \tag{3.4}$

예를 들어, 그림 3.2와 같이 장갑과 일반 부품이 위협에 의한 피격선 상에 있 다고 가정한다. 이때, 장갑의 종류가 복합장갑, 두께(*L*_{path})가 600mm, 장갑의 밀 도(*P*_{armor})가 4g/cm³이라고 가정하면, RHA 대비 방호 성능(*ST*_{eq})은 식 (3.1)에 의 해 '600 × 4 / 7.85 = 305.73'이 된다. 또한, 위협의 종류가 화학 에너지탄(CE)이 고, 관통 성능(*P*₀)이 500mm이라고 가정하면, 방호 성능인 *ST*_{eq}는 0.9의 배율을 가지기 때문에 잔류 관통 성능(*P*_{res})은 식 (3.4)에 의해 '500 - (305.73 × 0.9) = 224.84'가 된다. 따라서 장갑이 위협에 의해 관통되었고, 잔류 관통 성능이 '224.84'이라는 것을 알 수 있다. 그 후, 두께가 50mm, 내구도가 1.1인 일반 부 품이 피격되면, 식 (3.2)에 의해 일반 부품의 내구도(*D*_{component})는 '50 × 1.1 = 55' 가 되고, 잔류 관통 성능과 계산된 일반 부품의 내구도를 식 (3.3)에 적용하면, '224.84 - 55 = 169.84'가 되며, 장갑과 일반 부품을 관통한 후의 잔류 관통 성 능은 '169.84'이라는 것을 알 수 있다. 이러한 방법으로 계산된 잔류 관통 성능 은 동일 피격선 상에 있는 다른 구성 요소의 손상 등 영향을 분석하기 위하여 사용된다[16].





그림 3.2 관통 및 손상 분석의 예

Fig. 3.2 An example of penetration and damage analysis

(2) 화재(폭발) 분석을 위한 치명 부품의 영향 모델링

1) 위협의 종류에 따른 화재(폭발) 유무

전투 시스템을 구성하는 구성 요소 중에서 폭발이 발생할 가능성이 존재하는 구성 요소는 연료 탱크나 탄약고 등이 될 수 있다. 만약, 화재 가능성이 있는 구성 요소가 피격되면 주변 구성 요소 혹은 전투 시스템 전체의 신뢰성에 영향 을 미칠 수 있으며 영향의 정도는 위협의 종류, 연료의 종류, 탄약의 종류에 따 라 달라질 수 있다. [58-65]의 연구에서는 위협의 종류에 따른 연료 및 폭약의 화재 가능성을 분석하기 위하여 화재 발생 유무를 실험하였으며, 그 결과를 표 3.3에 정리하였다. 연료의 종류로는 휘발유, 경유, 등유를 이용하였으며, 폭약의 종류로는 COMPB, TNT, PBX, ANB를 이용하였다. 위협의 특성이 운동 에너지 탄인 경우에 비해서 화학 에너지탄일 경우에 상대적으로 여러 종류의 연료나 폭약에 화재가 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 연료 및 폭약은 상대적으로 화 학 에너지탄에 취약한 것을 알 수 있다. 치명 부품의 포함하고 있는 연료 혹은 폭약의 종류와 위협의 종류를 기반으로 화재(폭발)에 대한 영향 분석을 수행한 다.



연료 탱크 및 적재 포탄 등 전투 시스템의 치명 부품이 피격되어 화재 혹은 폭발이 발생하게 되면, 연료 혹은 폭약의 종류에 따라 주변 구성 요소에 영향 을 주거나 K-Kill이 발생할 수 있다. 예를 들어, 육상의 전차나 공중의 전투기와 같이 상대적으로 작은 규모의 전투 시스템은 치명 부품의 피격 시 연쇄 화재 (폭발)로 인해 K-Kill이 발생할 가능성이 높다. 상대적으로 큰 규모의 해상의 함 정과 같은 전투 시스템의 치명 부품이 피격되면 K-Kill은 발생하지 않더라도 큰 피해를 입을 가능성이 있다.

표 3.3 위협에 따른 연료 및 폭약의 화재 발생 유무 Table 3.3 Fire occurrence of fuels and explosives by type of threats

위협의 종류	연료/폭약 종류	화재 발생 유무
	휘발유	미화재
i l	경유	미화재
	두유	미화재
운동 에너지탄	СОМРВ	미화재
	1 TNT 6	화재
	PBX	화재
	ANB	미화재
	휘발유	화재
	경유	화재
	드아	화재
화학 에너지탄	СОМРВ	화재
	TNT	화재
	PBX	화재
	ANB	미화재



2) 연료 및 폭약의 종류에 따른 영향력과 영향 범위

연료나 폭약의 종류에 따라 화재 및 폭발 시 발생하는 영향력이 달라진다. 본 논문에서는 연료의 경우, 에너지 열량 환산 기준에 따라 총발열량을 고려하 여 영향력을 결정하고, 폭약의 경우에는 TNT를 기준으로 폭발물의 힘을 측정 하기 위한 RE 계수에 따라 영향력을 결정한다. 연료의 총발열량은 경유(9200 Kcal/L), 등유(8700 Kcal/L), 휘발유(8300 Kcal/L)의 순서이며, 폭약의 RE 계수는 COMPB(1.33), PBX(1.10 ~ 1.17), TNT(1.00), ANB(0.42)의 순서로 알려져 있다. 그러나 연료의 총발열량과 영향력의 상관관계를 정확하게 정의할 수 없고, 폭 약의 TNT 기준 RE 계수는 상대적인 수치이며, 폭약의 정확한 영향력은 알려져 있지 않다. 따라서 치명 부품의 피격 시 연료나 폭약의 종류에 따른 영향력과 영향 범위를 알려진 총발열량과 RE 계수를 기반으로 표 3.4와 같이 정의하였다 [66]. 이때, 영향력은 위협의 관통 성능을 기준으로 표현하며, 영향 범위는 전투 시스템을 구성하는 다른 구성 요소와의 거리를 기준으로 하여 사용자가 정의한 다.

표 3.4 연료 및 폭약의 영향력 및 영향 범위 Table 3.4 Effectiveness and range of fuels and explosives

연료/폭약 종류	영향력
휘발유	83
경유	92
두하	87
COMPB	133
TNT	100
PBX	110
ANB	42



(3) 충격 분석을 위한 승무원의 영향 모델링

피격으로 인해 충격이나 폭발이 발생하게 되면, 그 주변의 대기가 압축되고, 이로 인해 충격파(shock wave) 혹은 고압파(overpressure wave)가 발생된다. 특히, 폐쇄된 공간의 경우에는 충격파가 벽 등에 반사되어 진폭 및 노출 시간을 크게 만들기 때문에 개방된 공간에 비해 더 큰 영향을 받는다. 따라서 전투 시스템 내부에 탑승하고 있는 승무원은 위협에 의한 충격이나 폭발에 의한 영향을 상 대적으로 더 많이 받게 되며 고막과 같은 청각 기관 등이 손상되기 쉽다[67].

승무원은 전투 시스템의 임무 수행과 관련하여 필요한 인원을 의미하며, 각 승무원은 고유의 역할을 가진다. 예를 들어, 육상의 대표적인 전투 시스템인 전 차에는 승무원으로 전차장, 포수, 조종수가 탑승한다. 전차장의 경우는 전차의 지휘를 비롯하여 전술 지휘 본부 등과의 통신 역할을 수행하고, 포수는 포를 조준하는 등 공격과 관련 역할을 수행하며, 조종수는 이동과 관련한 역할을 수 행한다. 또한, 해상의 전투 시스템인 함정의 경우에는 크게 함(정)장, 통신장, 기관장, 포술장 등의 승무원이 있을 수 있으며, 전차의 경우와 유사하게 함장은 함정의 지휘를 비롯하여 탐지와 관련한 역할, 통신장은 통신과 관련한 역할, 기 관장은 이동과 관련한 역할, 포술장은 공격과 관련한 역할을 수행한다.

위협에 의해 전투 시스템이 피격되었을 경우, 장갑이 관통되어 피격선 상에 있는 구성 요소가 직접적으로 손상될 수 있다. 하지만 장갑이나 구성 요소가 피격선 상에 있지 않더라도 충격으로 인하여 전투 시스템을 구성하는 요소의 간접적인 손상이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 간접적인 손상인 충격에 대한 분석이 이루어져야 한다. 앞서 언급했던 것과 같이 본 논문에서는 승무원이 충 격에 의해 영향을 받는다고 정의한다.

본 논문에서는 다음과 같은 경우에 승무원이 충격에 의한 영향을 받는다고 정의한다. (1) 위협이 장갑을 관통한 경우, (2) 장갑이 관통되지는 않았지만 장 갑의 80% 이상이 손상되었을 경우, 즉 승무원이 피격선 상에 있지 않더라도 장 갑이 관통되거나 80%이상이 손상되었을 경우 승무원은 영향을 받는다.



3.2.3 전투 시스템의 3차원 구성 요소 모델링

(1) 분석 대상 선정

신뢰성 분석의 대상이 되는 전투 시스템의 구성 요소를 선정하고 3차원 CAD 를 기반으로 모델링하여 3D 구성 요소 모델에 관한 모델 베이스를 구축한다. 실제로는 육상, 해상, 공중 등에서 국방과 관련된 임무를 수행하는 수많은 종류 의 전투 시스템이 있지만, 본 논문에서 제안하는 방법론의 검증을 위해서 전차 (AFV) 및 고속정(PKM)을 대상으로 신뢰성 분석을 수행한다. 또한, 전차 및 고 속정은 수많은 요소들로 구성되지만, 국방 분야의 특성상 이러한 정보에 쉽게 접근할 수 없다는 어려움이 있으므로 모든 구성 요소를 대상으로 분석을 수행 하기에는 한계점이 존재한다. 이러한 이유로 본 논문에서는 피해 기준인 F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill과 관련된 전차 및 고속정의 주요 구성 요소를 선 정하여 3차원 CAD 기반 모델링을 수행하였다.

(2) 전차 및 고속정의 주요 구성 요소 선정

본 논문에서 제안한 방법론의 검증을 위하여 선정한 전차의 피해 기준별 주 요 구성 요소와 구성 요소의 유형을 표 3.5에 목록으로 나타내었다. 일반적으로 전차에는 승무원으로 전차장을 비롯하여 조종수, 포수, 탄약수가 탑승하여 각각 의 임무를 수행한다. 이때, 전차의 종류에 따라 자동장전장치의 유무에 따라 탄 약수의 탑승 여부가 결정되기 때문에 총 탑승 인원은 3명 혹은 4명이 될 수 있 는데, 본 논문에서는 전차에 3명이 승무원이 탑승한다고 가정한다. F-Kill 관련 구성 요소로는 주포, 사격 통제 장치, 탄약고(1), 탄약고(2), 탄약고(3), 포수를 선정하였고, M-Kill 관련 구성 요소로는 엔진, 연료탱크(좌), 연료탱크(우), 무한 궤도(좌), 무한궤도(우), 조종수를 선정하였으며, A-Kill 관련 구성 요소로는 장 갑(상), 장갑(하), 능동 방어 체계(좌), 능동 방어 체계(우), 연막탄 발사기(좌), 연 막탄 발사기(우)를 선정하였다. 또한 S-Kill 관련 구성 요소로는 잠망경, 해치(1),





해치(2), 해치(3)을 선정하였으며, C-Kill 관련 구성 요소로는 무전기, 안테나(좌), 안테나(우), 전차장을 선정하였다.

표 3.5 선정한 전차의 주요 구성 요소 및 유형 Table 3.5 Selected components and type of AFV

피해 기준	구성 요소명	유형
	주포	일반 부품
	사격 통제 장치	일반 부품
F-Kill	탄약고(1)	치명 부품
(공격 관련 구성 요소)	탄약고(2)	치명 부품
	탄약고(3)	치명 부품
	포수	승무원
	엔진	일반 부품
	연료 탱크(좌)	치명 부품
M-Kill	연료 탱크(우)	치명 부품
(이동 관련 구성 요소)	무한궤도(좌)	일반 부품
	무한궤도(우)	일반 부품
	조종수	승무원
	장갑(상)	장갑
	장갑(하)	장갑
A-Kill	능동 방어 체계(좌)	일반 부품
(방어 관련 구성 요소)	능동 방어 체계(우)	일반 부품
	연막탄 발사기(좌)	일반 부품
	연막탄 발사기(우)	일반 부품



표 3.5 선정한 전차의 주요 구성 요소 및 유형(계속) Table 3.5 Selected components and type of AFV (cont.)

피해 기준	구성 요소명	유형
	잠망경	일반 부품
S-Kill	해치(1)	일반 부품
(탐지 관련 구성 요소)	해치(2)	일반 부품
	해치(3)	일반 부품
C-Kill (통신 관련 구성 요소)	무전기	일반 부품
	안테나(좌)	일반 부품
	안테나(우)	일반 부품
	전차장	승무원

고속정의 경우도 마찬가지로 주요 구성 요소를 선정하였으며, 선정한 피해 기준별 구성 요소와 구성 요소의 유형을 표 3.6에 목록으로 나타내었다. 일반적 으로 고속정에는 전차에 비해 많은 승무원이 탑승하여 각자의 임무를 수행한 다. 참수리급 고속정에는 일반적으로 30명 내외의 승무원이 탑승하는데, 본 논 문에서는 20명으로 단순화하여 모델링을 수행하였다. F-Kill 관련 구성 요소로 는 포(1), 포(2), 포(3), 탄약고(1), 탄약고(2), 탄약고(3), 포술장, 포_승무원(1), 포 _승무원(2), 포_승무원(3), 포_승무원(4)를 선정하였고, M-Kill 관련 구성 요소로 는 엔진, 조타기, 연료탱크(좌), 연료탱크(우), 스크류 프로펠러(좌), 스크류 프로 펠러(우), 기관장, 조타장, 기관_승무원(1), 기관_승무원(2), 기관_승무원(3)을 선 정하였으며, A-Kill 관련 구성 요소로는 장갑(상), 장갑(중), 장갑(하), 방어_승무 원(1), 방어_승무원(2), 방어_승무원(3), 방어_승무원(4), 방어_승무원(5)를 선정하 였다. 또한 S-Kill 관련 구성 요소로는 레이더, 정장, 탐지_승무원(1), 탐지_승무 원(2)를 선정하였으며, C-Kill 관련 구성 요소로는 안테나(좌), 안테나(우), 통신 장비, 통신장, 통신 승무원을 선정하였다.



표 3.6 선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형

Table 3.6 Selected components and type of PKM

구성 요소명	구성 요소명	유형
	포(1)	일반 부품
	포(2)	일반 부품
	포(3)	일반 부품
	탄약고(1)	치명 부품
	탄약고(2)	치명 부품
F-Kill (공격 관련 구성 요소)	탄약고(3)	치명 부품
	포술장	승무원
	포_승무원(1)	승무원
	포_승무원(2)	승무원
2	포_승무원(3)	승무원
	포_승무원(4)	승무원
	엔진	일반 부품
	조타기	일반 부품
	연료탱크(좌)	치명 부품
	연료탱크(우)	치명 부품
	스크류 프로펠러(좌)	일반 부품
M-Kill (이동 관련 구성 요소)	스크류 프로펠러(우)	일반 부품
	기관장	승무원
	조타장	승무원
	기관_승무원(1)	승무원
	기관_승무원(2)	승무원
	기관_승무원(3)	승무원



표 3.6 선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형(계속) Table 3.6 Selected components and type of PKM (cont.)

구성 요소명	구성 요소명	유형
	장갑(상)	장갑
	장갑(중)	장갑
	장갑(하)	장갑
A-Kill	방어_승무원(1)	승무원
(방어 관련 구성 요소)	방어_승무원(2)	승무원
	방어_승무원(3)	승무원
	방어_승무원(4)	승무원
	방어_승무원(5)	승무원
	레이더	일반 부품
S-Kill	정장	승무원
(탐지 관련 구성 요소)	탐지_승무원(1)	승무원
	태지_승무원(2)	승무원
	안테나(좌)	일반 부품
	안테나(우)	일반 부품
C-Kill (통신 관련 구성 요소)	통신장	승무원
	통신_승무원(1)	승무원
	통신장비	일반 부품



(3) 선정된 구성 요소의 3차원 모델링

3D 구성 요소 모델 베이스를 구축하기 위하여 선정한 전차 및 고속정의 주 요 구성 요소를 상용 CAD 소프트웨어인 Rhino 5를 이용하여 3차원으로 모델링 하였으며, 이를 그림 3.3 및 그림 3.4에 나타냈다. 본 논문에서는 3D 구성 요소 모델 베이스를 구축을 위해 3차원 CAD 파일 형식인 IGES(.igs)를 이용한다. IGES는 ANSI 표준으로, CAD와 같은 디지털 그래픽 데이터 교환을 위한 중립 적인 파일 형식이다.



그림 3.3 전차의 3차원 구성 요소 모델링 Fig. 3.3 Modelling for 3D components of AFV





그림 3.4 고속정의 3차원 구성 요소 모델링 Fig. 3.4 Modelling for 3D components of PKM

전차의 경우, 앞서 정의한 총 26개의 주요 구성 요소를 3차원으로 모델링하 였으며, 각 구성 요소는 3차원 좌표를 가지고 있다. 각 구성 요소 모델은 우리 나라 육군의 주력 전차인 KIAI 및 K2 등을 참고하여 알려져 있는 일반적인 전차의 구조와 유사하게 배치하였다. 그림 3.5 및 그림 3.6에 모델링한 전차의 측면과 상부면의 모습을 나타냈으며, 전차를 구성하는 3차원 구성 요소 모델이 배치된 위치를 확인할 수 있다. 여기서, 파란색으로 표시된 부분은 외부 구성 요소이고, 빨간색으로 표시된 구성 요소는 내부 구성 요소를 의미한다.





그림 3.5 3차원으로 모델링한 전차의 구성 요소(측면) Fig. 3.5 3D CAD models of components for AFV(side view)



그림 3.6 3차원으로 모델링한 전차의 구성 요소(상부면) Fig. 3.6 3D CAD models of components for AFV(top view)



또한, 고속정의 경우도 전차와 마찬가지로 앞서 정의한 총 39개의 구성 요소 를 3차원으로 모델링 하였고, 우리나라 해군의 대표적인 고속정인 참수리급 고 속정을 참고하여 유사한 3차원 좌표에 각 구성 요소를 배치하였다. 그림 3.7 및 그림 3.8에 3차원으로 모델링한 고속정의 측면과 상부면의 모습을 나타냈으며, 고속정을 구성하는 3차원 구성 요소 모델이 배치된 위치를 확인할 수 있다.



그림 3.7 3차원으로 모델링한 고속정의 구성 요소(측면) Fig. 3.7 3D CAD models of components for PKM(side view)

1945



그림 3.8 3차원으로 모델링한 고속정의 구성 요소(상부면) Fig. 3.8 3D CAD models of components for PKM(top view)





3.2.4 위협 모델링

(1) 위협의 정의

위협 모델에 관한 모델 베이스 구축을 위하여 전투 시스템에 가해질 수 있는 위협에 관한 모델링을 수행한다. 전투 시스템의 신뢰성 분석에서 위협이란, 전 투 시스템의 임무 수행 능력을 저하시킬 가능성이 있는 모든 인위적인 외부 요 소를 의미한다[3]. 최근, 고출력 레이저, 고출력 전자파, 입자 빔 등의 기술을 기반으로 하는 지향성 에너지 무기(DEW)와 같은 첨단 무기 체계가 등장하는 등 위협의 종류가 다양화되고 있다[68]. 하지만 이러한 첨단 무기 체계는 현재 연구 및 개발 초기 단계이며, 관통 성능 등을 정량화하기 위한 연구는 미비하 다. 따라서 본 논문에서는 직접 전투 시스템을 피격하여 피해를 주기 위한 일 반적인 위협인 총탄, 포탄, 미사일, 어뢰를 기준으로 전투 시스템의 신뢰성을 분석한다.

총탄은 권총, 소총 등의 개인 화기에서 발사되는 탄을 의미하고, 포탄은 자주 포, 전차의 주포, 함정의 함포 등 전투 시스템의 포에서 발사되는 탄을 의미한 다. 또한, 미사일은 유도 장치 및 추진 장치가 있는 로켓탄을 의미하며, 어뢰는 스크류 프로펠러의 추진력을 이용하는 수중 미사일을 의미한다. 이러한 위협들 은 대상을 직접 피격하여 관통 및 폭발에 의한 피해를 줌으로써 전투 시스템을 파괴하거나 손상시키기 위한 목적을 지닌다. 이 밖에 지뢰 등과 같은 위협이 있을 수 있는데, 이는 전투 시스템의 하부면, 특히 이동 관련 기능 구성 요소를 손상시켜 전투 시스템의 이동성을 저하시킨다. 본 논문에서는 피격으로 인해 저하되는 전투 시스템의 신뢰성을 분석하는 것에 관한 내용을 다루며 지뢰 등





(2) 위협의 종류 및 관통 성능 정의

위협의 종류는 에너지의 특성에 따라 크게 운동 에너지(KE)탄과 화학 에너지 (CE)탄으로 나누어진다. 운동 에너지탄은 중력과 운동에너지에 의한 물리력을 이용하여 피해를 가하며, 화학 에너지탄은 탄두가 장갑 혹은 외벽과 충돌하는 순간 내부에 있는 화학 물질이 폭발하여 열이나 파편 등의 화학 작용에 의한 에너지를 이용하여 대상에 피해를 가한다[58,60,64]. 여러 위협 중, 총탄으로는 개인 화기에서 발사되는 권총탄과 소총탄이 있을 수 있는데, 이는 전투 시스템 을 관통하기에는 미비한 관통 성능을 지니고 있으며, 알려진 RHA 대비 관통 성능은 권총탄의 경우 약 3mm, 소총탄의 경우 약 12mm이다. 또한, 대표적인 대전차포탄으로는 운동 에너지탄인 날개안정분리철갑탄(APFSDS)과 화학 에너 지탄인 다목적 성형작약탄(HEAT-MP) 등이 있으며, 알려진 RHA 대비 관통 성 능은 각각 약 800mm, 약 500mm이다[55,57]. 미사일이나 어뢰의 경우에는 RHA 대비 관통 성능을 측정한 데이터를 쉽게 얻을 수 없기 때문에 본 논문에서는 일반적으로 알려진 수준에서의 파괴력을 고려하여 관통 성능을 정의하였으며, 모델링된 위협 모델에 관한 속성을 표 3.7에 정리하였다. 본 논문에서는 실제 위협의 명칭을 사용하지 않으며, 미리 정의한 위협 이외에 다양한 위협에 대한 분석을 할 수 있도록 사용자 정의 위협 설정을 할 수 있도록 하였다. 한편, 1단 계의 사용자 요구 명세 및 시나리오에서 설정된 위협은 위협 모델 베이스에서 선택 및 생성되어 3단계의 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행을 위해 전달된다.



표 3.7 정의된 위협 속성

Table 3.7 Properties for Defined threats

구분	명칭	종류	관통 성능 (RHA 대비)
초타	총탄 Type A	KE	3mm
중단 -	총탄 Type B	KE	12mm
포탄	대전차포탄 Type A	KE	800mm
	대전차포탄 Type B	CE	500mm
비사이	지대공미사일	CE	400mm
비사험	함대함미사일 Type A	CE	600mm
어뢰	함대함미사일 Type B	CE	400mm





3.3 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정(1단계)

사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정 단계에서는 어떤 전투 시스템을 대 상으로 분석을 수행할 것인지, 어떤 구성 요소를 대상으로 분석을 수행할 것인 지, 어떤 피해 기준에 대한 분석이 필요한지, 그 피해 기준에는 어떤 구성 요소 가 포함되는지, 어떤 위협에 대하여 분석을 원하는지 등에 관한 사용자의 요구 명세를 수행한다. 또한, 분석 대상이 되는 전투 시스템의 구성 요소별 속성을 설정하고 구성 요소 간의 관계 등을 나타내는 구조를 정의하고, 구성 요소별 가중치를 설정하며, 전투 시스템의 신뢰성 분석을 위한 시나리오를 작성한다. 이때, 설정한 구성 요소별 가중치는 본 논문에서 제안하는 중요도 산정 기법을 적용하여 FMECA 기법의 요소 중 하나인 심각도로 활용된다. 여기서 중요도란, 시스템 전체를 구성하는 여러 요소 중 한 구성 요소가 차지하고 있는 비중을 수치화한 것을 의미한다. 이렇게 설정된 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오는 구축된 모델 베이스 내에 모델링되어 있는 모델을 기반으로 이루어지며, 2단계 의 모델 선택 및 생성 과정을 통해 구조 정보와 결합되어짐으로써 3단계의 시 뮬레이션 수행을 위한 구조가 만들어진다.

중요도는 [71]의 연구에서 시설물의 유지보수를 위한 알람을 제공하기 위한 목적으로 활용하기 위해 처음 제안하였다. 그 이후, [43-44]의 연구를 통해 이러 한 중요도 산정식을 전투 시스템의 신뢰성 분석에 응용하기 위한 방법을 제안 한바 있다. 중요도 산정을 위한 과정을 그림 3.9에 도식화하여 나타내었다. 먼 저, 1단계에서 설정한 사용자 요구 명세를 기반으로 전투 시스템의 구조화를 수행한다. 그 다음 각 구성 요소 모델 및 그룹의 속성으로 설정한 가중치를 부 여하여 가중치 트리를 생성한 후, 중요도 산정식인 식 (3.5)을 이용하여 구성 요소별 중요도를 산정한다.

Collection



그림 3.9 중요도 산정 과정 Fig. 3.9 Process of the importance calculation

$$I_C = \prod_{i=1}^n WC_i \tag{3.5}$$

여기서, *I*_c는 구성 요소의 중요도, *WC*는 구성 요소나 그룹의 가중치, *i*는 트 리의 깊이, *n*은 트리의 최대 깊이를 나타낸다. 각 구성 요소의 가중치를 설정하 기 위해서는 식 (3.6)의 제약 조건을 만족해야 한다. 만약 한 구성 요소가 하위 레벨의 구성 요소를 포함한다면, 그 구성 요소의 하위 동일 레벨 구성 요소들 의 가중치 합은 1이 되어야한다. 즉, 식 (3.6)의 *N*은 동일한 구성 요소에 속하는 하위 구성 요소의 수이고, 이에 따라 *WC*_{*i*}, …, *WC*_{*N*}은 같은 동일한 구성 요소 에 속해야하며, 계산된 전체 구성 요소의 중요도 합은 1이 된다.

$$\sum_{i=1}^{N} WC_i = I$$
 (3.6)





가중치 트리 생성의 예를 그림 3.10에 나타내었다. 중요도 산정 과정에 따라 1단계에서 설정한 사용자 요구 명세 및 시나리오를 기반으로 전투 시스템의 구 성 요소를 관계에 따라 구조화한 후, 각각의 요소에 가중치를 설정하여 가중치 트리를 구성한 예이다. 피해 기준 A와 피해 기준 B의 가중치는 식 (3.6)에 의해 합이 1이 되도록 부여하였으며, 구성 요소 A1, A2, A3의 합과 구성 요소 B1, B2의 합도 마찬가지로 1이 되도록 부여하였다.

이렇게 구성된 가중치 트리를 기반으로 식 (3.5)를 적용하면 각 구성 요소의 중요도를 산정할 수 있다. 그림 3.10을 예로 들어보면, 피해 기준 A에 해당하는 구성 요소인 A1의 중요도는 '0.7 × 0.5 = 0.35', A2의 중요도는 '0.7 × 0.3 = 0.21', A3의 중요도는 '0.7 × 0.2 = 0.14'가 되고, 피해 기준 B에 해당하는 구성 요소인 B1의 중요도는 '0.3 × 0.6 = 0.18', B2의 중요도는 '0.3 × 0.4 = 0.12'가 되며, 각 구성 요소의 중요도를 모두 더하면 '0.35 + 0.21 + 0.14 + 0.18 + 0.12 = 1'이 된다. 이러한 방법으로 산정된 각 구성 요소별 중요도는 FMECA 기법을 적용하여 구성 요소별 위험도 분석을 위해 활용된다.

		roll					
피해 기준	구성 요소	19	945	62	전투 시스	템	
	A1	ōH Q	강다				
А	A2	<i>구조화 및</i> <i>가중치 부여</i>		A A		 B	0.2
	A3			0.7			0.3
	B1		 A 1	10	 ^ ?	 D1	 פת
В		-	AI	AZ	AS	DI	DZ
	B2		0.5	0.3	0.2	0.6	0.4

<피해 기준별 구성 요소 목록>



그림 3.10 가중치 트리 생성 과정

Fig. 3.10 Generation process of weighted tree



3.4 모델 선택 및 생성(2단계)

본 논문에서 제안하는 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 과정의 2단계인 모델 선택 및 생성 단계에서는 구축된 3D 구성 요소 모델 베이스와 구성 요소 속성 모델 베이스에서 1단계의 사용자 요구 명세에 따라 해당하는 모델을 선택하여 생성한다. 생성한 구성 요소 속성 모델의 유형에 따라 관통, 손상, 화재(폭발), 충격에 관한 영향 분석을 위하여 영향 요소 모델 베이스에서 해당하는 모델이 선택 및 생성된다.

그림 3.11은 사용자 요구 명세에서 주포 모델이 생성된 예를 나타낸 것이다. 먼저, 3D 구성 요소 모델 베이스에 있는 cannon.igs를 주포 모델과 결합하였고, 구성 요소 유형을 일반 부품으로 설정한 후, 구성 요소 속성 모델 베이스에서 일반 부품에 관한 속성을 선택하여 두께(150mm), 내구도(1.2)를 비롯하여 중요 도 계산을 위한 가중치(0.25)를 설정하였으며, 영향 요소 모델 베이스에서 일반 부품일 경우 이루어져야 하는 영향 분석인 손상 분석에 관한 속성을 선택한 것 이다. 사용자의 요구 명세에 따라 분석의 대상이 되는 모든 구성 요소는 이러 한 과정을 거쳐 시뮬레이션을 위한 모델로 생성되며, 생성된 모델은 전투 시스 템 구조 정보와 결합됨으로써 3단계의 피격 확률 시뮬레이션을 위한 구조가 만 들어지게 된다. 또한, 위협 모델 베이스에서 선택 및 생성된 위협은 피격 확률 시뮬레이션을 위해 사용된다.







3.5 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행(3단계)

전투 시스템 통합 신뢰성 분석 과정 중, 3단계인 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행 단계에서는 2단계에서 생성한 모델을 결합하여 시뮬레이션 구 조를 생성하고, 설정한 위협 모델을 이용하여 다중 관통선 기반의 피격 확률 분석 시뮬레이션을 수행한다. 이때, 구성 요소의 유형에 따른 장갑의 관통 분 석, 일반 부품의 손상 분석, 치명 부품의 화재, 승무원의 충격과 같은 영향 요 소의 분석을 통하여 구성 요소별 피격 확률이 도출된다. 도출된 피격 확률은 피해 기준별 상실 확률과 구성 요소별 위험도 분석에 활용된다.

생성된 시뮬레이션 구조를 기반으로 구성 요소별 피격 확률 분석을 위한 시 뮬레이션을 수행한다. 본 논문에서는 전투 시스템을 구성하는 요소의 피격 확 률을 분석하기 위한 방법으로 특정 간격으로 다중 피격선을 설정하여 각각의 피격선과 구성 요소가 교차하는 수를 이용한다. 이 방법은 전투 시스템의 면적 대비 구성 요소가 차지하는 면적을 기반으로 피격 확률을 분석하는 방법[17-20] 보다 실제 피격 상황과 유사하며, 단일 혹은 다중 피격선 설정 등 분석 목적에 대응할 수 있는 유연성 및 확장성이 높은 장점을 지닌다[45].

본 논문에서는 전투 시스템에 대한 전체 유효 피격 횟수 중에 해당 구성 요 소가 피격된 횟수를 통해 결정하며, 구성 요소의 피격 확률(*P_{HC}*) 계산식을 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, *P_{HC}*는 구성 요소의 피격 확률, *H_{Total}*은 전 투 시스템을 피격한 피격선의 수, *H_{Ci}*는 구성 요소 *i*가 피격된 횟수를 의미한다. 또한, 한 피격선에 여러 구성 요소가 중복해서 교차할 수도 있으므로 구성 요 소가 피격된 횟수(*H_{Ci}*)에 대한 중복(overlap) 계수(count)를 허용한다.

$$P_{HC_i} = \frac{H_{C_i}}{H_{Total}} \tag{3.7}$$

- 47 -

또한 다중 관통선 기반의 피격 확률 분석의 개념도를 그림 3.12에 나타냈다. 예를 들어, 그림 3.12와 같이 설정한 110번의 피격선 중, 전투 시스템의 구성 요소 모델 중 하나라도 교차하는 피격선이 100번이라고 가정하면, 장갑이 피격 된 총 횟수는 100번이 된다. 또한, 장갑이 관통되어 구성 요소 A가 20회, 구성 요소 B가 30회 피격되었다고 가정하면, 식 (3.7)에 의해 전투 시스템을 구성하 는 요소 중, 구성 요소 A의 피격 확률은 '20 ÷ 100 = 0.2'가 되고, 구성 요소 B 의 피격 확률은 '30 ÷ 100 = 0.3'이 된다.



그림 3.12 다중 피격선 기반 피격 확률 분석 개념도 Fig. 3.12 Conceptual diagram of multiple shotline-based hit probability analysis

본 논문에서의 이러한 피격 확률의 분석을 3차원 CAD를 기반의 시뮬레이션 을 통해 수행하며, 이때 설정된 다중 피격선(shotline)과 전투 시스템의 3차원 구 성 요소 모델의 교차 여부를 활용하여 피격 확률을 분석한다. 일반적으로 구성 요소의 면적이 넓을수록 피격될 확률이 높아지며, 본 논문에서는 영향 요소 모 델을 기반으로 영향 요소인 관통, 손상, 화재(폭발), 충격을 통합적으로 고려하 여 위협에 대한 피격 확률을 분석한다. 그림 3.13 ~ 그림 3.15에 이러한 각 영



향 요소의 분석 개념도를 나타냈다.

먼저, 그림 3.13은 위협에 의해 장갑이 피격되어 관통 분석을 수행하고, 장갑 이 관통된 후 잔류 관통 성능이 일반 부품에게 전달되어 일반 부품에 대한 손 상 분석이 수행되며, 일반 부품이 손상된 후 승무원이 피격되어 사망한 것을 나타내는 개념도이다. 즉, 직접적인 피격에 의한 장갑의 관통, 일반 부품의 손 상, 승무원의 사망을 나타내는 것이다.



또한, 그림 3.14는 위협에 의해 장갑이 피격되어 관통 분석을 수행한 결과, 장갑이 관통되지 않은 경우로 이때에는 일반 부품에 대한 손상 분석은 이루어 지지 않고, 승무원에 대한 충격 분석이 이루어지는 것을 나타내는 개념도이다. 즉, 구성 요소의 유형이 승무원인 경우에는 장갑이 관통되지 않더라도 충격으 로 인한 영향 분석이 이루어진다는 것을 나타낸 것이다.

Collection



그림 3.14 피격에 의한 영향 분석 개념도 2 Fig. 3.14 Conceptual diagram of effectiveness analysis by hit (case of non-penetration)

마지막으로 그림 3.15는 위협에 의해 장갑이 피격되어 관통 분석을 수행하고, 그 결과 관통이 되었고, 치명 부품이 피격된 후, 화재(폭발) 분석이 수행되며, 그 후 영향 범위 내 일반 부품의 손상 분석이 이루어지는 것을 나타내는 개념 도이다. 즉, 치명 부품이 피격되면 치명 부품이 포함하고 있는 연료/폭약의 종 류에 따라 영향 범위내의 구성 요소가 함께 영향을 받는다는 것을 나타낸 것이 다. 이처럼 영향 요소를 고려하여 분석된 피격 확률은 FTA 기법 기반의 피해 기준별 상실 확률을 분석 및 FMECA 기법 기반의 구성 요소별 위험도 분석에 활용된다.





그림 3.15 피격에 의한 영향 분석 개념도 3

Fig. 3.15 Conceptual diagram of effectiveness analysis by hit (case of critical component hit)





3.6 통합 신뢰성 분석(4단계)

3.6.1 중요도와 피격 확률의 활용

전투 시스템 통합 신뢰성 분석 과정 중, 3단계에 해당하는 시뮬레이션 구조 생성 및 수행에서는 1단계의 사용자 요구 명세에 따라 2단계에서 생성된 각각 의 모델을 기반으로 시뮬레이션 구조를 생성한 후, 구성 요소별 피격 확률 분 석을 위한 시뮬레이션을 수행한다. 이렇게 분석된 구성 요소별 피격 확률은 FTA 기법 기반의 피해 기준별 상실 확률 분석 및 FMECA 기법 기반의 구성 요소별 위험도 분석에 활용된다. 특히, FMECA 기반의 구성 요소별 위험도 분 석을 위해서는 피격 확률 이외에 다른 한 요소가 더 필요하다. 앞서 언급하였 던 것처럼 본 논문에서는 그 나머지 한 요소로 구성 요소별 중요도를 산정하여 활용한다.

이를 위해, 본 논문에서 제안하는 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 과정의 4단 계인 통합 신뢰성 분석 단계에서는 구성 요소별 피격 확률을 기반으로 FTA 기 법을 적용한 후, 피해 기준별 상실 확률을 도출하여 기능 수준의 신뢰성 분석 을 위한 방법을 제안하고, 피격 확률 및 산정된 중요도를 기반으로 FMECA 기 법을 적용하여 구성 요소별 위험도를 도출하여 구성 요소 수준의 신뢰성 분석 에 활용하기 위한 방법을 제안한다. 이때, 피격 확률은 피격면에 따라 변화하는 동적인 요소가 되며, 중요도는 전투 시스템을 구성하는 구성 요소의 비중이기 때문에 변화하지 않는 정적인 요소가 된다[69-70]. 이렇게 분석된 결과는 구성 요소의 개선이나 보장, 위치 변경 등 전투 시스템의 설게 단계에서의 신뢰성 향상을 위하여 활용된다. 4단계인 통합 신뢰성 분석 단계에서 사용되는 주요 기법을 그림 3.16에 도식화하였다.







그림 3.16 통합 신뢰성 분석을 위한 주요 기법 Fig. 3.16 Core techniques of the integrated reliability analysis

3.6.2 피해 기준별 상실 확률 분석

3단계에서 도출된 구성 요소별 피격 확률을 기반으로 FTA 기법을 적용하여 전투 시스템의 피해 기준별 상실 확률을 분석한다. 앞서 2장에서 언급하였듯이 일반적으로 FTA 기법에서 고장 확률은 구성 요소의 평균 사용 시간(MTBF) 등 으로 표현되는 수명주기를 고려하여 결정된다. 하지만 전투 시스템의 신뢰성 분석에 FTA 기법을 적용하기 위해서는 평균 사용 시간이 아니라 피격으로 인 한 구성 요소별 상실 확률을 고려하여 결정해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 FTA 기법을 적용하기 위하여 고장 확률 대신 피격 확률을 활용한다.

또한, 본 논문에서는 FTA 기법을 전투 시스템의 신뢰성 분석에 적용하기 위 한 방법으로 전투 시스템의 피해 기준을 FT의 정상 사건으로 설정하여 각 피 해 기준별 상실 확률을 분석한다. 즉, 본 논문에서는 F-Kill, A-Kill, M-Kill, S-Kill, C-Kill, K-Kill의 여섯 가지 피해 기준을 FTA 기법의 정상 사건으로 활용



하여 각 피해 기준별 상실 확률을 분석한다. 이에 따라, 2장에서 기술하였던, 정상 사건에 관한 발생 확률 계산식인 식 (2.1)은 본 논문에서의 피해 기준별 상실 확률의 분석을 위해 식 (3.8)과 같이 재정의 된다. 여기서, *P_{kill}는* 피해 기 준별 상실 확률을 의미하고, *P_{CHi}는* 피해 기준과 관련된 구성 요소 *i*가 피격될 확률을 의미한다.

$$P_{kill} = \begin{cases} \prod_{i=1}^{n} P_{CH_i} & \text{if } AND \text{ } gate \\ 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{CH_i}) & \text{if } OR \text{ } gate \end{cases}$$
(3.8)

한편, 전투 시스템을 구성하는 요소는 신뢰성에 큰 영향을 주는 위험 구성 요소와 그렇지 않은 일반 구성 요소로 나눌 수 있다. 이러한 분류 특성을 FTA 기법에 응용하면, 위험 구성 요소는 OR 게이트, 일반 구성 요소는 AND 게이트 로 표현할 수 있다. 또한, 위험 구성 요소이더라도 여러 개(redundant)로 이루어 져 있거나 분산되어 있어서 일부가 손상되더라도 정상적인 기능을 할 경우에는 AND 게이트로 표현이 가능하다. 예를 들어, 그림 3.17과 같이 구성 요소 A의 피격 확률이 0.2 이고, 구성 요소 B의 피격 확률이 0.3이며, AND 게이트로 피 해 기준 A와 연결되어 있다면, *P_{Kul}*의 발생 확률은 식 (3.8)에 의해 '0.2 × 0.3 = 0.06'이 된다. 즉 피해 기준 A가 발생할 확률은 6%가 된다. 또한, 그림 3.18과 같이 구성 요소 A와 구성 요소 B가 OR 게이트로 피해 기준 A와 연결되어 있 다면, *P_{Kul}*의 발생 확률은 식 (3.8)에 의해 '1 - (1 - 0.2) × (1 - 0.3) = 0.44'가 되며, 피해 기준 A가 발생할 확률은 44%가 된다.





그림 3.17 정상 사건의 확률 계산 예제 (AND 게이트) Fig. 3.17 An example of probability calculation (AND gate)




3.6.3 구성 요소별 통합 위험도 분석

(1) 위험도 분석을 위한 심각도 및 발생도 정의

FMECA 기법을 적용하는 것에 있어 본 논문에서는 심각도, 발생도, 검출도의 세 가지 기준으로 계산되는 위험 우선순위 대신 심각도 및 발생도의 두 가지 기준으로 계산되는 위험도를 활용한다. 왜냐하면, 전투 시스템의 지속적인 운용 으로 인한 마모나 노후 등으로 발생하는 고장에 관한 분석이 목적이 아니라, 설계 단계에서의 피격에 의한 전투 시스템의 구성 요소 손상에 따른 영향 분석 을 수행하는 것이 목적이기 때문에 기본적으로 구성 요소의 피격은 검출된다는 것을 전제로 한다. 즉, 본 논문에서는 심각도 및 발생도의 기준을 이용하여 구 성 요소별 위험도를 계산한다. 이때, 심각도는 구성 요소의 고장으로 인한 영향 의 심각한 정도를 나타내는 것이고, 발생도는 구성 요소의 고장이 발생할 가능 성을 나타내는 것이며, 각각은 1부터 10까지의 값을 가진다.

FMECA 기법을 적용하여 위험도를 분석하기 위해서는 고장 모드의 설정을 비롯하여 심각도와 발생도의 기준 정의가 필요하다. 본 논문에서는 피해 기준 중에 K-Kill을 제외한 F-Kill, A-Kill, M-Kill, S-Kill, C-Kill을 고장 모드로 설정하 며, 산정된 구성 요소별 중요도를 참조하여 위험도 계산을 위한 요소 중 하나 인 심각도로 활용한다. 중요도가 높은 구성 요소가 손상된다면 전투 시스템에 심각한 영향을 초래할 수 있기 때문에 중요도가 높은 구성 요소는 심각도가 높 다고 할 수 있다. 또한, 분석된 구성 요소별 피격 확률을 참조하여 위험도 계산 을 위한 요소 중 하나인 발생도로 활용한다. 피격 확률이 높은 구성 요소는 그 만큼 손상 발생의 확률이 높기 때문에 피격 확률이 높은 구성 요소의 고장 발 생도가 높은 것으로 볼 수 있다. 여기서 중요도는 정적인 요소가 되고, 피격 확 률은 피격면에 따라 변화하기 때문에 동적인 요소가 된다[69-70].

d Collection

(2) 심각도와 발생도의 점수 기준 정의

FMECA 기법에서는 RPN이나 위험도의 계산을 위해서 심각도나 발생도에 대 한 값을 직접 이용하지 않고, 1부터 10까지의 기준에 따른 점수로 변환하여 계 산에 이용한다. 따라서 점수 기준을 정의하는 것이 필요한데[40-41], 본 논문에 서는 구성 요소별 위험도의 분석을 위해서 중요도 및 피격 확률의 점수 기준을 표 3.8 및 표 3.9와 같이 정의하였으며, 이를 이용하여 전투 시스템을 구성하는 각 요소의 위험도를 분석한다.

표 3.8 중요도의 점수 기준

Table 3.8 Classification rate for importance

심각도 점수	중요도 기준
10	0.15 이상
9	0.125 이상
8	0.1 이상
7 [0]	0.08 이상
6	0.06 이상
5	0.04 이상
4	0.02 이상
3	0.01 이상
2	0.005 이상
1	0 이상, 0.005 미만



표 3.9 피격 확률의 점수 기준

발생도 점수	피격 확률 기준
10	0.5 이상
9	0.3 이상
8	0.1 이상
7	0.08 이상
6	0.06 이상
5	0.04 이상
4	0.02 이상
3	0.01 이상
2	0.005 이상
1	0 이상, 0.005 미만

Table 3.9 Classification rate for hit probability

이에 따라 식 (2.2)는 식 (3.9)와 같이 다시 정의된다. 여기서 *I*_c는 구성 요소 별 중요도, *P_{Hc}*는 구성 요소별 피격확률을 의미하는데, 둘 다 기준에 따른 점수 로 변환되어 계산된다. 모델링한 구성 요소의 수를 고려하여 점수 기준을 정의 하였다. 예를 들어, 어떤 구성 요소 A의 중요도가 0.1이고 피격 확률이 0.05라 면, 표 3.8 및 표 3.9의 점수 기준에 의해 중요도 및 피격 확률 점수가 각각 8 과 5 되며, 식 (3.9)를 이용하여 계산을 하면 구성 요소 A의 위험도는 '8 × 5 = 40'이 된다.

$$C = I_C(rated) \times P_{HC}(rated)$$
(3.9)

Collection

제 4 장 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 방법론의 검증

4.1 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템 개발

전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템의 개발을 위한 환경으로 운영체제는 Windows 7 64bit, 개발 도구는 Visual Studio 2008(.NET Framework 3.5), 언어는 C++ 및 C#을 이용하였으며, 그래픽 라이브러리인 Open Cascade를 이용하여 3D 구성 요소 모델의 시각화와 다중 관통선 기반의 시뮬레이션을 수행하였다. Open Cascade는 3차원 CAD 등을 활용할 수 있도록 해주는 3차원 그래픽 소프 트웨어 개발 플랫폼으로, 다양한 기능을 API 형태로 제공하는 오픈 소스 기반 의 그래픽 라이브러리이다[72].

전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 시스템의 개발을 위해 설계한 시스템의 구 조도를 그림 4.1에 도식화하였다. 개발한 시스템은 구축된 네 가지 모델 베이스 를 기반으로 사용자 요구 명세 및 시나리오를 설정할 수 있도록 해주며, '구성 요소별 속성 설정 모듈', '위협 설정 모듈', '피해 기준별 구성 요소 구조화 모 듈'이 이러한 기능을 제공한다. 설정된 내용을 바탕으로 시뮬레이션 구조를 생 성하고, 설정한 위협에 의한 다중 관통선 기반 피격 확률 분석 및 영향 요소 분석을 위한 기능을 제공하는 '시뮬레이션 구조 생성 모듈', '다중 관통선 설 정 모듈', '구성 요소별 피격 확률 분석 모듈'이 있다. 또한, 설정한 구성 요소 별 가중치 및 피해 기준별 구조 정보를 기반으로 중요도 산정 기능을 제공하는 '구성 요소별 중요도 산정 모듈'이 있다. 마지막으로, 분석된 구성 요소별 피격 확률을 활용하여 FTA 기법 기반의 피해 기준별 상실 확률 분석 기능을 제공하



는 '피해 기준별 상실 확률 분석 모듈'이 있으며, 산정된 중요도 및 분석된 피 격 확률을 활용하여 FMECA 기법 기반의 구성 요소별 위험도 분석 기능을 제 공하는 '구성 요소별 위험도 분석 모듈'이 있다.





설계한 내용을 기반으로 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템을 개발하였으 며, 개발한 시스템의 사용자 인터페이스는 그림 4.2와 같다. 상단부에는 3차원 구성 요소 모델 불러오기, 위협 설정, 중요도 계산, 피격 확률 분석 등의 기능 을 선택할 수 있는 메뉴가 있으며, 그 아래에 3차원 전투 시스템 모델 표시부 를 제어하기 위한 메뉴가 있다. 또한, 좌측 상단에는 구성 요소의 계층화를 할



수 있도록 해주는 구성 요소 목록 및 구조도 표시부가 있고, 좌측 하단에는 선 택된 구성 요소의 속성을 설정하기 위한 구성 요소 속성 설정부가 있다. 화면 의 중앙에는 불러온 CAD 기반 구성 요소 모델을 표시하기 위한 3차원 전투 시 스템 모델 표시부가 있으며, 하단에 분석 결과를 출력해주는 분석 결과 출력부 가 있다.



그림 4.2 개발한 시스템의 사용자 인터페이스 Fig. 4.2 Craphia year interface of the developed system

Fig. 4.2 Graphic user interface of the developed system



4.2 분석 및 활용 사례

4.2.1 전차의 통합 신뢰성 분석

(1) 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정

제안한 전투 시스템의 통합 신뢰성 방법의 1단계에서는 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오를 설정한다. 표 4.1과 같이 분석 대상 전투 시스템으로는 "전차" 를 선정하였고, 구축된 3D 구성 요소 모델 베이스에 있는 "26개의 전차 구성 요소 모델"을 대상으로 분석을 수행한다. 또한, "F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill, K-Kill"의 피해 기준에 관한 분석을 수행하도록 설정하며, 그림 4.3과 같 이 "대전차포탄 Type B"를 위협으로 설정한다.

AF AND OCEA

표 4.1 사용자 요구 명세 Table 4.1 User requirement specification

대상	의미
전투 시스템	전차 1945
구성 요소	전차 구성 요소 모델(26개)
피해 기준	F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill, K-Kill
위협	대전차포탄 Type B





그림 4.3 위협 모델 설정 Fig. 4.3 Setting of the threat model

1945

OF .

(2) 모델 선택 및 생성

Collection

1) 구성 요소 모델의 속성 설정

선택한 26개의 3D 구성 요소 모델과 결합된 구성 요소 속성 모델의 속성을 표 4.2와 같이 설정하여 모델을 생성한다. 이때, 구성 요소의 유형이 장갑일 경 우에는 두께, 재질에 따른 밀도, 종류(단일 장갑/복합 장갑)를 속성으로 가지고, 일반 부품일 경우에는 두께 및 내구도를 속성으로 가진다. 또한 치명 부품의 경우에는 연료/폭약의 종류, 영향력, 영향 범위 내 구성 요소를 속성으로 가지 고, 승무원은 속성을 가지지 않으며, 중요도 산정을 위한 가중치만을 가진다.

표 4.2 설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성

Table 4.2 Properties of selected components

구성 요소명	유형	속성			
20	이바 버프	두께	150		
TI	일한 구품	내구도	1.2		
시거 트게 자키	ਨੀਮੀ ਸੋ ਕ	두께	50		
가격 중세 경지	일한 구품	내구도	1.0		
	키머 비꼬	연료/폭약의 종류	TNT		
· 단락포(1)	지영 수품	독재 150 내구도 1.2 두께 50 내구도 1.0 연료/폭약의 종류 TNT 영향 범위 내의 구성 요소 연막탄 발사기(주) 연료/폭약의 종류 TNT 영향 범위 내의 구성 요소 무전기 연료/폭약의 종류 TNT 영향 범위 내의 구성 요소 무전기 연료/폭약의 종류 TNT 영향 범위 내의 구성 요소 안테나(좌/우) - - 도한 범위 내의 구성 요소 안테나(조/우) - - 영향 범위 내의 구성 요소 만테나(조/우) 신료/폭약의 종류 경유 영향 범위 내의 구성 요소 무한궤도(좌), 엔진 연료/폭약의 종류 중유 영향 범위 내의 구성 요소 무한궤도(좌), 엔진 연료/폭약의 종류 중유			
Flot	नेम मंग्र	연료/폭약의 종류 TNT			
· 단약포(2)	지당 구품	영향 범위 내의 구성 요소	무전기		
	राम म प्र	연료/폭약의 종류	TNT		
· 단약포(3)	시영 구품	영향 범위 내의 구성 요소	안테나(좌/우)		
포수	승무원	1945			
റിച്ച	이바 바프	아타니두께	100		
빈신	한 千古	내구도	0.9		
		연료/폭약의 종류 경유			
연료 탱크(좌)	치명 부품	영향 범위 내의 구성 요소	무한궤도(좌), 엔진		
		연료/폭약의 종류	경유		
연료 탱 <i>크</i> (우)	치명 부품	영향 범위 내의 구성 요소	무한궤도(우), 엔진		



표 4.2 설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성(계속)

Table 4.2 Properties of selected components (cont.)

구성 요소명	유형	속성				
<u> </u>	이바 버프	두께	200			
구안제조(좌)	된민 千古	내구도	0.9			
면 치 게 드 (º)	이내 ㅂㅍ	두께	200			
구안제조(干)	일한 구품	내구도	0.9			
조종수	승무원	-				
		두께	500			
장갑(상)	장갑	재질(밀도)	RHA(7.85)			
	AR AN	종류	단일장갑(RHA)			
	OREA	두께 등	400			
장갑(하)	장갑	재질(밀도)	RHA(7.85)			
	roll	1945 종류	단일장갑(RHA)			
느도 바여 체계(좌)	이바 보프	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	50			
ㅎㅎ ㅎ이 세계(과)	한 千古	내구도	1.0			
느도 바이 케게(으)	이바 버프	두께	50			
8 8 8 1 AIAI(T)	22 千古	내구도	1.0			
여마타 바시키(지)	이바 버프	두께	40			
친덕단 별자기(좌)	린힌 千百	내구도	1.0			
여마타 바시키(^)	이내 버프	두께	40			
	린민 下古	내구도	1.0			



표 4.2 설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성(계속)

Table 4.2 Properties of selected components (cont.)

구성 요소명	유형	속성			
자마겨	이바 버프	두께	50		
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	린힌 千古	내구도	1.0		
체 키(1)	이바 보프	두께	60		
01/1(1)	고신 十五	속성         두께       50         내구도       1.0         두께       60         내구도       1.1         두께       60         내구도       1.1         두께       60         내구도       1.1         두께       60         내구도       1.1         두께       60         내구도       0.1         내구도       0.5         두께       20         내구도       0.5         두께       20         내구도       0.5         두께       20         내구도       0.5         두께       20         내구도       0.5			
체 키(2)	이바 보프	두께	60		
01/1(2)	고신 十五	내구도 1.1			
체 키(2)	이바 보프	ㅂ표 두께 6			
0¶∧[(3)	코민 千古	내구도	1.1		
무저기	이바 부프	두께	50		
	2216	내구도	0.8		
아리나지	이비 비 프	두께	20		
한데다(과)	코민 十百	내구도	0.5		
아리네 아이	이바 버프	두께	20		
안데나(구)	린민 千百	내구도 0.5			
전차장	승무원	-			



#### 2) 구성 요소 모델의 가중치 설정

각각의 구성 요소 속성 모델에 앞서 설정한 속성을 비롯하여 중요도 산정을 위한 가중치를 설정한다. 그 후, 전차를 구성하는 각 요소를 피해 기준별로 구 조화를 하며, 이를 바탕으로 가중치 트리가 생성된다.

전차의 경우에는 기동력을 바탕으로 여러 위협을 회피하거나 감내하여 적을 무력화시키기 위한 공격을 목적으로 가지기 때문에 상대적으로 공격, 방어, 이 동 기능에 특화되어 있다. 따라서, F-Kill(공격) 및 M-Kill(이동)이 상대적으로 높 은 가중치를 가지며, 그 다음으로 A-Kill(방어), S-Kill(탐지), C-Kill(통신) 기능의 순으로 가중치를 가진다. 따라서 본 논문에서는 피해 기준을 나타내는 1-레벨 파트에는 다음과 같이 가중치를 설정하였다. F-Kill은 '0.30', M-Kill은 '0.25', A-Kill은 '0.20', S-Kill은 '0.15', C-Kill은 '0.10'을 설정하였으며, 이를 그림 4.4 에 나타내었다.



Fig. 4.4 A weighted tree for armored fighting vehicles

첫 번째로, F-Kill 관련 2-레벨 구성 요소 혹은 파트의 가중치로 주포는 '0.25', 사격 통제 장치는 '0.20', 탄약고는 '0.30', 포수는 '0.25'를 각각 설정하였 고, 3-레벨 구성 요소인 탄약고(1)은 '0.34', 탄약고(2)는 '0.33', 탄약고(3)은 '0.33'을 설정하였으며, 그림 4.5에 이를 도식화한 가중치 트리를 나타내었다.

Collection



두 번째로, M-Kill 관련 2-레벨 구성 요소 혹은 파트의 가중치는 각각 엔진 '0.25', 연료 탱크 '0.30', 무한궤도 '0.20', 조종수 '0.25'로 설정하였고, 3-레벨 구 성 요소인 연료 탱크(좌) '0.50', 연료 탱크(우) '0.50', 무한궤도(좌) '0.50', 무한 궤도(우) '0.50'을 설정하였으며, 그림 4.6에 이를 도식화한 가중치 트리를 나타 내었다.



그림 4.6 M-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리 Fig. 4.6 A weighted tree for components of M-Kill

세 번째로, A-Kill 관련 2-레벨 구성 요소 혹은 파트의 가중치는 각각 장갑 '0.70', 능동 방어 체계 '0.20', 연막탄 발사기 '0.10'을 설정하였고, 3-레벨 구성 요소인 장갑(상)에는 '0.50', 장갑(하)에는 '0.50', 능동 방어 체계(좌)에는 '0.50',



능동 방어 체계(우)에는 '0.50', 연막탄 발사기(좌)에는 '0.50', 연막탄 발사기(우) 에는 '0.50'을 설정하였으며, 그림 4.7에 이를 도식화한 가중치 트리를 나타내었 다.



네 번째로, S-Kill 관련 2-레벨 구성 요소 혹은 파트의 가중치로 잠망경은 '0.40', 해치는 '0.60'을 설정하였고, 3-레벨 구성 요소인 해치(1)은 '0.34', 해치 (2)는 '0.33', 해치(3)은 '0.34'를 설정하였으며, 그림 4.8에 이를 도식화한 가중치 트리를 나타내었다.



그림 4.8 S-Kill 관련 구성 요소의 가중치 트리 Fig. 4.8 A weighted tree for components of S-Kill



끝으로, C-Kill 관련 2-레벨 구성 요소 혹은 파트 중, 무전기의 가중치는 '0.40', 안테나의 가중치는 '0.30', 전차장의 가중치는 '0.40'으로 설정하였고, 3-레벨 구성 요소인 안테나(좌)는 '0.50', 안테나(우)는 '0.50'을 설정하였으며, 그 림 4.9에 이를 도식화한 가중치 트리를 나타내었다.



설정한 가중치를 기반으로 식 (3.5)와 식 (3.6)을 적용하면 구성 요소별 중요 도를 산정할 수 있다. 예를 들어, 주포의 중요도는 '0.30(F-Kill의 가중치) × 0.25(주포의 가중치) = 0.075'가 되고, 탄약고(1)의 중요도는 '0.30(F-Kill의 가중 치) × 0.30(탄약고의 가중치) × 0.34(탄약고(1)의 가중치) = 0.0306'이 된다.



(3) 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행

1) 시뮬레이션 구조 생성

Collection

1단계 및 2단계를 거쳐 생성된 모델을 기반으로 생성된 시뮬레이션 구조는 그림 4.10과 같다. 그림의 왼쪽 상단에서 3D 구성 요소 모델과 결합되어 구조 화된 구성 요소 속성 모델을 확인할 수 있으며, 왼쪽 하단에서 각 모델의 속성 및 가중치를 확인할 수 있다. 또한, 그림의 중앙에 각각의 좌표에 의해 생성된 3D 구성 요소 모델의 배치를 확인할 수 있다.



그림 4.10 생성된 시뮬레이션 구조 Fig. 4.10 Generated simulation architecture



#### 2) 전차의 전면 피격 확률 분석 시뮬레이션

이렇게 생성된 시뮬레이션 구조를 기반으로 전차의 3차원 구성 요소 모델의 전면을 기준으로 다중 피격선을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 를 그림 4.11과 표 4.3에 나타내었다. 이때, 일정한 간격을 두고 총 960개의 피 격선을 설정하였으며, 이 중 271개가 전차의 구성 요소 중 하나 이상을 교차하 는 것으로 나타났다. 표 4.3을 보면 영향 요소 분석 결과 중, 195번 피격선의 경우에는 장갑(하), 조종수, 해치(1), 포수가 차례로 피격된 것을 확인 할 수 있 으며, 장갑(하)가 관통된 후의 잔류 관통 성능은 180인 것을 알 수 있다. 또한 196번 피격선의 경우에는 장갑(하), 조종수, 연료 탱크(좌)가 차례로 피격된 것 을 알 수 있고, 연료 탱크의 화재 혹은 폭발이 발생하였으며, 무한궤도(좌) 및 엔진에 영향을 주어 무한궤도(좌)는 51.11% 손상 발생, 엔진은 관통되었다는 것 을 확인할 수 있다.





Integrated Reliability Analysis System	<ul> <li>Presidence, Discolari ande Trening 4</li> </ul>	×
File Setting Analysis Simulation Criticality Calculator FTA Analysis		
2222******		
ReportForm		
설정된 위협 - 포탄 종류 : 대전차포탄 Type B, 유형 : CE, 관통 성능 : 5	00	
	s, gunner,igs)	
201. 피격선(PI:5, -50, 12, P2:5, 50, 12) 교차 부품 : scope.jgs, hatch2.jgs scope.jgs: 피관/프랑(THT 관물에너지 : 450) hatch2.jgs: 피격/판물(잔류 판물에너지 : 384)		
202, 피격선(P1:5, 50, 11, P2:5, 50, 11) 교차부품: amort.op.jgs.projectibeDx3.jgs amort.op.jgs: 피격/면률(건류 관물에너지:100), 호격/사망 승무원(commander.jgs, driver.jgs, g projectileDox3.jgs: 피격/면률(건류 관물에너지:100)	unner.igs)	
주가 표행 구봉 : antenna_right.lgs(도용, 전류 전용비니지 : 90) 		
armortop.jgs : 피격/팬통(잔류 관통에너지 : 100), 충격/사망 승무원(commander.jgs, driver.jgs, g projectileBox3.jgs : 피격/판통(잔류 관통에너지 : 100)	unner,igs)	
추가 피해 부품 : antenna_left.igs(관통, 잔류 관통에너지 : 90) 추가 피해 부품 : antenna_right.igs(관통, 잔류 관통에너지 : 90) 		
204, 피격선(P1:5,-50,9, P2:550,9) 교차부품: amortop.igs projectileBox3.igs armortop.igs: 피격/관통(전류 관통에너지:100), 총격/사망 승무원(commander.igs, driver.igs, g projectileBox3.igs: 피격/관통(전류 관통에너지:100)	unner,igs)	
추가 피해 부품 : antenna Jeft igs(관통, 잔류 관통에너지 : 90) 추가 피해 부품 : antenna_right igs(관통, 잔류 관통에너지 : 90) 		
205, 피격선(P1 : 5,-50,8, P2 : 5,50,8)	ANII//CC/.	-

그림 4.11 전면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과

1945 off Of C

Fig. 4.11 A result of penetration and effectiveness analysis for components (front)



표 4.3 전면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과(일부) Table 4.3 A result of penetration and effectiveness analysis for components (a part)

... (생략)

195. 피격선(P1 : 4.-50.7, P2 : 4.50.7)

교차 부품 : armor_bottom.igs driver.igs hatch1.igs gunner.igs armor bottom.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 180),

충격/사망 승무원(commander.igs, driver.igs, gunner.igs)

driver.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 180)

hatch1.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 114) gunner.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 114)

196. 피격선(P1 : 4.-50.6, P2 : 4.50.6) 교차 부품 : armor_bottom.igs driver.igs fuel_tank_left.igs armor bottom.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 180),

충격/사망 승무원(commander.igs, driver.igs, gunner.igs)

driver.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 180)

fuel_tank_left.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 180)

추가 피해 부품 : Cater_left.igs(미관통(손상정도 : 51.11%)

추가 피해 부품 : engine.igs(관통, 잔류 관통에너지 : 2)

... (생략)



이러한 영향 요소가 고려된 구성 요소별 피격 확률의 분석 시뮬레이션을 수 행하였으며, 그 결과 화면을 그림 4.12에 나타내었다. 분석 결과는 포수가 '63.837638(%)', 조종수 및 전차장이 '63.468635(%)', 장갑(하)가 '42.066421(%)' 등의 순으로 높게 나타났으며, 도출된 구성 요소별 피격 확률을 표 4.4에 정리 하였다.



그림 4.12 전면 구성 요소별 피격 확률 분석 결과

Fig. 4.12 A result of hit probability analysis for components (front)



# 표 4.4 구성 요소별 전면 피격 확률

Table 4.4 Front hit probabilities of components

구성 요소명	피격 횟수(H _C )	피격 확률(P _{HC} )
주포	2	0.738007
사격 통제 장치	6	2.214022
탄약고(1)	12	4.428044
탄약고(2)	12	4.428044
탄약고(3)	16	5.904059
포수	173	63.837638
엔진	37	13.653137
연료 탱크(좌)	5	1.845018
연료 탱크(우)	F 1005	1.845018
무한궤도(좌)	29	10.701107
무한궤도(우)	29	10.701107
조종수 🤶	172	63.468635
장갑(상)	60	22.140221
장갑(하)	1945114	42.066421
능동 방어 체제(좌)	SH OF C	0.738007
능동 방어 체제(우)		0.738007
연막탄 발사기(좌)	4	1.476015
연막탄 발사기(우)	15	5.535055
잠망경	7	2.583026
해치(1)	4	1.476015
해치(2)	5	1.845018
해치(3)	5	1.845018
무전기	32	11.808118
안테나(좌)	34	12.546125
안테나(우)	34	12.546125
전차장	172	63.468635



## 3) 전차의 측면 피격 확률 분석 시뮬레이션

전차의 3차원 구성 요소 모델의 측면을 기준으로 다중 피격선을 설정하여 시 뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그림 4.13과 표 4.5에 나타내었다. 이때, 일정한 간격을 두고 총 1540개의 다중 피격선을 설정하였으며, 이중 488개가 전차의 구성 요소 중 하나 이상을 교차하는 것으로 나타났다. 표 4.5를 보면 영 향 요소 분석 결과 중, 203번 피격선의 경우에는 장갑(상), 탄약고(2)가 차례로 피격된 것을 확인할 수 있고, 탄약고(2)의 화재(폭발)로 인하여 무전기가 영향을 받은 것을 확인할 수 있으며, 장갑(상)이 관통된 후의 잔류 관통 성능은 100인 것을 알 수 있다. 또한 204번 피격선의 경우에는 장갑(하)가 피격된 것을 알 수 있고, 두 피격선 모두 관통이 되어 충격으로 인해 승무원이 영향을 받은 것을 확인할 수 있다.







# 그림 4.13 측면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과

Fig. 4.13 A result of penetration and effectiveness analysis for components (side)

1945 OE



표 4.5 측면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과(일부) Table 4.5 A result of penetration and effectiveness analysis for components (a part)

... (생략)

203. 피격선(P1 : 30.-3.8, P2 : -30.-3.8)

교차 부품 : armor_top.igs projectileBox2.igs

armor top.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 100),

충격/사망 승무원(commander.igs, driver.igs, gunner.igs)

projectileBox2.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 100)

추가 피해 부품 : electronic_device.igs(관통, 잔류 관통에너지 : 60)

NE NND DOA

204. 피격선(P1 : 30.-3.7, P2 : -30.-3.7) 교차 부품 : armor_bottom.igs armor_bottom.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 180), 충격/사망 승무원(commander.igs, driver.igs, gunner.igs)

... (생략)



전면의 경우와 마찬가지로 각 구성 요소의 측면 피격 확률 분석을 한 화면을 그림 4.14에 나타내었다. 분석 결과로는 포수 및 전차장 '73.770492%', 조종수 '73.565574%', 무한궤도(우) '57.172131%', 장갑(하) '53.893443%'의 순으로 나타 났고, 충격에 의한 영향으로 승무원의 피해가 큰 것으로 나타났으며, 도출된 구 성 요소별 피격 확률을 표 4.6에 정리하였다. 이렇게 도출된 구성 요소별 피격 확률은 그 자체로도 의미가 있으며, 피해 기준별 상실 확률의 분석과 구성 요 소별 위험도 분석에 활용된다.



그림 4.14 측면 구성 요소별 피격 확률 분석 결과 Fig. 4.14 A result of side hit probability analysis





표 4.6 구성 요소별 측면 피격 확률

Table 4.6 Side hit probabilities of components

구성 요소명	피격 횟수(H _C )	피격 확률(P _{HC} )
주포	38	7.786885
사격 통제 장치	2	0.409836
탄약고(1)	0	0.000000
탄약고(2)	8	1.639344
탄약고(3)	8	1.639344
포수	360	73.770492
엔진	0	0.000000
연료 탱크(좌)	0	0.000000
연료 탱 <i>크</i> (우)	E O O	0.000000
무한궤도(좌)	60	12.295082
무한궤도(우)	279	57.172131
조종수	359	73.565574
장갑(상)	96	19.672131
장갑(하)	1945263	53.893443
능동 방어 체제(좌)		2.049180
능동 방어 체제(우)	10	2.049180
연막탄 발사기(좌)	5	1.024590
연막탄 발사기(우)	5	1.024590
잠망경	6	1.229508
해치(1)	5	1.024590
해치(2)	5	1.024590
해치(3)	5	1.024590
무전기	12	2.459016
안테나(좌)	21	4.303279
안테나(우)	21	4.303279
전차장	360	73.770492



## (4) 통합 신뢰성 분석

#### 1) 중요도 산정

통합 신뢰성 분석에 앞서 1단계에서 생성한 가중치 트리를 기반으로 중요도 산정식을 적용한 후, 각 구성 요소별 중요도를 산정하였으며, 그 결과를 표 4.7 에 정리하였다. 또한, 이러한 과정을 개발한 전투 시스템의 신뢰성 분석 시스템 을 기반으로 구성 요소 속성 모델을 통해 설정한 가중치를 이용하여 수행하였 으며, 그 화면은 그림 4.15와 같다. 산정된 각 구성 요소의 중요도를 보면, 주포 및 포수가 '0.75', 장갑(상) 및 장갑(하)가 '0.07', 엔진 및 조종수가 '0.625'의 순 으로 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 산정한 중요도는 FMECA 기반 구성 요 소별 위험도 분석에 활용된다.





# 표 4.7 산정된 전차의 구성 요소별 중요도

Table 4.7 Result of importance calculation for components

피해 기준	구성 요소명	중요도
	주포	0.0750
	사격 통제 장치	0.0600
F-Kill	탄약고(1)	0.0306
(공격 관련 구성 요소)	탄약고(2)	0.0297
	탄약고(3)	0.0297
	포수	0.0750
	엔진	0.0625
	연료 탱크(좌)	0.0375
M-Kill	연료 탱크(우)	0.0375
(이동 관련 구성 요소)	무한궤도(좌)	0.0250
	무한궤도(우)	0.0250
	조종수	0.0625
	장갑(상)	0.0700
	장갑(하)	0.0700
A-Kill	능동 방어 체계(좌)	0.0200
(방어 관련 구성 요소)	능동 방어 체계(우)	0.0200
	연막탄 발사기(좌)	0.0100
	연막탄 발사기(우)	0.0100
	잠망경	0.0600
S-Kill	해치(1)	0.0306
(탐지 관련 구성 요소)	해치(2)	0.0297
	해치(3)	0.0297
	무전기	0.0300
C-Kill	안테나(좌)	0.0150
(통신 관련 구성 요소)	안테나(우)	0.0150
	전차장	0.0400





그림 4.15 구성 요소별 중요도 계산 결과 Fig. 4.15 A result of importance calculation for components

1945

# 2) 피해 기준별 상실 확률 분석을 위한 FT 구성

피해 기준별 상실 확률을 분석하기 위해서 도출된 피격 확률을 기반으로 FTA 기법을 적용한다. 이를 위하여 일반 구성 요소 및 위험 구성 요소에 관한 특성을 고려한 후, 각 구성 요소간의 관계가 AND 및 OR 게이트로 표현된 Fault Tree를 구성한다. 먼저 F-Kill의 경우, 탄약고(1), 탄약고(2), 탄약고(3)은 피 격에 의해 하나라도 손상되면 전차 전체에 영향을 줄 수 있는 치명 부품이기 때문에 위험 구성 요소로 분류하여 OR 게이트로 표현하였고, 주포, 사격 통제 장치, 탄약고, 포수의 모든 구성 요소가 F-Kill 발생에 직접적인 관련이 있는 위 험 구성 요소로 정의하였다. 이에 따라 모든 구성 요소의 관계를 OR 게이트로 표현하였으며, 이를 그림 4.16에 도식화하여 나타내었다.





그림 4.16 F-Kill 관련 구성 요소의 FT Fig. 4.16 A fault tree for F-Kill

두 번째로 M-Kill의 경우, 연료 탱크(좌) 및 연료 탱크(우)는 피격에 의해 하 나라도 손상되면 전차 전체에 영향을 줄 수 있는 치명 부품이기 때문에 위험 부품으로 분류하여 OR 게이트로, 무한궤도(좌) 및 무한궤도(우)는 하나가 피격 으로 인해 손상되더라도 이동성을 상실하지 않기 때문에 AND 게이트로 표현 하였고, 엔진, 연료 탱크, 무한궤도, 조종수의 관계는 OR 게이트로 표현하였으 며, 이를 그림 4.17에 도식화하여 나타내었다.



그림 4.17 M-Kill 관련 구성 요소의 FT Fig. 4.17 A fault tree for M-Kill



세 번째로 A-Kill의 경우, 장갑(상) 및 장갑(하)는 OR 게이트로, 능동 방어 체 계(좌) 및 능동 방어 체계(우)는 AND 게이트로, 연막탄 발사기(좌) 및 연막탄 발사기(우)는 AND 게이트로 표현하였으며, 각각은 A-Kill에 OR 게이트로 연결 하였다. 여기서, 능동 방어 체계 및 연막탄 발사기는 하나가 피격으로 인해 손 상되더라도 나머지 하나가 해당 기능을 수행할 수 있기 때문에 AND 게이트로 표현하였으며, 이를 그림 4.18에 도식화하여 나타내었다.



네 번째로 S-Kill의 경우, 해치(1), 해치(2), 해치(3)은 하나가 손상되더라도 탐 지 기능을 수행할 수 있기 때문에 AND 게이트로 표현하였고, 해치 및 잠망경 은 하나라도 손상되면 기능을 수행할 수 없기 때문에 OR 게이트로 표현하였으 며, 이를 그림 4.19에 도식화하여 나타내었다.







그림 4.19 S-Kill 관련 구성 요소의 FT Fig. 4.19 A fault tree for S-Kill

다섯 번째로 C-Kill의 경우, 안테나(좌) 및 안테나(우)는 하나가 피격으로 인해 손상되어도 기능을 수행할 수 있기 때문에 AND 게이트로 표현하였고, 무전기, 안테나, 전차장은 하나라도 손상되면 통신 기능을 수행할 수 없기 때문에 OR 게이트로 표현하였으며, 이를 그림 4.20에 도식화하여 나타내었다.



그림 4.20 C-Kill 관련 구성 요소의 FT Fig. 4.20 A fault tree for C-Kill

마지막으로 K-Kill의 경우에는 손상 시에 전차 전체에 영향을 주는 치명 부품 으로 정의된 연료 탱크 및 탄약고를 모두 OR 게이트로 표현하였다. 연료 탱크



(좌), 연료 탱크(우), 탄약고(1), 탄약고(2), 탄약고(3) 중에 하나라도 피격되어 손 상되면, 설정한 연료나 폭약의 종류에 따라 K-Kill이 발생할 수 있기 때문에 F-Kill 이나 M-Kill의 피해 기준에 관계없이 중복으로 분석을 수행한다. 즉, 치 명 부품으로 정의된 경우에는 피해 기준별 상실 확률 분석을 비롯하여 추가적 으로 K-Kill에 관한 분석 대상이 되며, 이러한 K-Kill에 관한 Fault Tree를 그림 4.21에 도식화하여 나타내었다.



#### 3) 피해 기준별 상실 확률 분석

이렇게 구성된 Fault Tree를 기반으로 피해 기준별 상실 확률을 분석할 수 있 다. 개발한 전투 시스템의 통합 생존성 분석 시스템의 피해 기준별 상실 확률 분석 기능을 이용하여 분석을 수행하였고, 피해 기준 중 F-Kill에 관한 분석 결 과 화면을 그림 4.22에 나타내었으며, 각 피격면에 대하여 분석된 피해 기준별 상실 확률을 표 4.8에 정리하였다.

1945





그림 4.22 피해 기준별 상실 확률 분석 결과 Fig. 4.22 A result of probability analysis by kill criteria

표 4.8	3 피히	케	기준별	를 상	·실	확률	분석	결과(전	면/측면/평균	<u>_</u> )
Table	4.8	A	result	of k	cill j	probal	oility	analysis	(front/side/av	verage)

피해 기준	전면	측면	평균
F-Kill	0.698319	0.766954	0.732637
M-Kill	0.699576	0.754237	0.589577
A-Kill	0.549324	0.62983	0.726907
S-Kill	0.025835	0.012296	0.019066
C-Kill	0.682894	0.744629	0.713762
K-Kill	0.200084	0.052242	0.126163

분석 결과를 보면, F-Kill의 발생 확률은 전면의 경우 '0.698319', 측면의 경우 '0.766954'로 측면에서 F-Kill이 발생할 확률이 더 높게 나타났으며, M-Kill은 전 면의 경우 '0.699576', 측면의 경우 '0.754237'로 측면의 M-Kill 발생 확률이 큰 것으로 나타났다. A-Kill은 전면의 경우 '0.549324', 측면의 경우 '0.62983'으로 전면에 비해 측면의 A-Kill 발생 확률이 더 높게 나타났음을 확인할 수 있다. 또한 S-Kill, C-Kill, K-Kill은 전면이 각각 '0.025835', '0.682894', '0.200084'로 나 타났으며, 측면은 각각 '0.012296', '0.744629', '0.052242'로 나타났기 때문에 상 대적으로 측면에 비해 전면이 S-Kill, K-Kill에 취약하고, 전면에 비해 측면은 C-Kill에 취약한 것으로 해석할 수 있다. 즉, F-Kill, M-Kill, A-Kill, C-Kill은 전 면보다는 측면에서 발생할 확률이 높고, S-Kill, K-Kill은 전면에서 발생할 확률 이 높다.

이러한 피해 기준별 상실 확률 분석의 결과를 참고하여 기능 수준의 신뢰성 분석을 수행할 수 있으며, 상대적으로 높은 확률을 가지는 피해 기준과 관련된 구성 요소의 개선 및 보강이나 추가적인 예비 구성 요소의 탑재 등을 통해 신 뢰성을 향상시킬 수 있다.

#### 4) 피격면에 대한 구성 요소별 위험도 분석

d Collection

FMECA 기법 기반의 구성 요소별 위험도 분석을 위하여 산정된 중요도 및 분석된 피격 확률에 표 3.8 및 표 3.9의 점수 기준을 적용하였으며, 식 (3.9)를 이용하여 전면과 측면에 대한 구성 요소별 고장 모드, 영향, 위험도 분석을 위 한 FMECA 표를 도출하였다. 이때, 피해 기준인 F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill을 고장 모드로 설정하고, 이에 따라 영향을 공격 기능 상실, 이동 기능 상실, 방어 기능 상실, 탐지 기능 상실, 통신 기능 상실로 정의하였으며, 그 결 과를 표 4.9에 정리하였다.

표 4.9 FMECA 결과 및 구성 요소별 위험도

Table 4.9	А	result	of F	FMECA	table	with	criticality	of	components	(front/sid	de)
-----------	---	--------	------	-------	-------	------	-------------	----	------------	------------	-----

구성 요소명	고장 모드	영향	중요도 점수 (A)	전면 피격 확률 점수 (B)	측면 피격 확률 점수 (C)	전면 위험도 (A × B)	측면 위험도 (A × C)
주포		공격 기능 상실	6	2	6	12	36
사격 통제 장치	F-Kill		6	4	1	24	6
탄약고(1)			4	4	2	16	8
탄약고(2)			4	4	3	16	12
탄약고(3)			4	4	2	16	8
포수			6	5	4	30	24
엔진		이동 기능 상실	6	647	6	42	36
연료 탱크(좌)	M-Kill		4	3	4	12	16
연료 탱크(우)			4	3	4	12	16
무한궤도(좌)			4	7	10	28	40
무한궤도(우)			4945	7.13	10	28	40
조종수			SH6OL	4	3	24	18
장갑(상)		방어 기능 상실	70	8	8	56	56
장갑(하)	A-Kill		6	9	10	54	60
능동 방어 체계(좌)			4	2	4	8	16
능동 방어 체계(우)			4	2	4	8	16
연막탄 발사기(좌)			3	3	3	9	9
연막탄 발사기(우)			3	3	3	9	9


중요도 전면 피격 측면 피격 전면 즉면 고장 구성 요소명 영향 점수 확률 점수 확률 점수 위험도 위험도 모드  $(\mathbf{A} \times \mathbf{B})$  $(A \times C)$ (A) **(B)** (C) 잠망경 6 4 3 24 18 탐지 해치(1) 4 3 3 12 12 기능 S-Kill 해치(2) 4 3 3 12 12 상실 해치(3) 4 3 3 12 12 무전기 4 6 2 24 8 통신 3 안테나(좌) 6 4 18 12 C-Kill 기능 3 안테나(우) 6 4 18 12 상실 5 4 3 전차장 20 15

표 4.9 FMECA 결과 및 구성 요소별 위험도(계속)

Table 4.9 A result of FMECA table with criticalities of components (front/side) (cont.)

결과를 보면, 위험도가 30 이상으로 상대적으로 높은 구성 요소는 전면의 경 우에 장갑(상)이 '56', 장갑(하)가 '54', 엔진이 '42', 포수가 '30'의 순으로 나타 났으며, 측면의 경우에 장갑(하)가 '60', 장갑(상)이 '56', 무한궤도(좌)가 '40', 무 한궤도(우)가 '40', 주포가 '36', 엔진이 '36'의 순으로 나타났다. 예를 들어, 무 한궤도(좌/우)의 위험도는 전면의 경우보다 측면의 경우에 높게 나타났으므로 무한궤도(좌/우)는 전면보다 측면의 신뢰성에 더 많은 영향을 끼친다. 반면에 엔진의 위험도는 측면의 경우보다 전면의 경우에 높게 나타났으므로 엔진은 전 면의 신뢰성에 많은 영향을 끼치는 것으로 볼 수 있다.





## 5) 구성 요소별 평균 위험도 분석

전투 시스템의 전면 혹은 측면에서의 구성 요소별 신뢰성을 분석하는 것이 목적이라면 앞서 분석한 전면 및 측면의 구성 요소별 위험도는 그 자체로도 의 미가 있다. 하지만 전면 및 측면에 한정된 신뢰성이 아니라 전투 시스템 전체 의 신뢰성을 분석하기 위하여 통합적인 고려가 필요하다. 이를 위하여 본 논문 에서는 전면 및 측면 위험도의 평균값을 이용한다. 전면과 측면 위험도의 평균 값을 구한 후에 이를 기준으로 내림차순으로 정렬하였으며, 이를 표 4.10에 나 타내었다.

결과를 보면, 포수가 '60', 장갑(하)가 '57', 전차장이 '50', 조종수가 '48', 장 갑(상)이 '48' 등의 순으로 구성 요소별 통합 위험도가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이러한 구성 요소별 통합 위험도를 분석하기 위한 과정을 개발한 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템을 이용하여 수행한 화면은 그림 4.23과 같다. 이를 통해 우선순위를 두어야 할 전차의 구성 요소를 확인할 수 있으며, 이러 한 분석 결과를 활용하여 전투 시스템의 설계 단계에서 구성 요소를 개선 및 보강함으로써 신뢰성을 향상시킬 수 있다.



# 표 4.10 분석된 구성 요소별 통합 위험도

Table 4.10 A result of integrated criticalities

구성 요소명	3차원 구성 요소명	통합 위험도
포수	gunner.igs	60
장갑(하)	armor_bottom.igs	57
주포	cannon.igs	54
전차장	commander.igs	50
조종수	driver.igs	48
장갑(상)	armor_top.igs	48
무한궤도(우)	Cater_right.igs	32
사격 통제 장치	fire_control.igs	27
엔진	engine.igs	27
무전기	electronic_device.igs	24
잠망경	scope.igs	21
안테나(우)	antenna_right.igs	19.5
안테나(좌)	antenna_left.igs	19.5
탄약고(3)	projectileBox3.igs	16
탄약고(2)	projectileBox2.igs	16
무한궤도(좌)	Cater_left.igs	16
연막탄 발사기(우)	smoke_right.igs	12
능동 방어 체계(우)	APS_right.igs	12
능동 방어 체계(좌)	APS_left.igs	12
해치(2)	hatch2.igs	12
해치(1)	hatch1.igs	12
탄약고(1)	projectileBox1.igs	12
해치(3)	hatch3.igs	12
연막탄 발사기(좌)	smoke_left.igs	9
연료 탱크(좌)	fuel_tank_left.igs	8
연료 탱크(우)	fuel_tank_right.igs	8



Criticality Analysis								
File Rate								Clear
Importance of Cor	mponent		Hit Probability(front)			Hit Probability(side)		
Name	Importance	Rate	Name	HP(front)	Rate	Name	HP(side)	Rate
antenna_left	0.015	3	antenna_left,igs	0,12546125	8	antenna_left,igs	0,04303279	5
antenna_right	0.015	3	ADS loff igo	0,12546125	2	ADS lotting	0,04303279	5
APS_right	0.02	4	APS right ige	0.00738007	2	APS_rightigs	0,0204510	4
armor bottom	0.02	6	armor bottom igs	0.42066421	9	armor bottom igs	0.53893443	10
armor_top	0.07	Ğ	armor_top.igs	0.22140221	8	armor_top.igs	0.19672131	8
Cater_left	0,025	4	cannon,igs	0,00738007	2	cannon,igs	0,07786885	6
Cater_right	0,025	4	Cater_left,igs	0,10701107	8	Cater_left igs	0,12295082	8
cannon	0,075	6	Cater_right,igs	0,10701107	8	Cater_right,igs	0,57172131	10
commander	0,04	5	commander igs	0,63468635	10	commander,igs	0,73770492	10
driver	0,0625	6	driver,igs	0,063468635	b	driver,igs	0,73565574	10
electronic_device	0,0525	4	electronic_device,igs	0,11808118	0	electronic_device,igs	0,02459016	4
fire, control	0,0625	6	fire control inc	0,13033137	0	fire centrel ide	0 0400936	- E
fuel tank left	0.0375	4	fuel tank left ins	0.01845018	3	fuel tank left ins	0,0403030	1
fuel tank right	0.0375	4	fuel tank right igs	0.01845018	3	fuel tank right igs	0 0	
gunner	0.075	6	qunner.iqs	0.63837638	ĬO	qunner.iqs	0.73770492	10
hatch1	0.0306	Ă.	hatch1.igs	0.01476015	3	hatch1.igs	0.0102459	3
hatch2	0,0297	4	hatch2,igs	0,01845018	3	hatch2,igs	0,0102459	3
hatch3	0,0297	4	hatch3,igs	0,01845018	3	hatch3,igs	0,0102459	3
projectileBox1	0,0306	4	projectileBox1.igs	0,04428044	5	projectileBox1,igs	0	1
projectileBox2	0,0297	4	projectileBox2,igs	0,04428044	5	projectileBox2,igs	0,01639344	3
projectileBox3	0,0297	4	projectileBox3 igs	0,05904059	5	projectileBox3.igs	0,01639344	3
scope	0,05	5	scope,igs	0,02583026	4	scope.igs	0,01229508	3
smoke_ielt	0.01	3	smoke_ten,igs	0,01470010	5	smoke_ten,igs	0.0102459	3
SHOKELIIGHU	0,01	J	smoke_ngncigs	0,00000000	3	SHIOKELIIGHUIGS	0,0102405	J
Criticality(front) of Name gunner armor_bottom commander cannon engine armor_top driver electronic_device Cater_right fire_control antenna_left antenna_left antenna_left antenna_left antenna_left antenna_left scope projectileBox3 projectileBox1 smoke_right fuel_tank_left hatch1 fuel_tank_right hatch2 smoke_left Cater_left APS_right	Component Criticality 60 54 50 48 48 48 36 32 32 24 24 24 24 20 20 15 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	r(front)	Criticality(side) of Co Name Cannon driver gunner armor_bottom commander armor_top Cater_right fire_control Cater_left scope electronic_device APS_left antenna_right antenna_left projectileBox3 projectileBox2 hatch3 hatch1 smoke_left smoke_right engine projectileBox1 fuel_tank_left	mponent Criticality 60 60 60 60 48 32 30 24 18 16 16 16 16 16 15 12 12 12 12 12 12 12 9 9 6 4 4	i(side)	Criticality(average) of Name gunner armor_bottom cannon commander driver armor_top Cater_right fire_control engine electronic_device scope antenna_right antenna_left projectileBox3 projectileBox3 projectileBox2 Cater_left smoke_right APS_left hatch2 hatch1 projectileBox1 hatch3 smoke_left fuel_tank_left fuel_tank_left	of Component Criticality 60 57 54 50 48 48 48 32 27 27 27 27 21 19,5 19,5 16 16 16 16 16 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	(average)
•	m	•		III			,m.	•

그림 4.23 구성 요소별 위험도 분석 결과

Fig. 4.23 A result of criticality analysis for components



## 4.2.2 전차의 장갑 보강 후 통합 신뢰성 분석

분석 결과를 토대로 전차의 구성 요소인 장갑의 보장 작업을 수행하였다고 가정하며, 그 후 변화하는 신뢰성 분석을 위하여 본 논문에서 제안한 전투 시 스템 통합 신뢰성 분석 과정에 따라 재분석을 수행한다.

## (1) 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정

### - 분석 시나리오 설정

장갑 보장 후의 신뢰성 분석을 위한 1단계 사용자 요구 명세 및 시나리오는 다음과 같다.

"전차의 구성 요소인 장갑(상)의 두께를 기존 500mm에서 800mm로 보강하고, 장갑(하)의 두께를 기존 400mm에서 650mm로 보강한다. 나머지 구성 요소의 속 성 및 가중치는 동일하며, 위협의 종류 또한 대전차포탄 Type B로 동일하게 설 정한다."

1945

## (2) 모델 선택/생성 및 가중치 트리 생성

### - 구성 요소 모델의 속성 설정

사용자 요구 명세 및 분석 시나리오에 따라 변경된 장갑(상) 및 장갑(하)에 대한 속성 모델에 설정된 속성 값을 표 4.11에 나타내었으며, 장갑(상) 및 장갑 (하) 모델의 속성 중 두께를 제외한 나머지는 기존의 사례와 같다. 이렇게 나머 지 모델을 비롯하여 장갑(상) 및 장갑(하) 모델을 선택하고 생성하여 3단계의 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션 구조로 만든다.





표 4.11 설정한 전차의 주요 구성 요소의 속성

Table 4.11 Properties of selected components

구성 요소명	유형	속성				
		두께	$500 \rightarrow 800$			
장갑(상)	장갑	재질(밀도)	RHA(7.85)			
		종류	단일장갑(RHA)			
장갑(하)	장갑	두께	$400 \rightarrow 800$			
		재질(밀도)	RHA(7.85)			
		종류	단일장갑(RHA)			

# THE AND OCEAN

(3) 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행

- 전면 및 측면의 피격 확률 분석 시뮬레이션

2단계에서 생성된 모델을 기반으로 시뮬레이션 구조를 생성하였으며, 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 피격 확률 분석 시뮬레이션 결과 의 비교를 표 4.12와 표 4.13에 정리하였다. 이를 통해 시나리오와 같이 장갑의 보강에 따라 장갑(상) 및 장갑(하)의 내부에 있는 구성 요소의 피격 확률은 확 연하게 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 충격으로 인한 승무원이 받는 영 향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



표 4.12 구성 요소별 전면 피격 확률 비교(보강 전/보강 후)

Table 4.12 Comparisons of hit probabilities of components (front/after enhanced)

구성 요소명	피격 확률(보강 전)	피격 확률(보강 후)
주포	0.738007	0.738007
사격 통제 장치	2.214022	2.214022
탄약고(1)	4.428044	0.000000
탄약고(2)	4.428044	0.000000
탄약고(3)	5.904059	0.000000
포수	63.837638	42.435424
엔진	13.653137	0.000000
연료 탱크(좌)	1.845018	0.000000
연료 탱크(우)	1.845018	0.000000
무한궤도(좌)	10.701107	8.856089
무한궤도(우)	10.701107	8.856089
조종수	63.468635	42.066421
장갑(상)	22.140221	22.140221
장갑(하)	42.066421	42.066421
능동 방어 체계(좌)	0.738007	0.738007
능동 방어 체계(우)	0.738007	0.738007
연막탄 발사기(좌)	1.476015	0.738007
연막탄 발사기(우)	5.535055	0.369004
잠망경	2.583026	2.583026
해치(1)	1.476015	1.476015
해치(2)	1.845018	1.845018
해치(3)	1.845018	0.000000
무전기	11.808118	0.000000
안테나(좌)	12.546125	6.642066
안테나(우)	12.546125	6.642066
전차장	63.468635	42.066421



표 4.13 구성 요소별 측면 피격 확률 비교(보강 전/보강 후)

Table 4.13 Comparisons of hit probabilities of components (side/after enhanced)

구성 요소명	피격 확률(보강 전)	피격 확률(보강 후)
주포	7.786885	7.786885
사격 통제 장치	0.409836	0.409836
탄약고(1)	0.000000	0.000000
탄약고(2)	1.639344	0.000000
탄약고(3)	1.639344	0.000000
포수	73.770492	9.221311
엔진	0.000000	0.000000
연료 탱크(좌)	0.000000	0.000000
연료 탱크(우)	0.000000	0.000000
무한궤도(좌)	12.295082	12.295082
무한궤도(우)	57.172131	57.172131
조종수	73.565574	9.016393
장갑(상)	19.672131	19.672131
장갑(하)	53.893443	53.893443
능동 방어 체계(좌)	2.049180	0.000000
능동 방어 체계(우)	2.049180	2.049180
연막탄 발사기(좌)	1.024590	0.409836
연막탄 발사기(우)	1.024590	0.409836
잠망경	1.229508	1.229508
해치(1)	1.024590	1.024590
해치(2)	1.024590	1.024590
해치(3)	1.024590	0.000000
무전기	2.459016	0.000000
안테나(좌)	4.303279	2.663934
안테나(우)	4.303279	2.663934
전차장	73.770492	9.221311



### (4) 통합 신뢰성 분석

Collection

#### 1) 피해 기준별 상실 확률 분석

앞서 3단계에서 분석한 피격 확률을 기반으로 피해 기준별 상실 확률을 분석 하였으며, 그 결과의 비교를 표 4.14에 정리하였다. 전면에서의 피해 기준별 상 실 확률의 분석 결과를 그림 4.24에 그래프로 나타내었고, 측면에서의 피해 기 준별 상실 확률의 분석 결과를 그림 4.25에 그래프로 나타내었으며, 전면과 측 면의 평균 피해 기준별 상실 확률을 그림 4.26에 나타내었다.

전면의 경우, 장갑의 보강 전에는 공격 기능의 상실인 F-Kill이 '69.83%'의 확 률로 발생되었으나, 보강 후에는 '44.12%'로 낮아지는 것을 알 수 있다. A-Kill 은 보강 전과 보강 후가 거의 유사한 결과를 가지는데, 그 이유는 A-Kill과 밀 접한 관련이 있는 구성 요소인 장갑은 외부에 노출되어 있기 때문이다. 그러나 위협에 의해 피격되더라도 관통되지 않는다면 전차 내부의 구성 요소를 보호하 기 때문에 내부에 있는 구성 요소의 피격 확률이 낮아지게 된다. 보강 후, M-Kill은 '69.95%'에서 '42.52%'로 낮아졌고, S-Kill은 모든 탐지 기능 관련 부품 이 장갑의 보호를 받지 못하는 외부에 노출되어 있으므로 보강 전과 거의 유사 한 결과를 보인다. 또한, C-Kill은 '68.28%'에서 '42.32%'로 발생 확률이 낮아졌 으며, K-Kill의 발생 확률은 '20%'에서 '0%'로 감소하였다.

측면의 경우도 마찬가지로 구성 요소의 특성에 따라 거의 유사하거나 낮아진 것을 확인할 수 있다. 이처럼, 시나리오에 따른 장갑의 보강 전과 보강 후에 달 라지는 피해 기준별 상실 확률을 확인할 수 있다.

피해 기준	전면(보강 전)	전면(보강 후)	측면(보강 전)	측면(보강 후)
F-Kill	0.698319	0.441253	0.766954	0.166332
A-Kill	0.549324	0.548967	0.629830	0.629642
M-Kill	0.699576	0.425208	0.754237	0.154120
S-Kill	0.025835	0.025830	0.012296	0.012295
C-Kill	0.682894	0.423220	0.744629	0.092857
K-Kill	0.200084	0.000000	0.052242	0.000000

표 4.14 피해 기준별 상실 확률 비교(보강 전/보강 후)

Table 4.14 Comparisons for loss of kill criteria (after enhanced)







Fig. 4.24 Comparisons of loss of kill criteria (front)





Fig. 4.25 Comparisons of loss of kill criteria (side)





Fig. 4.26 Comparisons of loss of kill criteria (average)





## 2) 구성 요소별 평균 위험도 분석

중요도와 피격 확률을 기반으로 구성 요소별 평균 위험도 분석 결과의 비교 를 표 4.15에 정리하였으며, 그 결과를 그림 4.27에 그래프로 나타내었다. 이를 통해 장갑 보장 시나리오에 따라 구성 요소별 평균 위험도 분석의 결과가 달라 지는 것을 확인할 수 있으며, 전체적으로 구성 요소별 위험도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이처럼 제안한 방법을 통해 장갑의 보장 전의 전차의 신뢰성과 장 갑 보장 후의 전차의 신뢰성을 분석할 수 있다.





# 표 4.15 구성 요소별 위험도 비교

Table 4.15 Comparisons of criticalities (after enhanced)

구성 요소명	3차원 구성 요소명	평균 위험도 (보강 전)	평균 위험도 (보강 후)
안테나(좌)	antenna_left.igs	19.5	15
안테나(우)	antenna_right.igs	19.5	15
능동 방어 체계(좌)	APS_left.igs	12	6
능동 방어 체계(우)	APS_right.igs	12	12
장갑(하)	armor_bottom.igs	57	57
장갑(상)	armor_top.igs	48	48
주포	cannon.igs	54	51
무한궤도(좌)	Cater_left.igs	16	16
무한궤도(우)	Cater_right.igs	32	30
전차장	commander.igs	50	40
조종수	driver.igs	48	48
무전기	electronic_device.igs	24	4
엔진	engine.igs	27	6
사격 통제 장치	fire_control.igs	27	15
연료 탱크(좌)	fuel_tank_left.igs	8	4
연료 탱크(우)	fuel_tank_right.igs	8	4
포수	gunner.igs	60	48
해치(1)	hatch1.igs	12	12
해치(2)	hatch2.igs	12	12
해치(3)	hatch3.igs	12	4
탄약고(1)	projectileBox1.igs	12	4
탄약고(2)	projectileBox2.igs	16	4
탄약고(3)	projectileBox3.igs	16	4
잠망경	scope.igs	21	21
연막탄 발사기(좌)	smoke_left.igs	9	4.5
연막탄 발사기(우)	smoke_right.igs	12	3







그림 4.27 구성 요소별 위험도 분석 결과 비교

Fig. 4.27 Comparisons of criticality analysis result (after enhanced)



## 4.2.3 선행 연구와 본 연구의 비교

사례 연구를 통해 본 논문에서 제안하는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방 법의 유용성을 검증하였다. 기존의 선행 연구에 대한 한계점을 보완하고, 설계 단계에서의 정량적인 전투 시스템 통합 신뢰성 분석을 위한 방법을 제안하였으 며, 개발한 시스템을 기반으로 제안한 방법을 검증하였다. 앞서 2장에서 기술하 였던 기존의 연구와 본 논문에서의 연구를 분석 대상, 대상의 표현 방법, 분석 의 목적, 제안한 방법의 검증, 모델링 및 시뮬레이션 여부에 따라 표 4.16에 비 교하여 정리하였다.

본 논문에서는 전투 시스템을 구성하는 구성 요소의 종류에 따른 속성을 정 의하였으며, 모델의 속성을 변경하거나 추가할 수도 있다. 또한, 새로운 전투 시스템에 대해서도 3차원 구성 요소의 모델링을 수행하고 모델 베이스에 추가 한 후, 구성 요소 속성 모델과 결합하는 모델 생성 과정을 거치면, 새로운 전투 시스템에 대한 신뢰성 분석이 가능해진다. 또한, 관통, 손상, 화재(폭발), 충격의 영향이 고려된 피격 확률 분석이 가능하며, 다양한 위협 모델을 추가 및 선택 하여 이에 따른 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 제안한 방법론이 적용된 시스템을 통해 모델링 및 시뮬레이션 기반의 전투 시스템 통 합 신뢰성 분석이 가능하다.



표 4.16 기존 연구와 본 논문의 비교

Table 4.16 Comparisons between related works and this thesis

	연 구	[14-15]	[16]	[17-19]	[20]	[21]	[41]	[43]	[45]	[54]	[56]	[57]	본 논문
	육상(전차)	$\checkmark$	$\checkmark$				$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
문석 대상	해상(함정)			$\checkmark$	$\checkmark$								$\checkmark$
1 0	공중(전투기)						000			$\checkmark$			$\checkmark$
대상	수치(텍스트)		$\checkmark$	$\checkmark$	$\sqrt{2}$	ME HID				$\checkmark$			$\checkmark$
표현	2D		$\checkmark$	$\checkmark$	Z			E					
방법	3D	$\checkmark$			KOR	$\checkmark$			$\checkmark$		$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
	관통	$\checkmark$	$\checkmark$										$\checkmark$
분석	손상		$\checkmark$	$\checkmark$		√94			$\checkmark$	$\checkmark$			$\checkmark$
~~ (영향)	화재(폭발)				2.e		LH				$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
	충격												$\checkmark$
제안	수학적 증명				$\checkmark$								
방법	상용 SW					$\checkmark$				$\checkmark$			
검증	직접 개발	$\checkmark$									$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
M	&S 여부		$\checkmark$						$\checkmark$				$\checkmark$





## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법을 제안하였으며, 제안 한 방법론에서는 1단계(사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정), 2단계(모델 선택 및 생성), 3단계(시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행), 4단계(통합 신뢰성 분석)의 과정을 거쳐 전투 시스템의 통합 신뢰성을 분석하였다.

이를 위해, 본 논문에서는 전투 시스템의 구성 요소를 장갑, 일반 부품, 치명 부품, 승무원으로 구분하여 모델링하였고, 구성 요소에 대한 관통, 손상, 화재, 충격에 의한 영향을 모델링하였으며, 이러한 영향 요소를 통합적으로 고려하기 위한 방법을 제시하였다. 또한, 3차원 CAD를 기반으로 전투 시스템의 구성 요 소를 모델링하였으며, 구성 요소의 유형에 따른 속성을 모델링하였다. 전투 시 스템에 피해를 줄 수 있는 위협 및 영향 요소의 특성을 분석하여 모델링하였으 며, 3차원 구성 요소, 구성 요소 속성, 영향 요소, 위협 모델에 대한 모델 베이 스를 구축하였다.

그 후, 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 과정의 각 단계에 따라 사용자 요구 명세 및 시나리오를 설정하고, 모델을 선택하여 생성하고 시뮬레이션 구조를 생성하였다. 다중 관통선 기반으로 영향 요소를 고려하여 구성 요소의 피격 확 률 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 제안한 방법으로 FTA 기법 및 FMECA 기법을 전투 시스템의 신뢰성 분석에 적용하여 통합 신뢰성 분석을 수 행하였고, 추가적으로 제안한 방법을 적용한 모델링 및 시뮬레이션 기반 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템을 개발하였으며, 이를 통해 제안한 방법론의

- 110 -



유용성을 사례 연구를 통해 검증하였다.

제안하는 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 방법론을 적용하면, 기존 연구의 한 계를 극복하고, 모델링 및 시뮬레이션을 기반으로 다양한 종류의 위협에 대한 전투 시스템의 신뢰성 분석을 수행할 수 있다. 또한, 영향 요소가 고려된 피해 기준별 상실 확률 및 구성 요소별 위험도를 기반으로 전투 시스템의 신뢰성을 통합적으로 분석할 수 있다. 이때, 산정된 중요도는 정적인 요소가 되고, 분석 된 피격 확률은 영향 요소 혹은 피격면에 따라 달라지는 동적인 요소가 된다. FTA 기법을 적용하여 분석한 피해 기준별 상실 확률은 기능 수준의 신뢰성을 분석을 위해 활용될 수 있고, FMECA 기법을 적용하여 분석한 구성 요소별 위 험도는 구성 요소 수준의 신뢰성을 분석을 위해 활용될 수 있다. 기능 수준의 분석 및 구성 요소 수준 분석을 기반으로 전투 시스템의 통합 신뢰성 분석을 수행할 수 있다.

향후에는 3차원 구성 요소, 구성 요소 속성, 영향 요소, 위협 모델에 관한 모 델 베이스에 다양한 모델을 세분화하여 추가하기 위한 연구가 필요하다. 또한, 개발한 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템은 3차원 모델을 활용하여 분석을 수행하기 때문에 구성 요소 모델의 수가 많아지면 분석의 속도가 느려질 수 있 는데, 이러한 분석 속도를 향상시키기 위한 연구가 필요하다. 끝으로, 일반적인 수준이 아니라 전문가 수준에서의 구성 요소에 대한 속성을 설정하여 분석의 정확도를 보다 향상시키기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.



- 111 -

## 참고문헌

- M. O. Said, "Theory and Practice of Total Ship Survivability for Ship Design", Naval Engineers Journal, vol. 107, no. 4, pp.191-203, 1995.
- [2] D. F. Haskell, AVVAM-1 (Armored Vehicle Vulnerability Analysis Model) and Tank Vulnerability Sensitivity Studies, Technical Report ADP000616, Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, U. S. 1973.
- [3] D. F. Haskell, Systems Vulnerability And Lethality In The Development Phase, Technical Report AD-A149 737, Army Ballistic Research Laboratory, 1984.
- [4] J. M. Abell, M. D. Burdeshaw, B. A. Rickter, Degraded States Vulnerability Analysis: PHASE II, Technical Report BRL-TR-3161, U.S. Army Research Laboratory, 1990.
- [5] P. H. Deitz, Jill H. Smith, John H. Suckling, Comparisons of Field Tests With Simulations: Abrams Program Lessons Learned, Technical Report BRL-MR-381, Army Ballistic Research Laboratory, 1990.
- [6] D. D. Lynch, R. W. Kunkel, S. S. Juarascio, An Analysis Comparison Using the Vulnerability Analysis for Surface Targets (VAST) Computer Code and the Computation of Vulnerable Area and Repair Time (COVART III) Computer Code, Technical Report ARL-MR-341, U.S. Army Research Laboratory, 1997.
- [7] A. Humphrey, J. See, D. Faulkner, "A Methodology to Assess Lethality and Collateral Damage for Non fragmenting Precision-Guided Weapons",





International Test and Evaluation Association Journal, pp. 411-419, 2008.

- [8] J. A. Smith, B. S. Ward, "System of Systems Survivability, Lethality, Vulnerability Assessment: Ballistic Vulnerability Modeling Demonstration", Proceeding of Live-Virtual Constructive Conference, pp. 1-15, 2009.
- [9] 황훈규, 김헌기, 이장세, "전투 시스템 생존성 분석을 위한 에이전트 기반 모델링 및 시뮬레이션", 한국정보통신학회 논문지, 제16권, 제12호, pp. 2581-2588, 2012.
- [10] CONDAT, GSS Attack Simulation Manual (Version 0707-04), CONDAT, 2007.
- [11] CONDAT, GSS Target and Technology Description (Version 0707-05), CONDAT, 2007.
- [12] E. Hunt and M. Burdeshaw, "MUVES 3 Vulnerability/Lethality Analysis Tool of the Future", Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics, pp. 2023-2034, 2011.
- [13] R. A. Bowers, "Overview of MUVES 3 and the MUVES 3 V/L service", Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics, pp. 2035-2046, 2011.
- [14] 황훈규, 이재웅, 이장세, 박종서, "전투 시스템 생존성 분석을 위한 3차원 관통 해석 프로그램 개발", 2013 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문 초록집, pp. 1997-1998, 2013.
- [15] 황훈규, 이재웅, 이장세, 박종서, "전투 시스템 생존성 분석을 위한 3차원 관통 해석 프로그램 개발 : 전차 모델을 대상으로", 한국정보통신학회논문 지, 제19권, 제1호, pp. 244-250, 2015.
- [16] 김헌기, "SES/MB 프레임워크 및 DEVS 시뮬레이션을 이용한 전차 취약성 분석", 한국해양대학교 대학원, 석사학위 논문, 2015.
- [17] 김광식, 이장현, 황세윤, "취약면적 기반의 함정 취약성 간이 평가 방법에



관한 연구", 대한조선학회논문집, 제48권, 제5호, pp. 404-413, 2011.

- [18] K. S Kim and J. H. Lee, "Simplified vulnerability assessment procedure for a warship based on the vulnerable area approach," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 26, no. 7, pp. 2171-2181, 2012.
- [19] 김광식, 이장현, "탄두의 관통 효과를 고려한 함정 취약성 평가 절차에 관
  한 기본 연구", 대한조선학회논문집, 제49권, 제3호, pp. 254-263, 2012.
- [20] 임길혁, 함정의 취약성 해석기법에 대한 연구, 충남대학교 대학원, 석사학 위 논문, 2006.
- [21] J. Li, W. Yang, Y. Zhang, Y. Pei, Y. Ren, and W. Wang, "Aircraft vulnerability modeling and computation methods based on product structure and CATIA," Chinese Journal of Aeronautics, vol. 26, no. 2, 334-342, 2013.
- [22] W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts and D. F. Haasl, Fault Tree Handbook, U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S., 1981.
- [23] L. K. Roach, Fault Tree Analysis and Extensions of the V/L Process Structure, Technical Report ARL-TR-149, U.S. Army Research Laboratory, 1993.
- [24] International Electrotechnical Commission, Fault Tree Analysis (FTA) Second edition, IEC 61025, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [25] 최성운, "RBD와 FTA의 논리구조와 신뢰성 중요도의 고찰에 의한 시스템 비시간가동률 개선방안", 대한안전경영과학회지, 제13권, 제3호, pp. 45-52, 2011.
- [26] Department of Defense (DoD), Procedures for performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis, Technical Report MIL-STD-1629A, 1980.
- [27] International Electrotechnical Commission, Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), IEC 60812, International Electrotechnical Commission, 1985.



- [28] C. A. Ericson, "Fault Tree Analysis A History", Proceedings of the 17th International Systems Safety Conference, pp. 1-9, 1999.
- [29] 김정만, 철도차량시스템의 안전성 확보를 위한 상용제동장치의 FTA 연구, 서울산업대학교 대학원, 석사학위 논문, 2009.
- [30] 신덕호, 이강미, 이재호, 김용규, "철도신호 내장형제어기 안전성 향상을 위한 워치독타이머 설계 및 평가", 한국철도학회논문집, 제10권, 제6호, pp. 730-734, 2007.
- [31] 박민홍, 이정훈, 곽희만, 김민호, "도시철도 승강장 안전발판 시스템 신뢰 도 분석에 관한 연구", 한국산학기술학회논문지, 제16권, 제6호, pp. 3685-3691, 2015.
- [32] 문근환, 김동성, 최주호, 김진곤, "하이브리드 로켓 모터의 신뢰성 분석을 위한 FMEA 및 FTA", 한국항공운항학회지, 제21권, 제4호, pp. 27-33, 2013.
- [33] 박형기, 가전제품의 최적 설계를 위한 위험 요소 발굴 및 신뢰성 평가 기 술에 관한 연구, 전주대학교 대학원, 박사학위 논문, 2013.
- [34] 이승혁, 발전설비의 수명을 고려한 신뢰도 기반 유지보수계획 수립에 관한 연구, 한양대학교 대학원, 박사학위 논문, 2007.
- [35] 이도선, FMECA적용을 통한 벨트식 도어시스템 신뢰성 향상에 관한 연구, 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사학위 논문, 2009.
- [36] 차재환, FMECA를 활용한 고속차량(KTX-II) 공기제동장치 예방유지보수업
  무 개선에 관한 연구, 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사학위 논문,
  2009.
- [37] 백종길, 고속철도 동력차 답면 제동장치 신뢰성 향상 방안연구, 서울과학 기술대학교 철도전문대학원, 석사학위 논문, 2011.
- [38] 박재홍, FMECA를 적용한 7호선 VVVF 인버터 시스템 개선방안에 관한 연 구, 서울과학기술대학교 철도전문대학원, 석사학위 논문, 2012
- [39] 김장군, KTX 모터 감속기 신뢰성 향상 방안 연구, 서울과학기술대학교 철

Collection

도전문대학원, 석사학위 논문, 2014.

- [40] 신동준, FMEA/FMECA를 활용한 도시철도차량 신뢰성 향상방안 연구, 성 균관대학교 대학원, 석사학위 논문, 2012.
- [41] 황훈규, 강지원, 이장세, "FMECA 기반 위험도를 활용한 전차의 구성 부품 별 취약성 분석 프로그램의 개발", 한국정보통신학회논문지, 제19권, 제8 호, pp. 1973-1980, 2015.
- [42] R. J. Latino, K. C. Latino and M. A. Latino, Root Cause Analysis: Improving Performance for Bottom-Line Results, 4th ed. CRC Press, 2011.
- [43] 황훈규, 김헌기, 이재웅, 이장세, "전투 시스템 생존성 분석을 위한 주요
  부품의 중요도 산정 기법 연구", 2014 제1회 미래국방컨퍼런스 논문집, pp.
  145-146, 2014.
- [44] 황훈규, 이재욱, 이재웅, 이장세, "부품의 중요도를 활용한 3차원 전차 모
  델 기반 생존성 분석 시스템 개발", 한국정보통신학회논문지, 제19권, 제5
  호, pp. 1269-1276, 2015
- [45] 황훈규, 유병규, 이재응, 이장세, "FTA 기법을 활용한 피격 확률 기반의 전 차 취약성 분석 시스템 개발", 한국정보통신학회논문지, 제19권, 제8호, pp. 1981-1989, 2015.
- [46] M. D. Burdeshaw, J. M. Abell, S. K. Price, and L. K. Roach, Degraded States Vulnerability Analysis of a Foreign Armored Fighting Vehicle, Technical Report BRL-TR-3161, Army Research Laboratory, U. S. 1993.
- [47] W. E. Baker, J. H. Smith and W. A. Winner, Vulnerability/Lethality Modeling of Armored Combat Vehicles - Status and Recommendations, Technical Report ARL-TR-42, Army Research Laboratory, U. S. 1993.
- [48] L. K. Roach, A Methodology for Battle Damage Repair (BDR) Analysis, Technical Report ARL-TR-330, U.S. Army Research Laboratory, 1994.
- [49] M. V. Carras, BDA Enhancement Methodology using Situational Parameter



Adjustments, Air Force Institute of Technology, 2006.

- [50] P. H. Deitz, Computer-Aided Techniques For Survivability/Lethality Modeling, Technical Report BRL-MR-3667, Army Ballistic Research Laboratory, 1988.
- [51] M. W. Starks, New Foundations For Tank Vulnerability Analysis (With 1991 Appendix), Technical Report BRL-MR-3915, U.S. Army Research Laboratory, 1991.
- [52] G. L. Guzie, Vulnerability Risk Assessment, Army Research Laboratory, Technical Report ARL-TR-1045, 2000.
- [53] B. Ward, "Extending a Missions and Means Framework (MMF) Demonstration to Vulnerability/Lethality Data Production", Proceedings of Modeling and Simulation Conference, 2005.
- [54] 양주석, 최영진, 이경태, 지철규, "전투기 개념설계 단계의 Fuzzy 이론을 적 용한 전투기 취약도 분석기법 연구", 2012년도 한국항공우주학회 춘계학술 대회, pp. 812-817, 2012.
- [55] 장은수, 박강, 최상영, "지상전투차량의 취약성 평가를 위한 탄의 특성 비 교", 2014년도 한국CAD/CAM학회 하계학술대회 논문집, pp. 197-199, 2014.
- [56] 황훈규, 김헌기, 이장세, 이헌주, 이은민, 이해평, "순간 화재에 의한 전투 시스템 취약성 분석 프로그램의 개발", 2013 한국군사과학기술학회 종합학 술대회 논문 초록집, pp. 1999-2000, 2013.
- [57] 황훈규, 이장세, 이승철, 박영주, 이해평, "전투 시스템의 순간 화재 예측
  프로그램 개발", 한국정보통신학회논문지, 제17권, 제1호, pp. 255-261, 2013.
- [58] 이승철, 박영록, 이해평, 박영주, 김해림, "고속 충격탄의 연료탱크 관통에 따른 내부 유동해석", 2010년도 한국안전학회 추계학술대회 초록집, p.34, 2010.
- [59] 김해림, 박영주, 이승철, 이해평, "차량의 화재하중에 관한 연구", 2010년도



한국안전학회 추계학술대회 초록집, p.59, 2010.

- [60] 이승철, 박영록, 이해평, 박영주, "고속 충격탄의 연료탱크 관통 시 내부 열유동해석", 2010년도 한국화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp.324-327, 2010.
- [61] 김해림, 박영주, 이승철, 이해평, "차량내장재의 연소생성가스 분석 연구",
  2010년도 한국화재소방학회 추계학술발표회 논문집, pp.354-357, 2010.
- [62] 이해평, 박영주, 황미정, 홍소영, 이승철, 김해림, "차량의 착화특성에 관한 연구", 2011년도 한국안전학회 춘계학술대회 초록집, p.104, 2011.
- [63] 이해평, 박영주, 이승철, 김해림, "차량용 오일의 화재안전성에 관한 연구", 2011년도 한국방재학회 학술발표대회 논문집, pp.653-658, 2011.
- [64] 이승철, 박영록, 전우철, 이해평, "고속충격탄의 연료탱크 관통시 열전달 특성", 2011년도 한국화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp.533-536, 2011.
- [65] 이은민, 외부 위협탄에 의한 전투시스템의 화재 취약성 분석에 관한 연구, 강원대학교 대학원, 석사학위 논문, 2014.
- [66] P. W. Cooper, Explosives Engineering, Wiley-VCH, 1996.
- [67] 조성일, "폭발성 난청", 대한이비인후과학회지, 제56권, 제5호, pp. 251-255, 2013.
- [68] 이학길, 고출력 고주파 무기 연구개발 동향, 국방과학연구소, 2005.
- [69] 황훈규, 김헌기, 유병규, 이장세, "다계층 전차 취약성 분석 방법론 설계",2015 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문 초록집, pp. 599-600, 2015.
- [70] H. G. Hwang, B. G. Yoo, W. S. Jeon, J. W. Kang and J. S. Lee, "3D-based Vulnerability and Reliability Analysis Methodology for Armored Fighting Vehicle", Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Reliability (ICMR 2015), pp. 58-59, 2015.



- [71] 황훈규, 박동욱, 박종일, 이장세, 류길수, "부품별 고장 영향 및 교체 알람을 제공하는 시설물 관리 시스템의 개발", 한국마린엔지니어링학회지, 제 38권, 제4호, pp. 456-462, 2014.
- [72] Open CASCADE Technology. Open CASCADE documentation [Internet]. Available: http://www.opencascade.org/doc/occt-6.8.0/overview/html/index.html.





# 부록 A 분석 및 활용 사례 2(고속정의 통합 신뢰성 분석)

## A.1 고속정의 통합 신뢰성 분석

(1) 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정

고속정의 통합 신뢰성 분석을 위해 표 A.1과 같이 분석 대상 전투 시스템으 로는 "고속정"을 선정하였고, 구축된 3D 구성 요소 모델 베이스에 있는 "39개 의 고속정 구성 요소 모델"을 대상으로 분석을 수행한다. 또한, "F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill, K-Kill"의 피해 기준에 관한 분석을 수행하도록 설정하며, "함대함미사일 Type A"를 위협으로 설정한다.

1945

OE 1

표 A.1 사용자 요구 명세

Table	A.1	User	requirement	specification
			L	L .

대상	의미
전투 시스템	고속정
구성 요소	고속정 구성 요소 모델(39개)
피해 기준	F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill, K-Kill
위협	함대함미사일 Type A



## (2) 모델 선택 및 생성

#### 1) 구성 요소 모델의 속성 설정

선택한 39개의 3D 구성 요소 모델에 대한 구성 요소 속성 모델의 속성을 표 A.2와 같이 설정하여 모델을 생성한다. 이때, 구성 요소의 유형이 장갑일 경우 에는 두께, 재질에 따른 밀도, 종류(단일 장갑/복합 장갑)를 속성으로 가지고, 일반 부품일 경우에는 두께 및 내구도를 속성으로 가진다. 또한 치명 부품의 경우에는 연료/폭약의 종류, 영향력, 영향 범위 내 구성 요소를 속성으로 가지 고, 승무원은 속성을 가지지 않으며, 중요도 산정을 위한 가중치만을 가진다.

표 A.2 선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형 Table A.2 Selected components and type of PKM

구성 요소명	유형	속성			
$\overline{\Sigma}(1)$	이바비프	두께	100		
포(1)	한민 千古	내구도	1.1		
<u>고</u> (2)	이바 비프	두께	100		
<u>エ(2)</u>	코민 下古	1945 내구도	1.1		
V. (2)	일반 부품	가 OF 다 두께	100		
坐(3)		내구도	1.1		
	키며 비프	연료/폭약의 종류	COMPB		
친구고(1)	시장 구품	영향 범위 내의 구성 요소	포(1)		
FLOE J(D)	키며 비프	연료/폭약의 종류	СОМРВ		
단악고(2)	시장 구품	영향 범위 내의 구성 요소	포(2)		
탄약고(3)	키며 비끄	연료/폭약의 종류	СОМРВ		
	시경 구품	영향 범위 내의 구성 요소	포(3)		



표 A.2 선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형(계속)

구성 요소명	유형	속성					
포술장	승무원	-					
포_승무원(1)	승무원	-					
포_승무원(2)	승무원	-					
포_승무원(3)	승무원	-					
포_승무원(4)	승무원	-					
에고	이바 버프	두께	100				
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	고민 十百	내구도	1.0				
ストレフ	이바 버프	두께	40				
조대기	린민 千古	내구도	0.8				
여근태그(지)	키머 비포	연료/폭약의 종류	경유				
신효정그(과)	N 3 T 5	영향 범위 내의 구성 요소	엔진				
여르태그(으)	र्गम म म	연료/폭약의 종류	경유				
신효정크(十)		영향 범위 내의 구성 요소	엔진				
ㅅ그르 ㅍㄹ페리(자)	이바 버프	두께	50				
드그ㅠ 드모델니(거)		1945 내구도	0.7				
ㅅ그르 ㅍㄹ페리(으)	이바 비프	두께	50				
스크큐 프로필니(干)	고민 十百	내구도	0.7				
기관장	승무원	-					
조타장	승무원	-					
기관_승무원(1)	승무원	-					
기관_승무원(2)	승무원	-					
기관_승무원(3)	승무원	-					

Table A.2 Selected components and type of PKM (cont.)



표 A.2 선정한 고속정의 주요 구성 요소 및 유형(계속) Table A.2 Selected components and type of PKM (cont.)

구성 요소명	유형	속성	
장갑(상)	장갑	두께	200
		재질(밀도)	철(7.87)
		종류	단일장갑(RHA)
장갑(중)	장갑	두께	300
		재질(밀도)	철(7.87)
		종류	단일장갑(RHA)
장갑(하)	장갑	두께	300
		재질(밀도)	철(7.87)
		종류	단일장갑(RHA)
방어_승무원(1)	승무원	EADOCEAN -	
방어_승무원(2)	승무원		
방어_승무원(3)	승무원	ER	
방어_승무원(4)	승무원	SIT	
방어_승무원(5)	승무원		
레이더	일반 부품	1945 두께 5	50
		내구도	1.0
정장	승무원		
탐지_승무원(1)	승무원	-	
탐지_승무원(2)	승무원	-	
안테나(좌)	일반 부품	두께	30
		내구도	0.8
안테나(우)	일반 부품	두께	30
		내구도	0.8
통신장	승무원	-	
통신_승무원(1)	승무원	-	
통신장비	일반 부품	두께	50
		내구도	0.9



## 2) 구성 요소 모델의 가중치 설정

고속정의 경우에는 소규모 전투나 정찰에 적합한 해상 전투 시스템이며, 이 러한 고속정의 특성을 고려하여 가중치를 설정 및 가중치 트리를 생성을 하였 다. 본 논문에서는 그림 A.1과 같이 고속정의 피해 기준에 관한 가중치를 설정 하였는데, F-Kill은 '0.25', M-Kill은 '0.40', A-Kill은 '0.10', S-Kill은 '0.15', C-Kill 은 '0.10'으로 설정하였다. 또한 각 피해 기준별 구성 요소에 설정한 가중치와 가중치 트리를 그림 A.2 ~ 그림 A.6에 나타내었으며, 이를 기반으로 산정한 중 요도를 표 A.3에 정리하였다.

















(3) 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행

## 1) 시뮬레이션 구조 생성

1단계 및 2단계를 거쳐 생성된 모델을 기반으로 생성된 고속정의 시뮬레이션 구조는 그림 A.7과 같다. 왼쪽 상단에서 3D 구성 요소 모델과 결합되어 구조화 된 구성 요소 속성 모델을 확인할 수 있으며, 왼쪽 하단에서 각 모델의 속성 및 가중치를 확인할 수 있다. 또한, 그림의 중앙에 각각의 좌표에 의해 생성된 3D 구성 요소 모델의 배치를 확인할 수 있다.



그림 A.7 생성된 시뮬레이션 구조 Fig. A.7 Generated simulation architecture


## 2) 고속정의 전면 피격 확률 분석 시뮬레이션

생성된 시뮬레이션 구조를 기반으로 고속정의 3차원 구성 요소 모델의 전면 을 기준으로 다중 피격선을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였고, 영향 요소 분 석의 결과를 그림 A.8과 표 A.3에 나타내었으며, 피격 확률 분석의 결과를 그 림 A.9와 표 A.4에 나타내었다.



그림 A.8 전면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과

Fig. A.8 A result of penetration and effectiveness analysis for components (front)



표 A.3 전면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과(일부) Table A.3 A result of penetration and effectiveness analysis for components (a part)

... (생략) 156. 피격선(P1 : -2.-60.12, P2 : -2.60.12) 교차 부품 : projectile box1.igs projectile box3.igs armor bottom.igs projectile box1.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 600) 추가 피해 부품 : cannon1.igs(관통, 잔류 관통에너지 : 23) projectile box3.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 600) 추가 피해 부품 : cannon3.igs(관통, 잔류 관통에너지 : 23) armor bottom.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 359.388535031847), 승무원(A_crew1.igs, A_crew2.igs, A_crew3.igs, A_crew4.igs, 충격/사망 A crew5.igs, C captain.igs, C crew.igs, F captain.igs, F crew1.igs, F crew2.igs, F crew3.igs, F crew4.igs, M captain.igs, M crew1.igs, M crew2.igs, M crew3.igs, M engineer.igs, S captain.igs, S crew1.igs, S crew2.igs)

... (생략)





그림 A.9 전면 구성 요소별 피격 확률 분석 결과

Fig. A.9 A result of hit probability analysis for components (front)



표 A.4 구성 요소별 전면 피격 확률 🎽

Table A.4 Front hit	probabilities	of	components
---------------------	---------------	----	------------

부품명	피격 횟수	피격 확률(P _{HC} )
포(1)	44	10.426540
포(2)	46	10.900474
至(3)	45	10.663507
탄약고(1)	25	5.9241710
탄약고(2)	20	4.7393360
탄약고(3)	25	5.9241710



표 A.4 구성 요소별 전면 피격 확률(계속)

부품명	피격 횟수	피격 확률(P _{HC} )
포술장	352	83.412322
포_승무원(1)	356	84.360190
포_승무원(2)	354	83.886256
포_승무원(3)	352	83.412322
포_승무원(4)	352	83.412322
엔진	66	15.639810
조타기	16	3.791469
연료탱크(좌)		3.554502
연료탱크(우)	15	3.554502
스크류 프로펠러(좌)	11	2.606635
스크류 프로펠러(우)	13	3.080569
기관장	355	84.123223
조타장	1945 356	84.360190
기관_승무원(1)	354	83.886256
기관_승무원(2)	355	84.123223
기관_승무원(3)	357	84.597156
장갑(상)	26	6.161137
장갑(중)	149	35.308057
장갑(하)	177	41.943128
방어_승무원(1)	354	83.886256
방어_승무원(2)	354	83.886256
방어_승무원(3)	357	84.597156
방어_승무원(4)	355	84.123223
방어_승무원(5)	355	84.123223

Table A.4 Front hit probabilities of components (cont.)



표 A.4 구성 요소별 전면 피격 확률(계속)

부품명	피격 횟수	피격 확률(P _{HC} )
레이더	44	10.426540
정장	353	83.649289
탐지_승무원(1)	354	83.886256
탐지_승무원(2)	354	83.886256
안테나(좌)	16	3.791469
안테나(우)	19	4.502470
통신장	354	83.886256
통신_승무원(1)	358	84.834123
통신장비	AND U.9	2.132701

Table A.4 Front hit probabilities of components (cont.)





## 3) 고속정의 측면 피격 확률 분석 시뮬레이션

전면과 마찬가지로 생성된 시뮬레이션 구조를 기반으로 고속정의 3차원 구성 요소 모델의 측면을 기준으로 다중 피격선을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였 고, 영향 요소 분석의 결과를 그림 A.10과 표 A.5에 나타내었으며, 피격 확률 분석의 결과를 그림 A.11과 표 A.6에 나타내었다.



## 그림 A.10 측면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과

Fig. A.10 A result of penetration and effectiveness analysis for components (side)



표 A.5 측면 구성 요소별 관통 및 영향 분석 결과(일부) Table A.5 A result of penetration and effectiveness analysis for components (a part)

... (생략)

624. 피격선(P1 : 3010.2, P2 : -3010.2)
교차 부품 : armor_bottom.igs fuel_tank_right.igs fuel_tank_left.igs
armor_bottom.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 359.388535031847),
충격/사망 승무원(A_crew1.igs, A_crew2.igs, A_crew3.igs, A_crew4.igs,
A_crew5.igs, C_captain.igs, C_crew.igs, F_captain.igs, F_crew1.igs, F_crew2.igs,
F_crew3.igs, F_crew4.igs, M_captain.igs, M_crew1.igs, M_crew2.igs, M_crew3.igs,
M_engineer.igs, S_captain.igs, S_crew1.igs, S_crew2.igs)
fuel_tank_right.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 359.388535031847)
추가 피해 부품 : engine.igs(미관통(손상정도 : 92%(-8))
fuel_tank_left.igs : 피격/관통(잔류 관통에너지 : 359.388535031847)
추가 피해 부품 : engine.igs(미관통(손상정도 : 92%(-8))
(생략)





그림 A.11 측면 구성 요소별 피격 확률 분석 결과 Fig. A.11 A result of side hit probability analysis

1945

						64	OL
표	A.6	구성	요소별	측면	피격	확률	0F

Table A	.6 Side	hit	probabilities	of	components
---------	---------	-----	---------------	----	------------

부품명	피격 횟수	피격 확률(P _{HC} )
포(1)	65	4.072682
포(2)	65	4.072682
至(3)	66	4.135338
탄약고(1)	25	1.566416
탄약고(2)	20	1.253133
탄약고(3)	25	1.566416



표 A.6 구성 요소별 측면 피격 확률(계속)

부품명	피격 횟수	피격 확률(P _{HC} )
포술장	1401	87.781955
포_승무원(1)	1402	87.844612
포_승무원(2)	1398	87.593985
포_승무원(3)	1402	87.844612
포_승무원(4)	1398	87.593985
엔진	210	13.157895
조타기	12	0.751880
연료탱크(좌)	51	3.195489
연료탱크(우)	51	3.195489
스크류 프로펠러(좌)	4	0.250627
스크류 프로펠러(우)	4	0.250627
기관장	1398	87.593985
조타장	19451398	87.593985
기관_승무원(1)	off of 1398	87.593985
기관_승무원(2)	1398	87.593985
기관_승무원(3)	1398	87.593985
장갑(상)	14	0.877193
장갑(중)	319	19.987470
장갑(하)	1065	66.729320
방어_승무원(1)	1398	87.593985
방어_승무원(2)	1398	87.593985
방어_승무원(3)	1398	87.593985
방어_승무원(4)	1398	87.593985
방어_승무원(5)	1398	87.593985

Table A.6 Side hit probabilities of components (cont.)



표 A.6 구성 요소별 측면 피격 확률(계속)

부품명	피격 횟수	피격 확률(P _{HC} )
레이더	36	2.255639
정장	1402	87.844612
탐지_승무원(1)	1402	87.844612
탐지_승무원(2)	1401	87.781955
안테나(좌)	16	1.002506
안테나(우)	19	1.190476
통신장	1398	87.593985
통신_승무원(1)	1398	87.593985
통신장비		0.187970

Table A.6 Side hit probabilities of components (cont.)

(4) 중요도 산정 및 통합 신뢰성 분석

1) 중요도 산정

생성한 가중치 트리를 기반으로 중요도 산정식을 적용하여 각 구성 요소별 중요도를 산정하였으며, 그 결과를 표 A.7에 정리하였다. 또한, 이러한 과정을 개발한 전투 시스템의 신뢰성 분석 시스템을 기반으로 구성 요소 속성 모델을 통해 설정한 가중치를 이용하여 수행하였으며, 그 화면은 그림 A.12와 같다.

1945



# 표 A.7 산정된 전차의 구성 요소별 중요도

Table A.7	A	result	of	importance	calculation	for	components
-----------	---	--------	----	------------	-------------	-----	------------

피해 기준	부품명	중요도
	포(1)	0.0340
	포(2)	0.0330
	포(3)	0.0330
	탄약고(1)	0.0170
	탄약고(2)	0.0165
F-Kill	탄약고(3)	0.0165
	포술장	0.0200
	포_승무원(1)	0.0200
	포_승무원(2)	0.0200
	포_승무원(3)	0.0200
	포_승무원(4)	0.0200
	엔진	0.1200
	조타기	0.0400
	연료탱크(좌)	0.0400
	연료탱크(우)	0.0400
	스크류 프로펠러(좌)	0.0300
M-Kill	스크류 프로펠러(우)	0.0300
	기관장	0.0200
	조타장	0.0200
	기관_승무원(1)	0.0200
	기관_승무원(2)	0.0200
	기관_승무원(3)	0.0200



표 A.7 산정된 전차의 구성 요소별 중요도(계속)

Table A.7 A	result of	importance	calculation	for	components (	(cont.)
-------------	-----------	------------	-------------	-----	--------------	---------

피해 기준	부품명	중요도
	장갑(상)	0.0080
	장갑(중)	0.0320
	장갑(하)	0.0400
A 17:11	방어_승무원(1)	0.0040
A-KIII	방어_승무원(2)	0.0040
	방어_승무원(3)	0.0040
	방어_승무원(4)	0.0040
	방어_승무원(5)	0.0040
	레이더	0.0900
S 17:11	정장	0.0204
5-KIII	탐지_승무원(1)	0.0198
	탐지_승무원(2)	0.0198
	안테나(좌)	0.0150
	안테나(우)	0.0150
C-Kill	통신장	0.0150
	통신_승무원(1)	0.0150
	통신장비	0.0400





그림 A.12 구성 요소별 중요도 계산 결과 Fig. A.12 A result of importance calculation for components

1945

OFL



## 2) 피해 기준별 상실 확률 분석을 위한 FT 구성

피해 기준별 상실 확률을 분석하기 위해서 고속정을 구성하는 요소의 특성을 고려하여 Fault Tree를 구성하였으며, 이를 그림 A.13 ~ 그림 A.18에 도식화하 여 나타내었다.





- 141 -





그림 A.15 A-Kill 관련 부품의 FT Fig. A.15 A fault tree for A-Kill











#### 3) 피해 기준별 상실 확률 분석

구성된 Fault Tree를 기반으로 피해 기준별 상실 확률을 분석한다. 개발한 전 투 시스템의 통합 생존성 분석 시스템의 피해 기준별 상실 확률 분석 기능을 이용하여 분석을 수행하였고, 피해 기준 중 K-Kill에 관한 분석 결과 화면을 그 림 A.19에 나타내었으며, 각 피격면에 대하여 분석된 피해 기준별 상실 확률을 표 A.8에 정리하였다.



그림 A.19 피해 기준별 상실 확률 분석 결과 Fig. A.19 A result of probability analysis by kill criteria





피해 기준	전면	측면	평균
F-Kill	0.411507	0.519772	0.465640
M-Kill	0.426559	0.516236	0.471398
A-Kill	0.565244	0.608814	0.587029
S-Kill	0.631523	0.684662	0.658093
C-Kill	0.712134	0.767298	0.739716
K-Kill	0.215788	0.103395	0.159592

표 A.8 피해 기준별 상실 확률 분석 결과(전면/측면/평균) Table A.8 A result of kill probability analysis (front/side/average)

피해 기준별 상실 확률 분석의 결과를 참고하여 기능 수준의 신뢰성 분석을 수행할 수 있으며, 상대적으로 높은 확률을 가지는 피해 기준과 관련된 구성 요소의 개선 및 보강이나 추가적인 예비 구성 요소의 탑재 등을 통해 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

1945

## 4) 피격면에 대한 구성 요소별 위험도 분석

FMECA 기법 기반의 구성 요소별 위험도 분석을 위하여 산정된 중요도 및 분석된 피격 확률에 점수 기준을 적용하였으며, 표 A.9와 같이 전면과 측면에 대한 구성 요소별 고장 모드, 고장 영향, 위험도에 관한 FMECA 표를 도출하였 다.



## 표 A.9 FMECA 결과 및 구성 요소별 위험도

부품명	고장 모드	영향	중요도 점수 (A)	전면 피격 확률 점수 (B)	측면 피격 확률 점수 (C)	전면 위험도 (A × B)	측면 위험도 (A × C)
포(1)			4	8	5	32	20
포(2)			4	8	5	32	20
포(3)			4	8	5	32	20
포술장			4	10	10	40	40
포_승무원(1)		공격	4	10	10	40	40
포_승무원(2)	F-Kill	기능	4	10	10	40	40
포_승무원(3)		상실		10	10	40	40
포_승무원(4)		KOREA MUL	4	10	10	40	40
탄약고(1)			3	5	3	15	9
탄약고(2)	- V V		3	5	3	15	9
탄약고(3)			3	5	3	15	9
엔진			8945	8	8	64	64
연료 탱크(좌)			ै//5 0ुः	これ4	4	20	20
연료 탱크(우)			5	4	4	20	20
기관장			4	10	10	40	40
조타장		이동	4	10	10	40	40
기관_승무원(1)	M-Kill	기능	4	10	10	40	40
기관_승무원(2)		상실	4	10	10	40	40
기관_승무원(3)			4	10	10	40	40
스크류 프로펠러(좌)			4	4	1	16	4
스크류 프로펠러(우)			4	4	1	16	4
조타기			5	4	1	20	4

Table A.9 A result of FMECA table with criticalities of components (front/side)



표 A.9 FMECA 결과 및 구성 요소별 위험도(계속)

통신_승무원(1)

통신 장비

Collection

Table A.7 A Tesuit (					componen		
부품명	고장 모드	영향	중요도 점수 (A)	전면 피격 확률 점수 (B)	측면 피격 확률 점수 (C)	전면 위험도 (A × B)	측면 위험도 (A × C)
장갑(상)			2	6	2	12	4
장갑(중)			4	9	8	36	32
장갑(하)			5	9	10	45	50
방어_승무원(1)		방어	1	10	10	10	10
방어_승무원(2)	A-KIII	/ ) 등 상실	1	10	10	10	10
방어_승무원(3)			1	10	10	10	10
방어_승무원(4)			INT IND	10	10	10	10
방어_승무원(5)				10	10	10	10
레이더		El .	7	8	4	56	28
정장		탐지	4	10	10	40	40
탐지_승무원(1)	5-K111	기등 상실	3	10	10	30	30
탐지_승무원(2)		194	3945	10	10	30	30
안테나(좌)			ै//301	CH4	3	12	9
안테나(우)	]	통신	3	5	3	15	9
통신장	C-Kill	기능	3	10	10	30	30
토시 스므의(1)	1	상실	2	10	10	20	20

Table A 9 A result of FMECA table with criticalities of components (front/side) (cont.)

## 5) 구성 요소별 평균 위험도 분석

전투 시스템의 전면 혹은 측면에서의 구성 요소별 신뢰성을 분석하는 것이 목적이라면 앞서 분석한 전면 및 측면의 구성 요소별 위험도는 그 자체로도 의 미가 있다. 하지만 전면 및 측면에 한정된 신뢰성이 아니라 전투 시스템 전체 의 신뢰성을 분석하기 위하여 통합적인 고려가 필요하다. 이를 위하여 본 논문 에서는 전면 및 측면 위험도의 평균값을 이용한다. 전면과 측면 위험도의 평균 값을 구한 후에 이를 기준으로 내림차순으로 정렬하였으며, 이를 표 A.10에 나 타내었다. 이러한 구성 요소별 통합 위험도를 분석하기 위한 과정을 개발한 전 투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템을 이용하여 수행한 화면은 그림 A.19와 같 다. 이를 통해 우선순위를 두어야 할 전차의 구성 요소를 확인할 수 있으며, 이 러한 분석 결과를 활용하여 전투 시스템의 설계 단계에서 구성 요소를 개선 및 보강함으로써 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

표 A.10 분석된 구성 요소별 통합 위험도 Table A.10 A result of integrated criticality

3차원 구성 요소명	구성 요소명	통합 위험도
엔진	engine.igs	64
장갑(하)	armor_bottom.igs	47.5
레이더	radar.igs	42
이동_승무원(1)	M_crew1.igs	40
이동_승무원(3)	M_crew3.igs	40
이동_승무원(2)	M_crew2.igs	40
포_승무원(1)	F_crew1.igs	40
포술장	F_captain.igs	40
포_승무원(2)	F_crew3.igs	40
조타장	M_captain.igs	40
포_승무원(4)	F_crew4.igs	40



표 A.10 분석된 구성 요소별 통합 위험도

3차원 구성 요소명	구성 요소명	통합 위험도
정장	S_captain.igs	40
포_승무원(2)	F_crew2.igs	40
기관장	M_engineer.igs	40
장갑(중)	armor_middle.igs	34
탐지_승무원(2)	S_crew2.igs	30
통신_승무원	C_crew.igs	30
탐지_승무원(1)	S_crew1.igs	30
통신장	C_captain.igs	30
포(2)	cannon2.igs	26
포(1)	cannon1.igs	26
포(3)	cannon3.igs	26
연료 탱크(우)	fuel_tank_right.igs	20
연료 탱크(좌)	fuel_tank_left.igs	20
조타기	steering_gear.igs	15
통신장비	comm_device.igs	12.5
탄약고(2)	projectile_box2.igs	12
안테나(우)	antenna_right.igs	12
탄약고(3)	projectile_box3.igs	12
탄약고(1)	projectile_box1.igs	12
안테나(좌)	antenna_left.igs	10.5
방어_승무원(3)	A_crew3.igs	10
방어_승무원(4)	A_crew4.igs	10
방어_승무원(1)	A_crew1.igs	10
방어_승무원(2)	A_crew2.igs	10
스크류 프로펠러(좌)	screw_propeller_left.igs	10
스크류 프로펠러(우)	screw_propeller_right.igs	10
방어_승무원(5)	A_crew5.igs	10
장갑(상)	armor_top.igs	8

Table A.10 A result of integrated criticality



File Date		_					_				×
File Rate										Clea	ir
Importance of Co	mponent			Hit Probability(fro	nt)			Hit Probability(sid	e)		
Name	Importance	Rate		Name	HP(front)	Rate		Name	HP(side)	Rate	
A_crew1,igs	0,004	1		A_crew1,igs	0,83886256	10		A_crew1,igs	0,87593985	10	
A_Crew2,igs	0,004		- 11	A_crew2,igs	0.84597156	10		A_Crew2,igs	0,87593985	10	
A crew4 igs	0,004	1	- 11	A crew4 ias	0.84123223	10		A crew4 ias	0.87593985	10	
A_crew5,igs	0,004	i		A_crew5.igs	0,84123223	iŏ		A_crew5.igs	0,87593985	iŏ	
antenna_left,igs	0,015	3		antenna_left,igs	0,03791469	4		antenna_left,igs	0,01002506	3	
antenna_right,igs	0,015	3	_	antenna_right,igs	0,0450237	5		antenna_right,igs	0,01190476	3	
armor_bottom,igs	0,04	5	- 11	armor_bottom,igs	0,41943128	9		armor_bottom,igs	0,00729323	10	- 11
armor ton ios	0,032	2		armor ton igs	0.06161137	6	E	armor ton igs	0.00877193	2	E
C_captain.igs	0,015	3		C_captain,igs	0,83886256	10		C_captain, igs	0,87593985	10	
C_crew.igs	0,015	3		C_crew,igs	0,84834123	10		C_crew.igs	0,87593985	<u>1</u> 0	
cannon1,igs	0,034	4	- 11	cannon1,igs	0,1042654	8		cannon1,igs	0,04072682	5	- 11
cannon2,igs	0,033	4	- 11	cannon2,igs	0,10900474	8		cannon2,igs	0,04072662	5	- 11
comm_device ias	0.033	5		comm_device.ios	0.02132701	4		comm_device.ios	0.0018797	1	
engine.igs	0,12	ě		engine,igs	0,1563981	8		engine,igs	0,13157895	ġ	
F_captain,igs	0,02	4		F_captain,igs	0,83412322	10		F_captain,igs	0,87781955	10	
E_crew1,igs	0,02	4		F_crew1,igs	0,8436019	10		F_crew1,igs	0,87844612	10	-
F_crew2,igs	0,02	4		F_crew2,igs	0,03006256	10		F_crew2,igs	0,87593985	10	
F crew4 igs	0.02	4		F crew4 ias	0.83412322	10		F crew4 ias	0.87593985	10	
fuel_tank_left.igs	0.04	5		fuel_tank_left.igs	0.03554502	4		fuel_tank_left.igs	0.03195489	4	
fuel_tank_right,igs	0,04	5		fuel_tank_right,igs	0,03554502	4		fuel_tank_right,igs	0,03195489	4	
M_captain.igs	0,02	4		M_captain.igs	0,8436019	10		M_captain.igs	0,87593985	10	
M_crew1,igs	0.02	4		M_crew1,igs	0,03006256	10		M_crew1,igs	0,87593985	10	
M crew3 igs	0.02	4	-	M crew3 igs	0.84597156	10	Ŧ	M_crew3 igs	0.87593985	10	
*			F.	(		+		<		+	
Criticality(front) of	f Component			Criticality(side) of	Component			Criticality(average)	) of Component		
Name	Criticalit	22		Marna							
engine,igs		y(front)	_ ^	Ivanie	Criticalit	y(side)	•	Name	Criticalit	y(average)	_ ^
	64	y(front)	- î	engine.igs	Criticalit 64	y(side)	Â	Name engine.igs	Criticalit	y(average)	- Â
radar,igs	64 56 45	y(front)	Î	engine,igs armor_bottom,igs	Criticalit 64 50	y(side)	î	Name engine,igs armor_bottom,igs	Criticalit 64 47,5	y(average)	
armor_bottom,igs F crew4 igs	64 56 45 40	y(front)	Î	engine,igs armor_bottom,igs M_crew1,igs M_cantain.igs	Criticalit 64 50 40 40	y(side)	Î	Name engine,igs armor_bottom,igs radar,igs M cantain igs	Criticalit 64 47,5 42 40	y(average)	
radar,igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs	64 56 45 40 40	y(front)		engine.igs armor_bottom.igs M_crew1.igs M_captain.igs M_crew2.igs	Criticalit 64 50 40 40 40	y(side)		Name engine,igs armor_bottom,igs radar,igs M_ccaptain,igs M_crew2,igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40	y(average)	
radar,igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs M_crew2,igs	64 56 45 40 40 40	y(tront)	-	engine.igs armor_bottom.igs M_crew1.igs M_captain.igs M_crew2.igs M_crew3.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40	y(side)		Name engine,igs armor_bottom,igs radar,igs M_crew2,igs M_crew3,igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40	y(average)	
radar, igs armor_bottom, igs F_crew4, igs M_crew1, igs M_crew2, igs M_captain, igs	64 56 45 40 40 40 40 40	y(front)		engine.igs armor_bottom.igs M_crew1.igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine.igs armor_bottom.igs radar.igs M_ccaptain.igs M_crew3.igs M_crew1.igs crew1.igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40	y(average)	
radar,igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs M_crew2,igs M_captain,igs F_captain,igs M_crew3 igs	64 56 45 40 40 40 40 40 40	y(front)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_creptain.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine.jgs armor_bottom,igs radar.jgs M_captain.igs M_crew2.igs M_crew3.igs M_crew1.igs F_crew1.igs F_crew1.igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor_bottom.igs F_crew4.igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_captain.igs F_captain.igs M_crew3.igs F_crew3.igs	64 56 45 40 40 40 40 40 40 40 40	y(front)	E	engine.igs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew4.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_crew2, igs M_crew3, igs M_crew1, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_captain, igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs M_corew2,igs M_corew1,igs F_captain,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs	64 56 45 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)	A E	engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew3.igs F_crew3.igs M_engineer.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine.igs armor_bottom.igs radar.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew4.igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs F_crew4,igs M_crew2,igs M_crew2,igs M_captain.igs M_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew4,igs F_crew4,igs	64 56 45 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_craw1,igs M_craw2,igs M_crew2,igs F_craw1,igs F_craw1,igs F_craw3,igs F_crew3,igs M_engineer,igs F_crew2,igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_crew2, igs M_crew3, igs M_crew1, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew4, igs S_captain, igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs M_crew2,igs M_captain,igs F_captain,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew1,igs F_crew1,igs S_captain,igs M_crev5,igs	64 56 45 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew3.igs F_crew3.igs M_engineer.igs F_crew3.igs M_engineer.igs S_captain.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_captain, igs M_crew3, igs M_crew3, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew4, igs S_captain, igs F_crew2, igs M_oppioner ign	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs M_captain.igs F_captain.igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew1,igs F_crew2,igs S_captain.igs M_engineer.igs armor middle ins	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs F_crew1.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew3.igs M_engineer.igs F_crew2.igs S_captain.igs armor_middle.igs S_crew2.ins	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_crew2, igs M_crew3, igs M_crew1, igs F_crew3, igs F_crew4, igs F_crew3, igs S_captain, igs F_crew2, igs M_engineer, igs armor middle ins	Criticalit 64 47.5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armort.bottom.igs F_crew4.igs M_crew2.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_captain.igs M_crew3.igs F_crew3.igs F_crew2.igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon i.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom.jgs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew3.igs M_engineer.igs S_captain.igs armor_middle.igs S_crew2.igs S_crew2.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 32 30 30	y(side)		Name engine.igs armor_bottom.igs radar.igs M_crew2.igs M_crew3.igs M_crew1.igs F_crew1.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew4.igs S_captain.igs F_crew2.igs M_engineer.igs armor_middle.igs S_crew1.igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs F_crew4,igs M_crew2,igs M_crew2,igs M_crew3,igs F_captain.igs M_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew2,igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle,igs cannon1,igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_craw1,igs M_craw2,igs M_craw3,igs F_craw1,igs F_craw1,igs F_craw3,igs F_craw3,igs M_engineer,igs F_crew2,igs S_captain,igs S_crew2,igs S_crew2,igs S_crew1,igs C_ccaptain,igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_crew2, igs M_crew3, igs M_crew3, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew2, igs S_captain, igs F_crew2, igs M_engineer, igs armor_middle, igs S_crew2, igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs F.crew4,igs M.crew2,igs M.captain.igs F.captain.igs F.crew3,igs F.crew3,igs F.crew3,igs F.crew2,igs S.captain.igs M.engineer.igs armor.middle,igs cannon1,igs cannon2,igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(front)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew3.igs F_crew3.igs M_engineer.igs F_crew2.igs S_crew2.igs S_crew2.igs S_crew1.igs C_crew.igs S_crew.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 32 30 30 30 30 30 30	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_captain, igs M_crew3, igs M_crew3, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew3, igs S_captain, igs F_crew2, igs M_engineer, igs S_crew1, igs S_crew3, igs S_cr	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor_bottom,igs F_crew4,igs M_crew1,igs M_captain,igs F_captain,igs F_captain,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew2,igs S_captain,igs M_engineer,igs armor_middle,igs cannon1,igs cannon3,igs cannon3,igs S_crew1,igs S_crew1,igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 36 32 32 32 32 32 30 30	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs M_engineer.igs F_crew3.igs S_captain.igs S_captain.igs S_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_ccrew2, igs M_crew4, igs F_crew3, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew4, igs S_captain, igs F_crew2, igs M_engineer, igs S_crew2, igs S_crew2, igs C_crew4, igs S_crew2, igs C_captain, igs S_crew4, igs S_c	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armort.bottom.igs F_crew4.igs M_crew2.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew2.igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon3.igs cannon3.igs S_crew2.igs S_crew2.igs S_crew2.igs S_crew2.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 36 32 32 32 32 32 32 30 30 30	y(tront)		engine.jgs armor_bottom.jgs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew3.igs M_engineer.igs S_captain.igs S_crew2.igs S_crew2.igs S_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_captain.igs c_annon2.igs cannon2.igs cannon2.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine.igs armor_bottom.igs radar.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew3.igs F_crew4.igs F_crew3.igs S_crew4.igs M_engineer.igs armor_middle.igs S_crew4.igs C_captain.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew5.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs F_crew4,igs M_crew2,igs M_crew2,igs F_captain.igs F_captain.igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew2,igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon1.igs cannon2,igs S_crew2,igs S_crew2,igs C_captain.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 36 32 32 32 32 32 32 30 30 30 30 30	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_craw1,igs M_craw2,igs M_craw3,igs F_craw1,igs F_craw1,igs F_craw3,igs F_craw3,igs M_engineer,igs F_crew2,igs S_craw1,igs S_craw1,igs S_craw1,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_cannon3,igs fuel_tank.right,igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_captain, igs M_crew2, igs M_crew3, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew3, igs S_captain, igs F_crew2, igs M_engineer, igs S_crew1, igs S_crew1, igs C_crew, igs C_captain, igs C_cannon1, igs cannon1, igs cannon1, igs	Criticalit 64 47.5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs F_crew4,igs M_crew2,igs M_captain.igs F_captain.igs F_captain.igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew4,igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon1.igs cannon2,igs S_crew1.igs S_crew1,igs S_crew1,igs S_crew1,igs C_captain.igs C_captain.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_cravtain,igs M_cravtain,igs M_crew2.jgs M_crew3.jgs F_crew4.jgs F_crew4.jgs F_crew4.jgs F_crew3.jgs M_engineer,igs F_crew2.jgs S_crew2.jgs S_crew2.jgs S_crew2.jgs S_crew2.jgs S_crew2.jgs S_crew1.jgs C_crew.jgs radar.jgs c_annon2.jgs cannon2.jgs cannon2.jgs tuel_tank_right,igs fuel_tank_left.jgs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_capew2, igs M_crew3, igs M_crew3, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew3, igs S_captain, igs F_crew2, igs S_captain, igs S_crew1, igs S_crew1, igs S_crew1, igs S_crew1, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs C_canon1, igs cannon1, igs cannon2, igs fuel_tank_right, igs	Criticalit 64 47.5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armort.bottom.igs F_crew4.igs M_crew2.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew2.igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon3.igs cannon3.igs C_crew1.igs S_crew2.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs M_engineer.igs F_crew3.igs S_captain.igs S_captain.igs S_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_crew1.igs C_captain.igs cannon2.igs cannon2.igs cannon2.igs cannon3.igs fuel_tank.right.igs fuel_tank.right.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 4	y(side)		Name engine.igs armor_bottom.igs radar.igs M_crew2.igs M_crew3.igs M_crew1.igs F_crew3.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew4.igs F_crew2.igs S_captain.igs F_crew2.igs M_engineer.igs armor_midle.igs S_crew2.igs C_captain.igs C_crew.igs C_captain.igs C_crew.igs cannon3.igs cannon1.igs cannon2.igs fuel_tank.ight.igs	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom.igs F_crew4.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_captain.igs F_captain.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew4.igs F_crew4.igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon1.igs cannon2.igs S_crew4.igs C_crew2.igs C_crew2.igs C_crew2.igs C_crew2.igs C_crew1.igs tue1_tank.ight.igs tue1_tank.igt.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom,igs M_crew1.igs M_crew2.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew3.igs F_crew3.igs M_engineer.igs S_crew2.igs S_crew2.igs S_crew1.igs C_crew.igs radar.igs cannon2.igs cannon3.igs fuel_tank_right.igs A_crew2.igs A_crew2.igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(side)		Name engine.igs armor_bottom.igs radar.igs M_crew2.igs M_crew3.igs F_crew1.igs F_crew1.igs F_crew3.igs F_crew3.igs F_crew3.igs S_crew4.igs F_crew3.igs S_crew4.igs C_captain.igs S_crew4.igs C_captain.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew4.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5.igs C_crew5	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs F_crew4,igs M_crew2,igs M_crew3,igs F_captain.igs M_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew2,igs S_captain.igs M_engineer.igs armor_middle.igs cannon2,igs S_crew2,igs C_captain.igs C_captain.igs cannon2,igs S_crew2,igs C_captain.igs C_captain.igs c_captain.igs c_captain.igs c_captain.igs c_captain.igs c_captain.igs fuel_tank_ight.igs tuel_tank_igt.igs	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		engine.jgs armor_bottom;igs M_crew1,igs M_crew2,igs M_crew2,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs F_crew3,igs M_engineer,igs F_crew2,igs S_captain,igs S_crew2,igs S_crew2,igs S_crew2,igs S_crew1,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,i	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 4	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_captain, igs M_crew3, igs M_crew3, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew4, igs F_crew4, igs S_captain, igs F_crew2, igs S_captain, igs S_crew1, igs S_crew1, igs S_crew1, igs S_crew2, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs fuel_tank_right, igs fuel_tank_right, igs steering_gear, igs comm_device, igs protectile_box3 ias	Criticalit 64 47,5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	
radar.igs armor.bottom,igs armor.bottom,igs M_crew4,igs M_crew2,igs M_captain,igs M_crew3,igs F_captain,igs F_crew3,igs F_crew2,igs S_captain,igs M_engineer,igs armor_middle,igs cannon3,igs cannon3,igs cannon3,igs S_crew1,igs S_crew1,igs S_crew1,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs C_captain,igs fuel_tank.right,igs steering_gear.igs screw_propeller_left screw_propeller_left	64 56 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(tront)		Anne engine, igs armor_bottom, igs M_crew1, igs M_crew2, igs M_crew2, igs F_crew1, igs F_crew3, igs F_crew3, igs F_crew3, igs F_crew3, igs S_crew2, igs S_crew2, igs S_crew2, igs S_crew2, igs S_crew2, igs C_crew, igs radar, igs cannon2, igs cannon2, igs cannon2, igs cannon1, igs A_crew3, igs A_crew4, igs A_crew4, igs A_crew4, igs	Criticalit 64 50 40 40 40 40 40 40 40 40 40 4	y(side)		Name engine, igs armor_bottom, igs radar, igs M_capew2, igs M_crew3, igs M_crew3, igs F_crew1, igs F_crew1, igs F_crew4, igs F_crew3, igs S_captain, igs F_crew2, igs S_captain, igs S_captain, igs S_crew1, igs S_crew1, igs S_crew1, igs S_crew1, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs C_captain, igs cannon1, igs cannon2, igs fuel_tank_right, igs fuel_tank_left, igs steering_eear, igs comm_device, igs projectile_box3, igs antenna_right igs	Criticalit 64 47.5 42 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	y(average)	







#### A.2 고속정의 엔진 개선 후 통합 신뢰성 분석

분석 결과를 토대로 고속정의 구성 요소인 엔진을 개선품으로 교체하였다고 가정한 후의 고속정의 신뢰성 평가를 위하여 피해 기준별 발생 확률 및 구성 요소별 위험도를 재분석을 수행하며, 시나리오는 다음과 같다.

#### (1) 사용자 요구 명세 및 분석 시나리오 설정

#### - 분석 시나리오 설정

엔진 개선 후의 신뢰성 분석을 위한 1단계 사용자 요구 명세 및 시나리오는 다음과 같다.

"고속정 모델의 엔진을 기존보다 작은 크기를 가지면서 성능 및 내구도가 더 개선품으로 교체한다. 기존 엔진은 3차원 구성 요소 모델을 기준으로 (X : 17.337, Y : 5.756, Z : 6.590)의 크기였으나, 개선품은 (X : 13.870, Y : 4.029, Z : 4.613)의 크기이다. 또한, 기존의 엔진 내구도는 1.0의 값을 가지고 있었으나, 개선품의 내구도는 1.5의 값을 가진다. 나머지 부품의 속성 및 위협의 종류는 함대함미사일 Type B로 동일하다."

#### (2) 모델 선택/생성 및 가중치 트리 생성

- 구성 요소 모델의 속성 설정

Collection

사용자 요구 명세 및 분석 시나리오에 따라 변경된 엔진의 속성 값을 표 A.11에 나타내었으며, 엔진 모델의 속성 중 내구도를 제외한 나머지는 기존의 사례와 같다. 기존과 같이 39개의 고속정 모델을 선택하여 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션 구조를 생성한다.

표 A.11 설정한 고속정의 주요 구성 요소의 속성

	Table	A.11	Properties	of	selected	components
--	-------	------	------------	----	----------	------------

구성 요소명	유형	속성		
റിച	이바 버프	두께	100	
엔진		내구도	$1.0 \rightarrow 1.5$	

#### (3) 시뮬레이션 구조 생성 및 시뮬레이션 수행

- 전면 및 측면의 피격 확률 분석 시뮬레이션

선택 및 생성된 모델을 기반으로 시뮬레이션 구조를 생성하고, 피격 확률 분 석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 피격 확률 분석 시뮬레이션 결과의 비교 를 표 A.12와 표 A.13에 정리하였다. 이를 통해 시나리오와 같이 개선에 따라 엔진의 피격 확률이 달라지는 것을 확인 할 수 있다.

표 A.12 구성 요소별 전면 피격 확률 비교(개선 전/후) Table A.12 Comparisons of hit probabilities of components (front/after enhanced)

부품명	피격 확률(개선 전)	피격 확률(개선 후)
포(1)	10.42654	10.42654
포(2)	10.900474	10.900474
至(3)	10.663507	10.663507
탄약고(1)	5.924171	5.924171
탄약고(2)	4.739336	4.739336
탄약고(3)	5.924171	5.924171
포술장	83.412322	83.412322
포_승무원(1)	84.36019	84.36019



부품명	피격 확률(개선 전)	피격 확률(개선 후)
포_승무원(2)	83.886256	83.886256
포_승무원(3)	83.412322	83.412322
포_승무원(4)	83.412322	83.412322
엔진	15.63981	10.900474
조타기	3.791469	3.791469
연료탱크(좌)	3.554502	3.554502
연료탱크(우)	3.554502	3.554502
스크류 프로펠러(좌)	2.606635	2.606635
스크류 프로펠러(우)	3.080569	3.080569
기관장	84.123223	84.123223
조타장	84.36019	84.36019
기관_승무원(1)	83.886256	83.886256
기관_승무원(2)	84.123223	84.123223
기관_승무원(3)	84.597156	84.597156
장갑(상)	6.161137	6.161137
장갑(중)	35.308057	35.308057
장갑(하)	41.943128	41.943128
방어_승무원(1)	83.886256	83.886256
방어_승무원(2)	83.886256	83.886256
방어_승무원(3)	84.597156	84.597156
방어_승무원(4)	84.123223	84.123223
방어_승무원(5)	84.123223	84.123223

표 A.12 구성 요소별 전면 피격 확률 비교(개선 전/후)(계속) Table A.12 Comparisons of hit probabilities of components (front/after enhanced) (cont.)



부품명	피격 확률(개선 전)	피격 확률(개선 후)
정장	83.649289	83.649289
탐지_승무원(1)	83.886256	83.886256
탐지_승무원(2)	83.886256	83.886256
안테나(좌)	3.791469	3.791469
안테나(우)	4.50247	4.50247
통신장	83.886256	83.886256
통신_승무원(1)	84.834123	84.834123
통신장비	2.132701	2.132701
레이더	10.42654	10.42654
정장	83.649289	83.649289
탐지_승무원(1) 🥃	83.886256	83.886256
탐지_승무원(2)	83.886256	83.886256
안테나(좌)	194 3.791469	3.791469
안테나(우)	4.50247	4.50247
통신장	83.886256	83.886256
통신_승무원(1)	84.834123	84.834123
통신장비	2.132701	2.132701

표 A.12 구성 요소별 전면 피격 확률 비교(개선 전/후)(계속) Table A.12 Comparisons of hit probabilities of components (front/after enhanced) (cont.)



부품명 피격 확률(개선 전) 피격 확률(개선 후) 포(1) 4.072682 4.072682 포(2) 4.072682 4.072682 포(3) 4.135338 4.135338 탄약고(1) 1.566416 1.566416 탄약고(2) 1.253133 1.253133 탄약고(3) 1.566416 1.566416 포술장 87.781955 87.781955 포 승무원(1) 87.844612 87.844612 87.593985 87.593985 포_승무원(2) 포 승무원(3) 87.844612 87.844612 포 승무원(4) 87.593985 87.593985 엔진 13.157895 9.899749 19450.75188 조타기 0.75188 연료탱크(좌) 3.195489 3.195489 연료탱크(우) 3.195489 3.195489 스크류 프로펠러(좌) 0.250627 0.250627 스크류 프로펠러(우) 0.250627 0.250627 기관장 87.593985 87.593985 조타장 87.593985 87.593985 기관 승무원(1) 87.593985 87.593985 기관 승무원(2) 87.593985 87.593985 기관_승무원(3) 87.593985 87.593985 장갑(상) 0.877193 0.877193 장갑(중) 19.98747 19.98747

표 A.13 구성 요소별 측면 피격 확률 비교(개선 전/후) Table A.13 Comparisons of hit probabilities of components (front/after enhanced)



- 155 -



부품명	피격 확률(개선 전)	피격 확률(개선 후)
장갑(하)	66.72932	66.72932
방어_승무원(1)	87.593985	87.593985
방어_승무원(2)	87.593985	87.593985
방어_승무원(3)	87.593985	87.593985
방어_승무원(4)	87.593985	87.593985
방어_승무원(5)	87.593985	87.593985
레이더	2.255639	2.255639
정장	87.844612	87.844612
탐지_승무원(1)	87.844612	87.844612
탐지_승무원(2)	87.781955	87.781955
안테나(좌)	1.002506	1.002506
안테나(우)	1.190476	1.190476
통신장	87.593985	87.593985
통신_승무원(1)	87.593985	87.593985
통신장비	0.187970	0.187970

표 A.13 구성 요소별 측면 피격 확률 비교(개선 전/후)(계속) Table A.13 Comparisons of hit probabilities of components (front/after enhanced) (cont.)



#### (4) 통합 신뢰성 분석

#### 1) 피해 기준별 상실 확률 분석

앞서 3단계에서 분석한 피격 확률을 기반으로 피해 기준별 상실 확률 분석하 였으며, 그 결과의 비교를 표 A.14에 정리하였다. 전면의 피해 기준별 상실 확 률의 분석 결과를 그림 A.20에 그래프로 나타내었고, 측면의 피해 기준별 상실 확률의 분석 결과를 그림 A.21에 그래프로 나타내었다. 전면의 경우, 엔진의 개 선 전에는 이동 기능의 상실인 M-Kill이 '56.52%'의 확률로 발생되었으나, 개선 후에는 '54.08%'로 낮아지는 것을 알 수 있다. 측면의 경우도 마찬가지로 엔진 의 개선 전과 보장 후에 M-Kill의 발생 확률이 '60.88%'에서 '59.41%'로 낮아지 는 것을 확인할 수 있다.

# . OTTIME AND OCEAN UNIT

표 A.14 피해	기준별 상	실 확률	ЪJ	교(7	개선	전/후)		
Table A.14 Co	mparisons	for loss	of	the	kill	criteria	(after	enhanced)

피해 기준	전면(개선 전)	전면(개선 후)	측면(개선 전)	측면(개선 후)
F-Kill	0.411507	0.411507	0.519772	0.519772
A-Kill	0.426559	0.426559	0.516236	0.516236
M-Kill	0.565244	0.540819	0.608814	0.594138
S-Kill	0.631523	0.631523	0.684662	0.684662
C-Kill	0.712134	0.712134	0.767298	0.767298
K-Kill	0.215788	0.215788	0.103395	0.103395





Fig. A.20 Comparisons of loss of kill criteria (front)





Fig. A.21 Comparisons of loss of kill criteria (side)



#### 2) 구성 요소별 평균 위험도 분석

중요도와 피격 확률을 기반으로 구성 요소별 평균 위험도 분석 결과의 비교 를 표 A.15에 정리하였다. 이를 통해 장갑 보강 시나리오에 따라 구성 요소별 평균 위험도 분석의 결과가 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 장갑의 보강 전 의 전차의 신뢰성과 장갑 보강 후의 전차의 신뢰성을 분석할 수 있다.

#### 표 A.15 구성 요소별 위험도 비교

Table A.15 Comparisons of criticalities (after enhanced)

구성 요소명	3차원 구성 요소명	평균 위험도 (개선 전)	평균 위험도 (개선 후)
engine.igs	엔진	64	60
armor_bottom.igs	장갑(하)	47.5	47.5
radar.igs	레이더	42	42
M_crew1.igs	이동_승무원(1)	40	40
M_crew3.igs	이동_승무원(3)	40	40
M_crew2.igs	이동_승무원(2)	40	40
F_crew1.igs	포_승무원(1)	40	40
F_captain.igs	포술장	40	40
F_crew3.igs	포_승무원(2)	40	40
M_captain.igs	조타장	40	40
F_crew4.igs	포_승무원(4)	40	40
S_captain.igs	정장	40	40
F_crew2.igs	포_승무원(2)	40	40
M_engineer.igs	기관장	40	40
armor_middle.igs	장갑(중)	34	34
C_crew.igs	통신_승무원	30	30



표 A.15 구성 요소별 위험도 비교(계속)

구성 요소명	3차원 구성 요소명	평균 위험도 (개선 전)	평균 위험도 (개선 후)
S_crew2.igs	탐지_승무원(2)	30	30
S_crew1.igs	탐지_승무원(1)	30	30
C_captain.igs	통신장	30	30
cannon2.igs	포(2)	26	26
cannon1.igs	포(1)	26	26
cannon3.igs	포(3)	26	26
fuel_tank_right.igs	연료 탱 <i>크</i> (우)	20	20
fuel_tank_left.igs	연료 탱 <i>크</i> (좌)	20	20
steering_gear.igs	조타기	15	15
comm_device.igs	통신장비	12.5	12.5
projectile_box2.igs	탄약고(2)	12	12
antenna_right.igs	안테나(우)	12	12
projectile_box3.igs	탄약고(3)	12	12
projectile_box1.igs	탄약고(1)	12	12
antenna_left.igs	안테나(좌)	10.5	10.5
A_crew3.igs	방어_승무원(3)	10	10
A_crew4.igs	방어_승무원(4)	10	10
A_crew1.igs	방어_승무원(1)	10	10
A_crew2.igs	방어_승무원(2)	10	10
screw_propeller_left.igs	스크류 프로펠러(좌)	10	10
screw_propeller_right.igs	스크류 프로펠러(우)	10	10
A_crew5.igs	방어_승무원(5)	10	10
armor_top.igs	장갑(상)	8	8

Table A.15 Comparisons of criticalities (after enhanced) (cont.)



결과를 보면, 엔진의 개선에 의하여 엔진의 위험도가 '64'에서 '60'으로 약간 감소한 것을 볼 수 있으며, 엔진의 개선 뿐 아니라 장갑(하) 등 다른 구성 요소 의 개선이나 보강 작업이 추가적으로 이루어지면 함정 신뢰성 분석 결과의 차 이가 보다 확연하게 나타날 것으로 판단된다.





## 부록 B 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템의 매뉴얼

## B.1 시스템 GUI 구성

개발한 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템의 실험 버전을 기능 통합 및 개선하여 배포(release) 버전으로 변환하였다. 시스템의 GUI는 그림 B.1과 같으 며, 각 부분의 메뉴는 그림 B.2와 같다.



# 그림 B.1 개발한 전투 시스템 통합 신뢰성 분석 시스템의 GUI Fig. B.1 A GUI of integrated analysis system


# ① 메뉴

File 메뉴의 Open Model을 선택하면 B.3과 같이 3차원 구성 요소 모델(*.igs) 을 로드하며, Exit를 선택하면 시스템을 종료한다. Setting 메뉴의 Threat을 선택 하면 위협 모델을 설정하기 위한 창이 출력된다. Analysis 메뉴의 Importance를 선택하면 구성 요소별 중요도 산정 결과가 출력되고, Kill Probability를 선택하 면 피해 기준별 상실 확률 분석을 위한 창이 출력되며, Criticality를 선택하면 구성 요소별 위험도 분석을 위한 창이 출력된다. 또한, Simulation 메뉴의 Single Shot Scenario 1 (AFV)을 선택하면 단일 피격선 시나리오 1(전차), Single Shot Scenario 2 (AFV)를 선택하면 단일 피격선 시나리오 2(전차), Multiple Shot Scenario 1 (AFV)를 선택하면 다중 피격선 시나리오 1(전차), Multiple Shot Scenario 1 (PKM)을 선택하면 다중 피격선 시나리오 1(고속정), Multiple Shot Scenario 2 (PKM)를 선택하면 다중 피격선 시나리오 1(고속정), Multiple Shot Scenario 2 (PKM)를 선택하면 다중 피격선 시나리오 2(고속정)에 대한 피격 확 률 분석을 위한 시뮬레이션이 각각 수행된다.

1945





#### ② 표시부 제어 메뉴

표시부 제어 메뉴는 로드한 3차원 구성 요소 모델의 확대, 축소, 이동, 회전 등 표시부를 제어하기 위한 기능을 제공한다.



🕗 🚽 « samples 🕨	CSharp1230_Xmlproperty + win32	bind + tankigs	<b>▼ 4</b> 9	tankigs 검색	P	
성 ▼ 새 폴더				III 🔹 🗖	0	
· 즐겨찾기	이름	수정한 날짜	유형	크기	<u>^</u>	
🚺 다운로드	antenna_left.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	44KB		
🛄 바탕 화면	antenna_right.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	44KB		
🗓 최근 위치	APS_left.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	45KB		
	APS_right.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	45KB	E	
라이브러리	armor_bottom.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	97KB		
🖹 문서 💡	armor_top.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	212KB		
비디오	📄 cannon.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	47KB		
🖴 사진	Cater_left.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	231KB		
🕹 음악	Cater_right.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	231KB		
	commander.igs	2015-03-05 오후	IGS 파일	370KB		
컴퓨터	driver.igs	2015-03-05 오후	IGS 파일	370KB		
🏭 로컬 디스크 (C:)	electronic_device.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	7KB		
H2G_LAB_HDD11_	engine.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	7KB		
H2G_LAB_HDD12_	fire_control.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	113KB		
-	fuel_tank_left.igs	2015-02-11 오후	IGS 파일	7КВ	*	
파일 이름	₿(N):		•	GES Files (*.igs *.iges)	•	j
			ſ	열기(0) 🔻 취소		
0.0400						
ne	Result				_	
operty_Armor						
nortype						
nsity O						
0						

그림 B.3 3차원 구성 요소 로드 Fig. B.3 3D components model open

# ③ 구성 요소 표시 및 구조 설정부

Collection

기본적으로 F-Kill, M-Kill, A-Kill, S-Kill, C-Kill에 관한 피해 기준이 자동 생 성되고, 로드한 3차원 구성요소 모델(.igs)의 구조를 Drag&Drop 방식으로 설정 할 수 있다. 또한 그림 B.4와 같이 노드에서 오른쪽 마우스 버튼을 클릭하면 출력되는 메뉴 중, Delete Node를 선택하면 선택된 노드가 삭제되고, Add Category를 선택하면 선택된 노드의 자식 노드가 추가되며, 노드가 아닌 부분에 오른쪽 마우스 버튼을 클릭하면 피해 기준 추가를 위한 Add Kill Type 메뉴와 모든 노드를 삭제하기 위한 Clear all 메뉴가 출력된다.



Fig. B.4 Components list and architecture setting

1945

# ④ 구성 요소 속성 설정부

3차원 구성 요소 모델과 결합된 구성 요소 속성 모델의 가중치, 이름(별칭), 구성 요소의 유형, 유형별 속성 등 설정하는 기능을 제공하며, 이러한 설정 화 면을 그림 B.5 ~ 그림 B.6에 나타냈다.





그림 B.5 구성 요소 속성 설정의 예 1

Fig. B.5 Property settings of component (Category/Normal component)





그림 B.6 구성 요소 속성 설정의 예 2

Fig. B.6 Property settings of component (Crew/Critical component)



### ⑤ 3차원 전투 시스템 모델 표시부

로드한 3차원 구성 요소 모델(.igs)의 좌표 정보를 기반으로 피격 확률 분석 시뮬레이션을 위한 구조 생성 및 표시해준다.

#### ⑥ 피격 확률 분석 결과 출력부

피격 확률 분석 시뮬레이션의 결과를 출력하는 부분으로, 설정된 위협의 정 보와 시뮬레이션의 종료 후 분석된 구성 요소별 피격 확률을 출력해준다.





# B.2 시뮬레이션 수행

# ① 위협 설정

Collection

3차원 구성 요소 모델을 로드한 후, 구조 및 속성을 설정한 후 피격 확률 분 석 시뮬레이션을 수행한다. 이를 위해서는 먼저, 메뉴의 Setting - Threat을 선택 하여 그림 B.7과 같이 위협 모델의 종류를 설정한다.



그림 B.7 위협 모델 설정 Fig. B.7 An example of threat model setting

### ② 피격 확률 분석 시뮬레이션

위협 모델의 설정 후, Simulation - Multiple Shot Scenario 1 (AFV)을 실행하면 그림 B.8와 같이 전차의 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션이 수행되고, 시뮬 레이션이 종료되면 B.9과 같은 영향 분석 결과와 B.10과 같은 구성 요소별 피 격 확률 분석 결과가 출력된다.



그림 B.8 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션 수행 Fig. B.8 Conducting the simulation for hit probability analysis











Fig. B.10 A result of hit probability analysis

### ③ 피해 기준별 상실 확률 분석

시뮬레이션 종료 후, Analysis - Kill Probability를 실행하면 그림 B.11과 같은 피해 기준별 상실 확률 분석을 위한 창이 출력되고, 그림 B.12 ~ 그림 B.14와 같이 노드에 오른쪽 마우스 버튼의 클릭 시 나타나는 Add와 Probability Mapping 기능을 이용하여 피해 기준별 FT를 편집하고 피격 확률을 결합할 수 있으며, 이러한 과정을 통해 B.16과 같은 결과를 얻을 수 있다.



그림 B.11 피해 기준별 상실 확률 분석 창 Fig. B.11 A module of kill probability analysis



A Editor(Kill Probability Analysis Program	m)	FTA Editor(Kill Probability Analysis Program)	FTA Editor(Kill Probability A
File		File	File
F-Kill   A-Kill   M-Kill   S-Kill   C	-Kill   K-Kill	F-Kill   A-Kill   M-Kill   S-Kill   C-Kill   K-Kill	F-Kill   A-Kill   M-K
Root		Root	Root
Add	Event		
Probability Mapping	Basic Event		
-		Select Gate	
		AND	C OR
		Apply	Cancel

그림 B.12 피해 기준별 상실 확률 분석 과정 1 Fig. B.12 A process of kill probability analysis (FT editing)

FTA Editor(Kill Probability Analysis Program)					B
File	Probability Mapping		<b>E</b>	Clear	Analysis
F-Kill A-Kill M-Kill S-Kill C-Kill K-	Component Name   antenna_left] antenna_right APS_left APS_right armor_bottom armor_bottom cannon Cater_left Coter_right commander driver electronic_device engine fire_control fuel_tank_left fuel_tank_left fuel_tank_left fuel_tank_left fuel_tank_left fuel_tank_left fuel_tank_left projectileBox1 projectileBox2 projectileBox3 scope smoke left	Front_Probability. 0,12546125 0,12546125 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,00738007 0,007380037 0,0359033 0,0359033 0,0359035 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,01845018 0,04428044 0,055904059 0,02583026	Side_Probability 0,04303279 0,04303279 0,0204918 0,0204918 0,53893443 0,15672131 0,07785885 0,12295082 0,57172131 0,455163933 0,45081967 0,02459016 0 0,0409836 0 0,0409836 0 0,0102459 0,0102459 0,0102459 0,0102459 0,0102459 0,0102459 0,0102459 0,0102459 0,01023508 0,01639344 0,01639344 0,01639344 0,01639344 0,01639344 0,01229508 0,012459		
Kill Front	smoke_right	0,05535055	0,0102459		Series1

그림 B.13 피해 기준별 상실 확률 분석 과정 2

Fig. B.13 A process of kill probability analysis (hit probability mapping)





Fig. B.14 A process of kill probability analysis (probability calculation)



그림 B.15 피해 기준별 상실 확률 분석 결과 Fig. B.15 A result of kill probability analysis



# ④ 구성 요소별 위험도 분석

메뉴의 Analysis - Criticality를 실행하면, 그림 B.16과 같이 구성 요소별 위험 도 분석을 위한 창이 출력된다. 그림 B.17과 같이 구성 요소별 위험도 분석 창 메뉴의 File - Open Importance, Open Hit Probability(front), Open Hit Probability(side)를 각각 선택하여 중요도와 전/측면 피격 확률이 저장되어 있는 파일을 로드하면, 그림 B.18과 같이 설정된 점수 기준이 적용된 위험도 계산 결과가 출력된다. 메뉴의 Rate - Importance와 Rate - Hit Probability를 이용하여 중요도와 피격 확률의 점수 기준을 변경할 수 있다.



그림 B.16 구성 요소별 위험도 분석 창 Fig. B.16 A module of criticality analysis for component



ile Rate				0,13
Open Importance Open Hit Probability(front) Open Hit Probability(side) Exit	Hit Rate Nar	Criticality Analysis File Rate Impo Importance Name Hit Probability	8 7 6 5 4	0,123 0,1 0,08 0,06 0,04 0,02
			3 2 1	0,01

그림 B.17 구성 요소별 위험도 분석 창의 메뉴 Fig. B.17 Functions of criticality analysis module

				100	A			
File Rate				NII ///	-F1.			Clea
Importance of Cor	nponent		Hit Probability(front)		SAN .	Hit Probability(side)		
Name	Importance	Rate	Name	HP(front)	Rate	Name	HP(side)	Rate
antenna_left	0,015	3	antenna_left.igs	0,12546125	8	antenna_left igs	0,04303279	5
antenna_right	0,015	3	antenna_right,igs	0,12546125	8	antenna_right,igs	0,04305279	5
APS_IET	0,02	4	APS_left,igs	0,00738007	4	APS_lettings	0.0204918	4
APS_right	0,02	4	APS_nynt, lys	0,00700007	4	APS_right, igs	0,0204310	4
armor_bollom	0.07		armor_bollonnings	0,42000421	3	armer top igo	0,00000440	0
Cater left	0.025		cappon ids	0.00738007	2	cannon ins	0.07786885	6
Cater_right	0.025	1	Cater left ins	0 10701107	8	Cater left ins	0.12295082	8
cannon	0.075	6	Cater right ins	0 10701107	8	Cater right igs	0.57172131	10
commander	0.04	Š	commander igs	0.63468635	ĬO	commander igs	0 73770492	10
driver	0.0625	6	driver.igs	0.063468635	6	driver.igs	0.73565574	10
electronic_device	0.03	4	electronic_device.iqs	0.11808118	8	electronic_device.iqs	0.02459016	4
engine	0,0625	6	engine,igs	0,13653137	8	engine,igs	0	1
fire_control	0,06	6	fire_control,igs	0,02214022	4	fire_control,igs	0,0409836	5
fuel_tank_left	0,0375	4	fuel_tank_left,igs	0,01845018	3	fuel_tank_left,igs	0	1
fuel_tank_right	0,0375	4	fuel_tank_right,igs	0,01845018	3	fuel_tank_right,igs	0	1
gunner	0,075	6	gunner,igs	0,63837638	10	gunner,igs	0,73770492	10
hatch1	0,0306	4	hatch1.igs	0.01476015	3	hatch1,igs	0,0102459	3
hatch2	0,0297	4	hatch2,igs	0.01845018	3	hatch2.igs	0.0102459	3
hatch3	0,0297	4	hatch3.igs	0.01845018	1	hatch3.igs	0,0102459	3
projectileBox1	0,0306	4	projectileBox1.igs	0,04428044	5	projectileBox1,igs	0.01000044	
projectileBox2	0,0297	4	projectileBox2.igs	0,04428044	2	projectileBox2,igs	0.01639344	3
projectileBox5	0,0297	4	projectileBox3,igs	0,05904059	2	projectileBox3,igs	0.010030344	3
scope smoke left	0.00	2	scope,igs	0.02303020	4	scope,igs	0.01223300	3
smoke_ielt	0.01	3	emoke right ige	0.05535055	5	smoke right ige	0.0102459	3
Shiokozhght	0,01	3	Shiokeingheiga	0,03333035	5	amokeingneiga	0,0102455	3
	m		1				m	
			1.					
Criticality(front) of	Component		Criticality(side) of Co	mponent		Criticality(average) o	of Component	
Name	Criticality	(front)	Name	Criticalit	tu(side)	Name	Criticality	(averane)
gupper	60	/(10110)	Cappop	60	()(0100)	dupper	60	(arorago)
armor bottom	54		driver	60		armor bottom	57	
commander	50		dupper	60		Cappop	54	
cannon	48		armor hottom	60		commander	50	
engine	48		commander	50		driver	48	
armor_top	48		armor_top	48		armor_top	48	
driver	36		Cater_right	32		Cater_right	32	
electronic_device	32		fire_control	30		fire_control	27	
Cater_right	32		Cater_left	24		engine	27	
fire_control	24		scope	18		electronic_device	24	
antenna_left	24		electronic_device	16		scope	21	
antenna_right	24		APS_left	16		antenna_right	19,5	
scope	24		APS_right	16		antenna_lett	19,5	
projectileBox2	20		antenna_right	15		projectileBox3	16	
projectileBox3	20		antenna_left	15		projectileBox2	16	
projectilebox i	20		projectileBox5	12		Cater_lett	10	
fuel took left	10		batch2	12		APS right	12	
hoteb1	12		hatch3	12		APS 16#	12	
fuel tank right	12		hatch1	12		hatch2	12	
hatch3	12		emoke left	9		hatch1	12	
hatch2	12		smoke right	q		projectileBoy1	12	
smoke left	ų,		engine	ĥ		hatch3	12	
Cater left	ă		projectileBox1	4		smoke left	9	
APS right	ă		fuel tank left	4		fuel tank left	ă	
APS_left	ē		fuel_tank_right	4		fuel_tank_right	8	
e	m		4		ь	4	m	

그림 B.18 구성 요소별 위험도 분석 결과 Fig. B.18 A result of criticality analysis