



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

FTA와 BBN을 이용한 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석 방법론

A Methodology for Hierarchical Reliability Analysis of Combat
Systems Using FTA and BBN



2019년 2월

한국해양대학교 대학원

컴퓨터공학과

강 지원

본 논문을 강지원의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 김재훈 (인)

위원 : 박휴찬 (인)

위원 : 이장세 (인)

2018년 12월 26일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	v
제 1 장 서론	1
제 2 장 관련 연구	4
2.1 FTA 기법	4
2.2 BBN	8
2.3 FTA 기법과 BBN의 비교	11
제 3 장 FTA와 BBN을 이용한 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석	13
3.1 계층적 신뢰성 분석 방법	13
3.2 하위 계층 : 구성 요소별 고장 확률 분석	16
3.3 상위 계층 : 기능 수준의 상실 확률 분석	18
제 4 장 사례 연구	27
4.1 분석 대상	27
4.2 신뢰성 분석	30
제 5 장 결론	44
참고문헌	45

List of Tables

Table 2.1 Gates of dynamic FTA	7
Table 2.2 Four structures of influence diagrams	8
Table 2.3 Features of FTA, Dynamic FTA, BBN	12
Table 4.1 Components of functions	27
Table 4.2 Threat categories and types of the combat system	28
Table 4.3 Components affected by threats	28
Table 4.4 Failure probability of components by threat on the front	29
Table 4.5 Definition of targets	29
Table 4.6 Formats of input data types for each files(.txt)	31
Table 4.7 Example of input data for each files(.txt)	32
Table 4.8 Failure probability of components	36
Table 4.9 Reliability of the armored fighting vehicle for communication function	43

List of Figures

Fig. 2.1 Flow chart of FTA	5
Fig. 2.2 Events and gates of FTA	5
Fig. 2.3 Equations of influence diagrams	11
Fig. 3.1 The proposed hierarchical reliability analysis of combat system	14
Fig. 3.2 Flow chart of the proposed method	15
Fig. 3.3 Structuring the failure of components taking into account the impact of the threat	16
Fig. 3.4 Probability mapping of components by threats	17
Fig. 3.5 Representation of function and components using BBN (converging)	19
Fig. 3.6 CPTs of Fig. 3.5 (converging)	20
Fig. 3.7 Representation of function and components using BBN (hybrid)	21
Fig. 3.8 CPTs of Fig. 3.7 (hybrid)	22
Fig. 3.9 Representation of function and components using BBN (serial)	23
Fig. 3.10 CPTs of Fig. 3.9 (serial)	23
Fig. 3.11 Representation of function and components using BBN (converging, diverging)	25
Fig. 3.12 CPTs of Fig. 3.11 (diverging)	26
Fig. 4.1 A 3D tank model	27
Fig. 4.2 User interface of the developed program	33
Fig. 4.3 FT for an antenna(left)	34
Fig. 4.4 FT for an antenna(right)	34
Fig. 4.5 Text file of FT of an antenna(left) and an antenna(right)	35

Fig. 4.6	A result of FT for an antenna(left)	36
Fig. 4.7	BBN for communication function	37
Fig. 4.8	CPTs for nodes of communication function	38
Fig. 4.9	Text file of BBN for communication function	39
Fig. 4.10	A result of BBN for communication function	40
Fig. 4.11	BBN for communication function including the dependent between an antenna and a electronic device	41
Fig. 4.12	CPT of a electronic device	41
Fig. 4.13	Text file of BBN for communication function including the dependent between an antenna and a electronic device	42
Fig. 4.14	A result of BBN for communication function including the dependent between an antenna and a electronic device	43



FTA와 BBN을 이용한 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석 방법론

강 지 원

한국해양대학교 대학원
컴퓨터공학과

Abstract

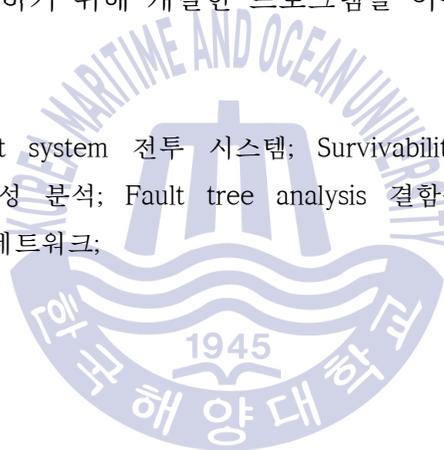
전투 시스템의 취약점을 분석하여 신뢰성을 높이기 위한 많은 연구가 있다. 전투 시스템의 신뢰성을 분석하기 위해서는 전투 시스템에 대한 다양한 위협 요인을 고려하여야 한다. 대부분의 전투 시스템 신뢰성 분석은 충돌에 관련된 위협을 토대로 신뢰성을 분석하였다. 하지만 충돌과 더불어 에너지, 충격, 진동 등의 다양한 위협이 존재한다. 최근 에너지, 충격, 진동 등의 각각의 위협에 대한 연구와 더불어 이러한 위협들을 동시에 고려해야할 필요성이 대두되었다. 하지만 다양한 위협을 동시에 고려하는 것에 대한 직접적인 방법은 연구되지 않았다. 이에 전투시스템의 신뢰성 분석을 위하여 충돌뿐만 아니라 에너지, 충격, 진동 등 다양한 위협을 동시에 고려하는 방법이 필요하다. 또한, 구성 요소 간의 의존적인 관계를 모두 표현할 수 있는 분석 기법을 이용하여 전투 시스템의 신뢰성을 분석하여야 한다.

본 논문에서는 각 요소의 특징들에 따라 FTA 기법과 BBN을 사용하여 계층

적으로 신뢰성을 분석하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 2개의 계층으로 구성되어 있다. 하위 계층에서는 FTA 기법을 이용하여 전투 시스템의 각 구성 요소의 고장 확률을 도출한다. 구성 요소의 고장 확률은 구성 요소가 가질 수 있는 다양한 위협을 동시에 고려하여 분석된다. 상위 계층에서는 하위 계층에서 도출된 구성 요소의 고장 확률을 기반으로 기능 수준(function-level)의 상실 확률을 분석하여 전투 시스템의 신뢰성을 분석한다. 이때 구성 요소들의 고장에 대한 종속적 관계를 고려하기 위하여 BBN을 이용한다.

이러한 방법의 효용성을 검증하기 위하여 대상 시스템을 정의하고 제안하는 방법을 이용하여 사례 연구를 진행한다. 사례 연구에서는 제안하는 분석 방법에 대한 계산을 자동화하기 위해 개발한 프로그램을 이용한다.

KEY WORDS: Combat system 전투 시스템; Survivability analysis 생존성 분석; Reliability analysis 신뢰성 분석; Fault tree analysis 결함수 해석; Bayesian belief network 베이지안 신뢰 네트워크;



A Methodology for Hierarchical Reliability Analysis of Combat Systems Using FTA and BBN

Kang, Ji Won

Department of Computer Engineering,
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

There are many studies to analyze the vulnerability of combat system to improve reliability. To analyze the reliability of a combat system, various threats affecting the combat system should be considered. Most reliability analysis of the combat system analyzed reliability based on impact-related threats. However, there are various threats such as energy, shock, and vibration as well as impact. Recently, it is necessary to simultaneously consider the threats, in addition to studying various threats such as fire, shock, and energy. However, no method of integrating the threats has been studied. In order to analyze the reliability of the combat system, it is necessary to take an integrated approach to energy, shock, vibration, and impact. In addition, the reliability of the combat system should be analyzed using reliability techniques that can express all of the dependency

relationships between components.

In this paper, we propose a method to analyze reliability using FTA and BBN hierarchically according to the features of each element. This method consists of two layers: a lower layer and an upper layer. In the lower layer, the failure probability of each component of the combat system is analyzed using the FTA. The failure probability of a component is analyzed considering the possible threats of the component. In the upper layer, the loss probability of function-level is analyzed based on the failure probability of the components derived from the lower layer. And the reliability of combat system is analyzed using loss probability of function. BBN is used to consider the dependence of the failure of components.

To verify utility of the proposed method, we defines the target system and analyzes reliability of the system through the case study. we uses a program developed to automate the calculation of the proposed analysis method.

KEY WORDS: Combat system 전투 시스템; Survivability analysis 생존성 분석; Reliability analysis 신뢰성 분석; Fault tree analysis 결함수 해석; Bayesian belief network 베이지안 신뢰 네트워크;

제 1 장 서 론

전투 시스템의 생존성을 높이기 위한 연구는 긴 시간 진행되어 왔다. 전투 시스템의 생존성은 적대적인 환경을 견디고 주어진 임무를 달성하는 과정에서 발생한 손상에 대하여 감내하는 척도이다[1]. 전투 시스템의 생존성을 높이기 위해서는 취약점을 분석하여 전투 시스템이 얼마나 신뢰할 수 있는지를 분석하는 신뢰성 분석이 요구된다. 신뢰성 분석에서 도출된 결과를 이용하여 성공적인 임무 수행 가능성을 평가하고 시스템의 구성 요소의 취약점을 보완하여 임무 완성도를 높이는 연구가 이루어지고 있다[2].

전투 시스템의 생존성 저하는 위협의 특성 및 영향 관계에 따른 전투 시스템의 구성 요소의 손상에서 발생한다. 구성 요소의 손상은 전투 시스템의 화력(firepower), 이동(mobility), 통신(communication), 탐지(sensor) 등의 특정 기능의 상실을 유발한다. 기능의 상실은 전투 시스템이 임무를 수행하는 능력에 영향을 미치며, 이는 전투 시스템의 생존성 저하에 직결된다[3]. 본 논문에서는 전투 시스템의 신뢰성을 ‘전투 시스템이 적대적인 위협환경에서 임무 수행에 관련된 특정 기능을 상실하지 않을 확률’로 정의하여 분석한다.

기존 연구에서는 대상 전투 시스템, 위협, 승무원 유무 등을 고려하며, 크게 정적, 동적으로 나누는 시간 요인에 따라 전투 시스템의 신뢰성을 분석하였다. 정적 분석은 피격 후의 변화 또는 장비의 노후화와 같은 내부 요인을 반영하지 않고 동적 분석은 이러한 요인을 반영한다[4]. 일반적으로 정적 분석 결과를 기반으로 피격 후 변화와 내부 요인을 반영하여 동적 분석을 진행하는 경우가 많기 때문에 정적 분석의 정확도가 중요하다[2,4,5].

전투 시스템의 정적 신뢰성 분석에서는 FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 많이 이용하며, FMECA(Failure Modes Effects and Criticality Analysis) 등과 같은

분석 기법도 이용하고 있다. [6]의 연구에서는 비행체의 취약도를 평가하기 위하여 비행체의 취약도에 영향을 미치는 부품을 FTA 기법을 이용하여 도출한 후, 취약면적을 이용해 분석한다. FTA, FMECA 기법을 이용한 전투 시스템의 신뢰성 분석 연구[2,6,7,8]는 구성 요소의 종속적 관계 표현에 대한 한계를 가진다. FTA 기법의 문제점을 해결하기 위해 BBN(Bayesian Belief Network)을 이용하여 소형무인항공시스템(SUAVs)에 대한 신뢰성을 분석한 바 있다[9]. [2,6,9]의 연구와 같은 대부분의 전투 시스템 신뢰성 분석은 위협을 고려하지 않는다. 이에 [3]의 연구에서는 충돌을 고려하여, FTA 기법과 FMECA 기법을 이용한 통합 신뢰성 분석 방법론을 제안하였다. 그러나 [3]의 연구에서는 고려되는 위협이 충돌로 제한되었으며, 다양한 위협에 대하여 동시에 고려하는 것이 필요하다. 다양한 위협을 동시에 고려하여 분석하는 것에 대한 필요성은 언급되었지만 방법은 제공되어 있지 않다[10]. 이에 따라 다양한 위협을 동시에 고려하며 구성 요소의 종속적 관계를 모두 고려한 전투 시스템의 신뢰성 분석 방법이 요구된다.

본 논문에서는 기존 연구의 문제점을 개선하기 위해 전통적인 FTA 기법과 BBN을 이용하여 전투 시스템의 신뢰성을 분석하는 계층적 방법론을 제안한다. 제안하는 전투 시스템의 신뢰성 분석 방법론은 하위, 상위의 2계층으로 구성된다. 하위 계층에서는 위협의 특징 및 위협과 구성 요소의 관계를 고려하기 위해 전통적인 FTA 기법을 이용하여 독립적으로 발생하는 다양한 위협을 동시에 고려한 구성 요소의 고장 확률을 분석한다. 상위 계층에서는 분석할 기능과 관련된 구성 요소들간의 상호 관계를 표현하기 위해 BBN을 활용하며 임무 수행을 위한 기능과 관련된 구성 요소간의 의존 관계를 고려하여 기능 수준의 신뢰성 분석을 수행한다.

분석은 크게 3단계의 분석 과정으로 구분된다. 먼저, 대상 및 분석할 기능에 대한 파악 단계이다. 대상 전투 시스템과 분석할 기능을 선정하며 분석할 기능과 관련된 구성 요소를 파악한 후, 구성 요소에 영향을 주는 위협을 파악한다. 전자는 상위 계층의 입력 정보가 되며, 후자는 하위 계층의 입력 정보가 된다. 다음 단계로 하위 계층에서는 FTA 기법을 이용하여 구성 요소의 고장 확률을

분석한다. 마지막 단계에서는 하위 계층에서 도출된 구성 요소의 고장 확률을 이용하여 BBN을 활용한 기능의 상실 확률을 도출하며, 이를 통해 전투 시스템의 신뢰성을 분석한다.

제안한 방법의 효용성을 검증하기 위해 [3,7,8]에서 개발한 시스템의 분석 결과를 활용한다. [3,7,8]에서 개발한 시스템은 위협의 종류인 충돌을 고려하기 위해 3차원 CAD를 기반으로 전차의 구성 요소를 모델링하였으며, 다중 관통선을 기반으로 구성 요소의 피격 확률 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 분석된 구성 요소의 피격 확률을 충돌에 대한 구성 요소의 고장 확률로 이용하며 다른 요인에 대해서는 임의의 값을 설정하여 진행한다. 또한, 제안하는 분석 방법의 계산을 자동화하기 위하여 개발한 프로그램을 이용하여 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 관련 연구로서 본 논문에서 적용되는 FTA 기법과 BBN을 설명하고, 3장에서는 FTA 기법과 BBN을 이용한 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석 방법론을 제안한다. 그리고 4장에서는 사례 연구로서 분석 대상 시스템을 정의하고 제안하는 전투 시스템의 신뢰성 분석 방법론을 이용하여 분석을 수행하고 유용성을 검증한다. 5장에서 결론 및 향후 연구로 끝을 맺는다.

제 2 장 관련 연구

신뢰성은 정해진 기능을 성공적으로 수행하는 능력 또는 확률을 말한다. 신규설계에는 문제점이 존재할 수 있으며, 존재하는 문제점을 도출하고 미치는 영향을 정성적, 정량적으로 평가 검토하여 고장을 미연에 방지하거나 개선하여야 한다. 이에 따라 다양한 산업 분야에서는 생산되는 제품 또는 시스템에 대하여 의도하는 기능을 조건과 기간에 따라 얼마나 잘 수행하는 지에 대한 신뢰성 분석을 수행한다[11].

대표적인 신뢰성 분석 기법은 FTA, RBD, FMECA, BBN 등의 기법이 있다 [9,12-14]. 본 논문에서는 위협에 따른 전투 시스템의 각 구성 요소의 고장 확률과 구성 요소의 의존적인 관계에 따른 기능의 상실 확률을 도출하기 위해 FTA 기법과 BBN을 이용하여 전투 시스템의 신뢰성 분석을 수행한다.

2.1 FTA 기법

FTA 기법은 정상사상(top event)이라 부르는 어떤 고장의 원인을 파악하여 신뢰성을 분석한다. 사고 또는 사건을 초래할 수 있는 고장에 대하여 다양한 조합을 표시하는 모델인 FT(Fault Tree)를 구성하여 분석한다. FT는 기본적으로 사상(event)과 게이트(gate)로 구성된다. 사상은 크게 기본사상(basic event), 중간사상(intermediate event), 정상사상으로 나뉘며, 현상을 나타낸다. Fig. 2.1은 FTA 기법을 사용하여 신뢰성을 분석하는 순서도이다. 먼저, 정상사상을 정의하고 대상 시스템을 분석하여 그에 대한 FT를 작성한다. 작성된 FT의 신뢰도를 분석하여 결과를 평가하게 된다.

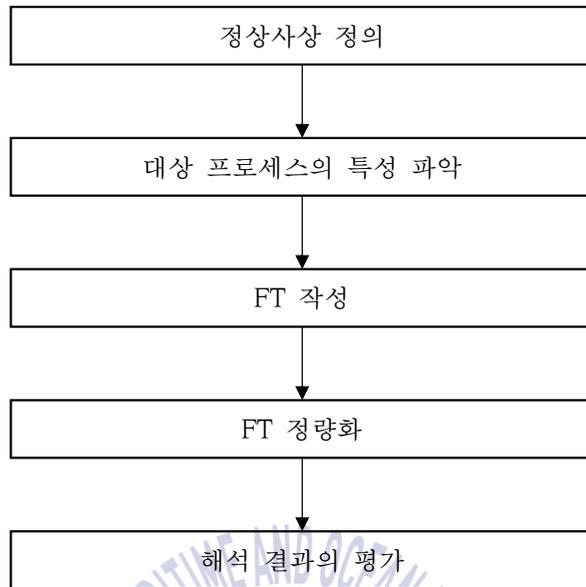


Fig. 2.1 Flow chart of FTA

전통적인 FT은 논리합(OR)이나 논리곱(AND)의 간단한 논리 게이트를 이용하여 표현된다. Fig. 2.2는 전통적인 FTA 기법에서 사용하는 사상과 논리 게이트의 기호를 보여준다[3]. OR 게이트는 입력 사상 중 어느 하나라도 존재할 때 출력 사상이 발생하며 AND 게이트는 입력 사상이 모두 존재할 때 출력 사상이 발생한다.

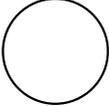
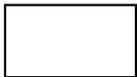
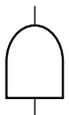
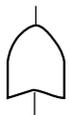
사상 기호		게이트 기호	
			
기본사상	중간/정상사상	AND	OR

Fig. 2.2 Events and gates of FTA

전통적인 FTA 기법의 경우, 부울 대수(Boolean Algebra)를 이용하여 FT의 정상사상이나 중간사상 등의 고장발생확률을 계산한다. 식 (2.1)은 부울 대수를 이용한 AND 게이트의 계산식이며 식 (2.2)는 OR 게이트에 대한 계산식을 나타낸다. P_{fault} 는 정상사상의 고장 확률이며 P_{EF} 는 정상사상 또는 중간사상의 하위 사상들의 고장 확률이다[3,7,15,16].

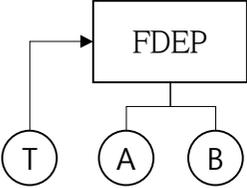
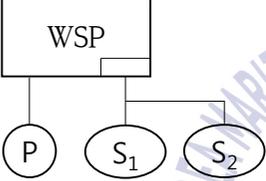
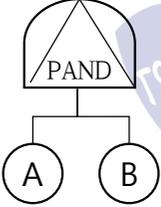
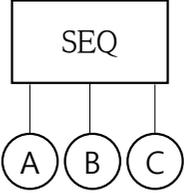
$$P_{fault} = \prod_{i=1}^n P_{EF_i} \quad (2.1)$$

$$P_{fault} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{EF_i}) \quad (2.2)$$

전통적인 FTA 기법을 이용하여 신뢰성 분석을 진행하게 되면 순차적 처리, 타이밍, 상호 의존 관계 등의 요소를 고려하기 어렵다[7,17]. 전통적인 FTA 기법의 문제점을 해결하기 위한 다이내믹 FTA(Dynamic Fault Tree Analysis) 기법에서는 사고 발생순서나 상호 의존 관계를 고려하기 위한 게이트를 추가로 사용한다. Table 2.1은 다이내믹 FTA 기법에서 사용하는 게이트의 예시 및 설명을 보여준다[17].

다이내믹 FTA 기법의 경우, 다양한 게이트를 사용하기 때문에 부울 대수만으로는 신뢰도를 계산할 수 없다. 다이내믹 FT의 신뢰도는 마코프 체인(Markov chain), BN(Bayesian network) 등을 이용하여 계산한다. 마코프 체인을 이용한 방법은 사상을 추가하는 것에 대한 용이성과 확장성을 제공하지만 기존의 FT를 이용하여 계산할 수 없다. 추가적으로 마코프 체인을 생성하는 것이 요구되며, 고장 원인의 수가 증가함에 따라 마코프 체인을 구성하는 상태는 기하급수적으로 증가하는 문제점이 있다[18].

Table 2.1 Gates of dynamic FTA

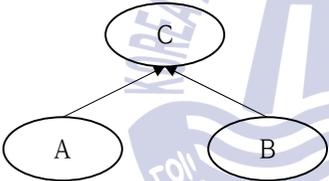
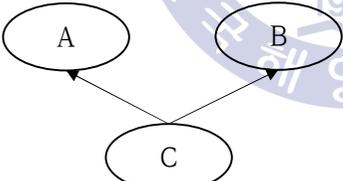
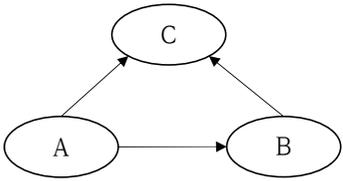
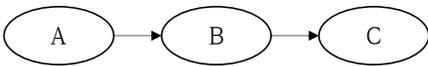
기호	내용
	<p>(Functional-Dependency Gate) 트리거(trigger) 1개와 기본사상의 입력을 가진다. 트리거가 발생하면, 모든 기본사상이 강제로 발생한다.</p>
	<p>(Spare Gate) 하나의 우선(1차) 입력 및 다수의 예비 입력을 가진다. 모든 입력이 들어왔을 때 일어난다.</p>
	<p>(Priority AND Gate) 두 개의 입력을 가진다. 이 게이트는 입력이 순서대로 들어왔을 때 일어난다. 발생순서는 왼쪽에서 오른쪽이다.</p>
	<p>(Sequence-Enforcing Gate) 입력이 특정 순서로 들어왔을 때 일어난다. 발생순서는 왼쪽에서 오른쪽이다. 반드시 왼쪽의 입력이 들어와야만 출력이 발생한다.</p>

2.2 BBN

BBN은 베이저안 네트워크(Bayesian network), 믿음 네트워크 (belief network), 인과 네트워크(causal network)라고도 하며, 임의의 변수와 변수들의 관계에 대하여 확률적 모델로 표현한다. BBN 모델의 노드는 각 변수를 나타내며 노드를 연결하는 호(arc)는 변수 간의 조건부 의존성(conditional dependency)을 표현한다. 노드는 측정된 값, 잠재 변수, 가설 등의 다양한 요소를 나타낸다.

BBN은 Table 2.2와 같이 영향 다이어그램(influence diagram)을 이용하여 각 변수 간의 관계를 도식화한다.

Table 2.2 Four structures of influence diagrams

구조	내용
 <pre> graph BT A((A)) --> C((C)) B((B)) --> C((C)) </pre>	(Converging) A와 B가 서로 독립이다. C는 A와 B에게 영향을 받는다.
 <pre> graph BT C((C)) --> A((A)) C((C)) --> B((B)) </pre>	(Diverging) A와 B가 서로 독립이다. C는 A와 B에게 영향을 준다.
 <pre> graph BT A((A)) --> B((B)) A((A)) --> C((C)) B((B)) --> C((C)) </pre>	(Hybrid) C는 B에게, B는 A에게 영향을 받는다. A는 C에게 영향을 준다.
 <pre> graph LR A((A)) --> B((B)) B((B)) --> C((C)) </pre>	(Serial) A와 C는 독립이다. C는 B에게, B는 A에게 영향을 받는다.

영향 다이어그램은 수렴형(converging), 발산형(diverging), 혼합형(hybrid) 그리고 연속형(serial)이라는 네 가지 기본구조를 가진다. 이러한 형태로 각 변수 간의 관계가 표현되면 그에 따른 확률 계산은 베이즈 정리(Bayes theorem)를 이용한다[9,19,20].

조건부 확률(conditional probability)은 확률공간에 A, B라는 사건이 있을 때, “A 사건이 발생했을 때, B 사건이 일어날 확률 혹은 B 사건이 발생했을 때, A 사건이 일어날 확률”을 말한다. 확률공간의 두 사건 A, B에 대하여 $P(B) > 0$ 의 조건으로, B가 일어났을 때, A의 조건부 확률을 “ $P(A | B)$ ”라 표현한다. 베이즈 정리는 조건부 확률의 정의로부터 유도되며 사전 확률(prior probability), 우도 확률(likelihood probability), 사후 확률(posterior probability)의 개념을 포함한다. 먼저, 사전 확률은 이미 알고 있는 사건의 확률이며 우도 확률은 이미 알고 있는 사건이 발생했다는 조건 아래의 다른 사건이 발생할 확률이다. 그리고 사후 확률은 사전 확률과 우도 확률을 통해 알게 되는 조건부 확률을 의미한다. 즉, 베이즈 정리는 전체에 대해 어떤 n개의 사건들의 집합이 구성되어 있어야 하며, 이 사건들이 일어날 수 있는 확률(사전 확률)과 이러한 어떤 사건이 일어났을 때, 다른 사건이 발생할 조건부 확률(우도 확률)이 필요하다. 이를 통해 다른 사건이 발생했을 때 어떤 사건이 일어날 확률(사후 확률)을 도출한다. 베이즈 정리에 대하여 표본공간 S를 분할하는 n개의 사건들의 집합중 하나의 사건이 B_i 이고, 사건 A가 표본공간 S의 임의의 사건이라면, 식 (2.3)으로 표현한다. 식 (2.3)의 두 번째 식은 분자에 확률의 곱셈정리를 이용하여 얻어진다. $P(A)$ 는 사건 A의 사전 확률이며, $P(A | B_i)$ 는 사건 B_i 가 주어졌을 때 A의 조건부 확률이다. $P(B_i | A)$ 는 사후 확률이며, 사건 A가 일어났을 때, 그것이 사건 B_i 로부터 일어난 것이라고 생각되는 조건부 확률이다[19,21].

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i \cap A)}{P(A)} = \frac{P(B_i)P(A | B_i)}{P(A)} \quad (2.3)$$

BBN에 대한 추론과정에서 결합 확률(joint probability)과 조건부 확률을 이용한다. 특정 X 라는 시스템의 변수 X_1, \dots, X_n 에 대하여 변수 X_i 의 부모가 $parents(X_i)$ 라고 할 때, 변수 X_1, \dots, X_n 에 대한 결합 분포(joint distribution)는 식 (2.4)과 같다 [22].

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | parents(X_i)) \quad (2.4)$$

각 노드에 대하여 조건부 확률 분포(conditional probability distribution)에 대한 CPT(Conditional Probability Table)를 생성한다. 식 (2.4)와 생성된 CPT를 이용하여 BBN을 분석한다.

Fig. 2.3은 Table 2.2의 네 가지 구조에 대한 확률을 구하는 수식이다. 수식은 기본적으로 각 노드가 일어날 확률의 결합 확률이다. 노드 A, B, C가 있을 경우, 사후 확률은 각각의 곱으로 나타낼 수 있다. Fig. 2.3의 경우, 서로에 영향을 주는 관계에 대하여 영향을 주는 노드를 조건부 확률로 표현한 후 결합 확률로 표현한다[9,21,22]. 노드 A, B가 독립일 때, $P(A, B)$ 는 $P(A)P(B)$ 로 표현되며, 노드 A, B가 조건부 독립(conditionally independent)일 때, $P(A, B | C)$ 는 $P(A | C)P(B | C)$ 로, $P(A | C, B)$ 는 $P(A | C)$ 로 표현된다.

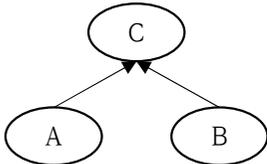
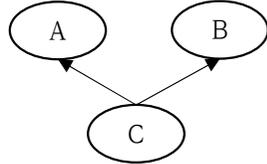
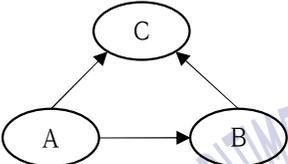
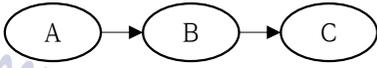
<p>(a) converging</p> 	<p>(b) diverging</p> 
$P(A, B, C) = P(C A, B)P(B)P(A)$	$P(A, B, C) = P(A C)P(B C)P(C)$
<p>(c) hybrid</p> 	<p>(d) serial</p> 
$P(A, B, C) = \begin{cases} P(B, C A)P(A) \\ P(C B, A)P(B A)P(A) \end{cases}$	$P(A, B, C) = \begin{cases} P(C B)P(B, A) \\ P(C B)P(B A)P(A) \end{cases}$

Fig. 2.3 Equations of influence diagrams

2.3 FTA 기법과 BBN의 비교

Table 2.3은 FTA, 다이내믹 FTA, 그리고 BBN이 가지는 특징을 나타낸다. FTA 기법의 경우, 각 구성 요소와 상위의 구성 요소 또는 기능과의 관계를 “AND” 또는 “OR” 중의 논리 게이트로 표현하여 결정과 계산이 간단하다. 또한, 각 요소의 고장이 독립적으로 발생한다고 가정하며 순차적인 요소를 고려할 수 없다. 다이내믹 FTA 기법에서는 논리 게이트뿐만 아니라 본 논문 2.1 절의 다양한 게이트를 통해 종속적이고 순차적인 요소에 대하여 FT로 표현할 수 있다. 그러나 많은 요인들이 고려되면 게이트가 다양화되어 FT가 복잡하다. 다이내믹 FTA는 정량적으로 분석하는 방법을 제공하지 않는다. 정량적으로 분석하기 위하여 마코프 체인, BN 등을 이용한다. BBN은 영향 모델을 만들고 정

량적으로 분석할 수 있는 방법을 제공한다. 모델을 만들 때, 영향 다이어그램을 사용하기 때문에 복잡한 종속적인 관계를 표현하기 쉽다[9]. 수식이 복잡하여 계산이 어렵지만 수식에 대한 개선 연구가 많아 특별한 상황에서는 빠른 연산이 가능하다[21]. 하지만 BBN을 이용하기 위해서는 사전, 우도 그리고 사후 확률의 정보가 필요하다. 본 논문에서는 각 요소들의 특징과 한계점을 고려하여 FTA 기법과 BBN을 계층적으로 적용한다.

Table 2.3 Features of FTA, Dynamic FTA, BBN

신뢰성 분석 기법	특징	
FTA	장점	<ul style="list-style-type: none"> 논리 게이트 사용 ✓ 간단한 결정 및 계산
	단점	<ul style="list-style-type: none"> 각 요소의 고장이 독립적임을 가정 순차적 고려 못함
다이나믹 FTA	장점	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 게이트 사용 ✓ 순차적, 종속적인 요소 고려
	단점	<ul style="list-style-type: none"> 복잡한 표현 정량적으로 분석하기 위해선 마코프 체인, BN등을 이용
BBN	장점	<ul style="list-style-type: none"> 수많은 인과 관계를 허용 ✓ 종속적인 요소 고려 ✓ 단순한 표현
	단점	<ul style="list-style-type: none"> CPT 필요 복잡한 계산 ✓ 상황에 따라 계산 개선을 위한 연구가 존재

제 3 장 FTA와 BBN을 이용한 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석

3.1 계층적 신뢰성 분석 방법

Fig. 3.1은 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석 방법의 개념도를 나타낸다. 크게 하위 계층과 상위 계층으로 나뉘며, 전투 시스템의 정적 신뢰성 분석 방법을 제안한다. 위협의 분류에 따른 각 위협에 대한 구성 요소의 고장은 독립적으로 발생한다고 가정할 수 있으며 위협의 발생순서는 알 수 없다. 신뢰성 분석 기법의 한 종류인 전통적인 FTA 기법은 계산과 게이트 선택이 간단하며 요소가 독립적으로 발생한다는 것을 가정하여야 하고 순차적인 것을 고려하지 못하는 특징을 가진다. 이에 전통적인 FTA 기법을 이용하여 구성 요소별 고장 확률을 분석한다. 상위 계층에서는 전투 시스템 구성 요소의 고장을 기반으로 기능 수준의 상실 확률 분석을 수행한다. 전투 시스템의 구성 요소는 위협과 비교하여 그 가짓수가 전투 시스템의 복잡도에 비례한다. 구성 요소들은 서로 종속적인 관계를 가질 수 있다. 예를 들어, 연료 탱크의 고장은 엔진의 고장과 연관될 수 있다. BBN은 수많은 인과 관계를 허용하며 다이내믹 FTA 기법과 비교하여 표현이 단순하다. 이에 따라 상위 계층에서는 BBN을 활용하여 신뢰성을 분석한다.

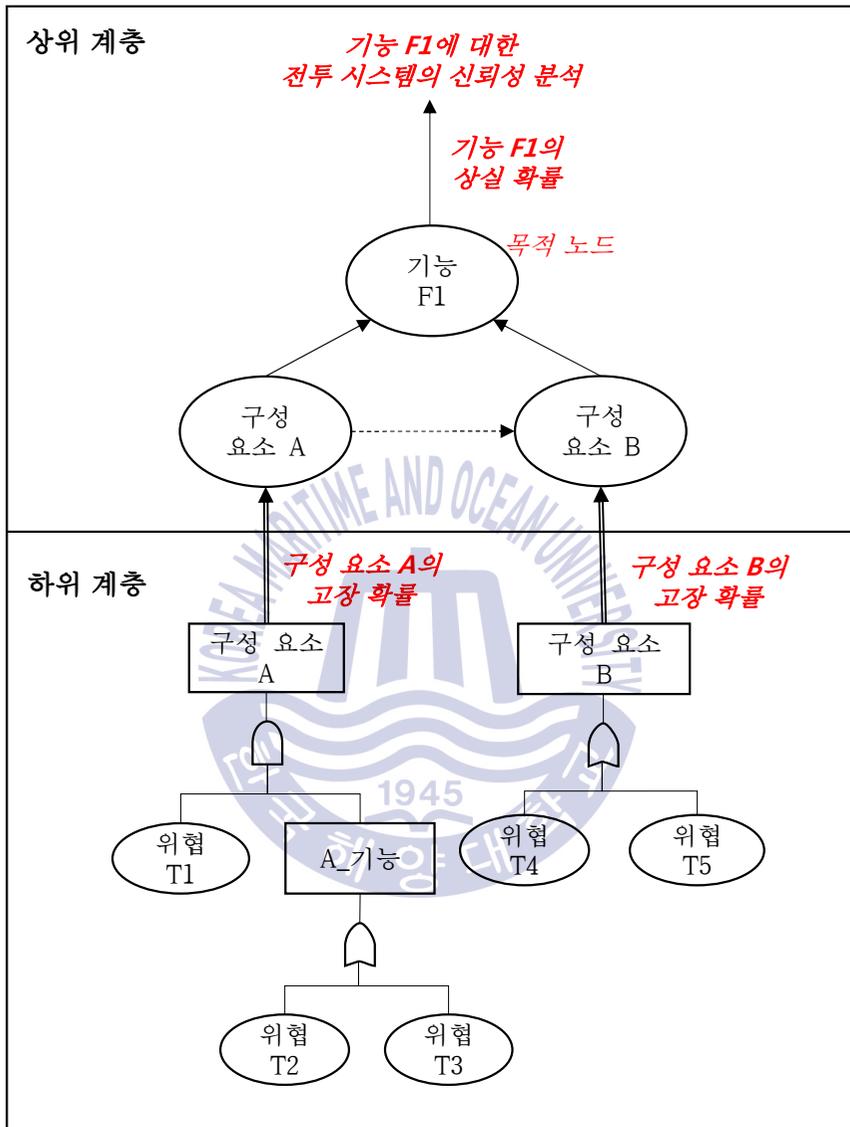


Fig. 3.1 The proposed hierarchical reliability analysis of combat system

Fig. 3.2는 제안하는 방법의 흐름도이다. 먼저, 대상 및 분석할 기능을 선정한다. 분석할 기능과 관련된 구성 요소를 파악한 후, 구성 요소에 영향을 주는 위협을 파악한다. 구성 요소와 위협의 관계에 대하여 논리 게이트를 이용하여 FT로 구성하며 구조화한다. 각 위협에 대한 구성 요소의 고장 확률 부여하여 논리 게이트 연산을 통해 구성 요소의 고장 확률을 도출한다. 구성 요소에 대한 BBN을 구성하고 하위 계층에서 도출된 구성 요소별 고장 확률을 이용하여 CPT를 작성한다. 이를 통해 분석 대상 기능의 상실 확률을 도출하며, 도출된 상실 확률을 이용하여 최종적으로 전투 시스템의 신뢰성을 분석한다.

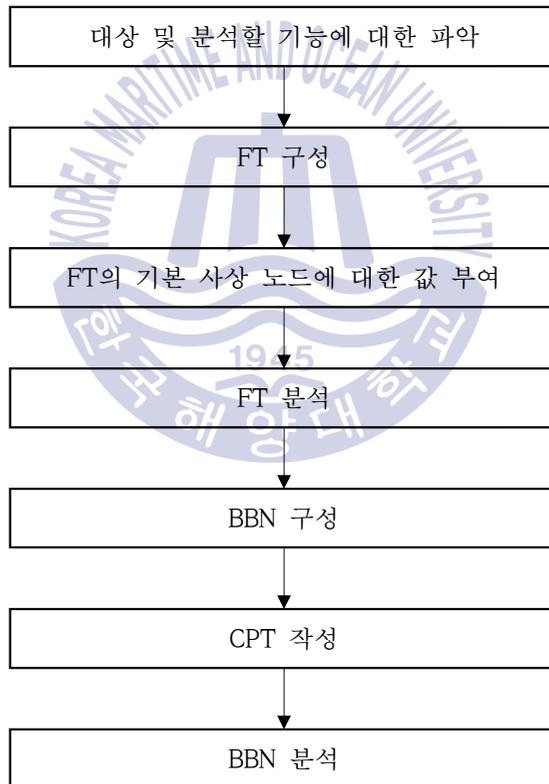


Fig. 3.2 Flow chart of the proposed method

3.2 하위 계층 : 구성 요소별 고장 확률 분석

본 논문에서 제안하는 FT의 정상사상은 전투 시스템 구성 요소의 고장을 의미한다. 기본사상은 정상사상에 영향을 주는 위협이며, 중간사상은 위협에 의해 유발되는 취약점이나 구성 요소의 주요한 기능을 표현한다. FT를 구성하기 위해서 구성 요소 A의 고장에 관련된 위협을 열거하고 그에 대한 관계를 파악하여 논리 게이트로 표현한다. 관련 사상들에 대하여 모든 사상이 일어나야 영향을 주는 경우에는 AND 게이트를 개별 사상에 대하여 영향이 발생하는 경우에는 OR 게이트를 이용하여 표현한다. Fig. 3.3은 위협을 고려한 구성 요소의 고장에 대한 FT 구성의 예를 보여준다. 구성 요소 A의 고장에 대한 위협(T1,T2)과 구성 요소 B의 고장에 대한 위협(T3,T4)을 FT의 기본사상이라고 하며 이 위협에 대한 구성 요소의 고장 확률이 필요하다. Fig. 3.3의 (a)는 구성 요소 A에 대한 FT로 위협 T1, T2가 모두 일어나야 영향이 발생한다면 AND 게이트로 나타낸다. Fig. 3.3의 (b)는 구성 요소 B에 대한 FT로 위협 T3, T4는 두 위협의 개별 발생에 대하여 영향이 발생한다면 OR 게이트로 나타낸다.

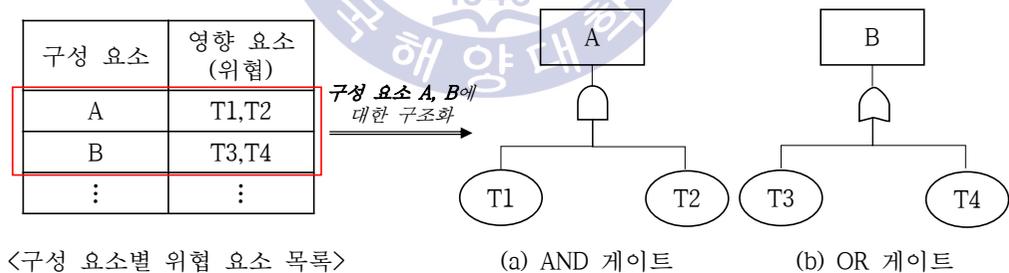


Fig. 3.3 Structuring the failure of components taking into account the impact of the threat

제안된 FT 모델과 위협에 따른 구성 요소의 고장 확률을 이용하여 구성 요소별 고장 확률을 분석한다. 정상 및 중간사상의 확률을 계산하는 방식은 ‘AND’ 와 ‘OR’ 일 경우 달라지며 식 (3.1) 및 식 (3.2)과 같다.

P_{Fault} 는 구성요소의 고장 확률을 의미하며, P_{Ti} 는 위협 i 에 대한 해당 구성 요소의 고장 확률을 의미한다. n 은 동일한 레벨에 속하는 위협의 수이다.

$$P_{Fault} = \prod_{i=1}^n P_{Ti} \quad (AND \text{ gate}) \quad (3.1)$$

$$P_{Fault} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{Ti}) \quad (OR \text{ gate}) \quad (3.2)$$

Fig. 3.4에서는 Fig. 3.3에서 만들어진 FT에 대하여 임의의 고장 확률을 부여하였다.

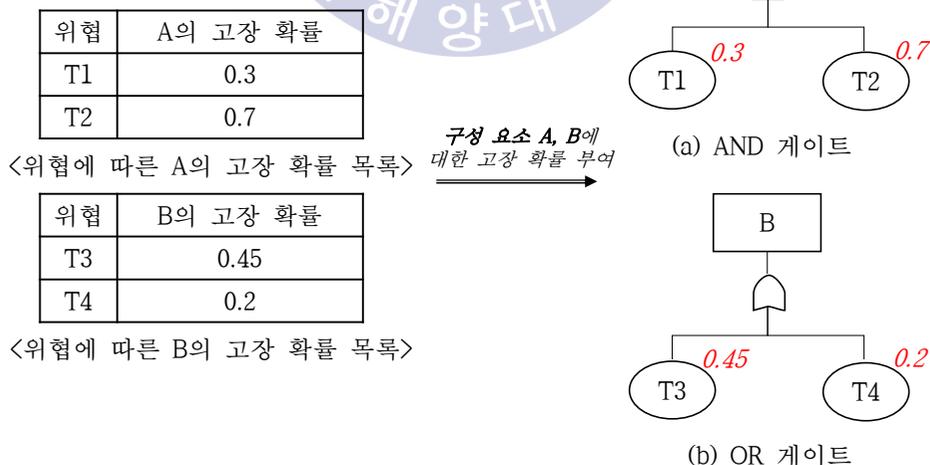


Fig. 3.4 Probability mapping of components by threats

Fig. 3.4의 (a)에서 AND 게이트에 대한 계산은 식 (3.1)을 Fig. 3.4의 (b)에서 OR 게이트에 대한 계산은 식 (3.2)를 적용하여 구성 요소 A, B의 고장 확률을 도출할 수 있다. 위협 T1과 T2에 대한 구성 요소 A의 고장 확률은 ‘ $0.3 \times 0.7 = 0.21$ ’이며 구성 요소 B의 고장 확률은 위협 T3과 T4에 의해 ‘ $1 - ((1 - 0.45) \times (1 - 0.2)) = 0.56$ ’이다. 이러한 방법으로 도출된 구성 요소별 고장 확률은 상위 계층에서 BBN에 적용하여 기능 수준의 상실 확률을 분석하기 위해 활용된다.

3.3 상위 계층 : 기능 수준의 상실 확률 분석

제안하는 BBN의 노드는 전투 시스템의 구성 요소의 고장이며 호는 기능 또는 구성 요소의 관계를 나타낸다. 영향을 받는 노드를 자식 노드라고 하며, 영향을 주는 노드를 부모 노드라고 한다. 호는 실선 화살표와 점선 화살표로 나뉘며, 실선 화살표는 자식 노드와 부모 노드간의 영향 관계의 방향성을 나타낸다. 영향을 주고받는 노드들 사이에 다른 노드가 존재하거나 같은 자식을 가질 경우, 점선 화살표를 이용하여 영향 관계를 표현한다. BBN은 분석할 기능과 관련된 구성 요소의 관계에 대하여 수렴형, 발산형, 혼합형, 그리고 연속형의 구조로 표현하며, 이 과정에서 노드가 추가될 수 있다. 구성된 BBN은 여러 노드들 중에 하나의 목적 노드를 가지며 전투 시스템의 기능의 상실을 의미하고 이를 분석한다.

기능의 상실 확률을 계산하기 위하여 하위 계층에서 분석한 전투 시스템의 구성 요소별 고장 확률과 부모 노드가 자식 노드에게 영향을 주는 조건부 확률이 필요하다. 이를 통해 CPT를 작성하며, T(true)는 고장 또는 상실을 의미한다. 기능의 상실 확률을 계산하는 식은 식 (3.3)과 같으며 F_{Loss} 은 기능의 상실(고장)을 나타내며, CF_i 는 구성 요소 i의 고장 확률을 나타낸다. n은 기능에 영향을 주는 구성 요소 노드의 수를 말한다[35]. $P(F_{Loss}=T, CF_1, \dots; CF_n)$ 는 구조에 대한 수식으로 표현된다. 구조에 대한 수식은 영향을 주는 노드를 조건부 확률로 표현한 후 결합 확률로 표현한다.

$$P(F_{Loss} = T) = \sum_{CF_1, \dots, CF_n \in T, F}^n P(F_{Loss} = T, CF_1, \dots, CF_n) \quad (3.3)$$

본 논문에서는 전투 시스템의 신뢰성을 임무 수행에 관련된 특정 기능을 상실하지 않은 확률로 정의하였으며 전투 시스템의 신뢰성을 분석하는 식은 식 (3.4)과 같다. P_R 은 전투 시스템의 신뢰성을 의미하며, P_F 는 특정 기능의 상실 확률이다. BBN의 분석 결과로 도출된 기능의 상실 확률이 이용된다.

$$P_R = 1 - P_F \quad (3.4)$$

임의의 값을 통한 예시를 통해 각각의 구조에 대한 BBN 표현, 확률을 도출하기 위한 수식, CPT, 분석 결과를 설명하며 다음과 같다.

Fig. 3.5는 수렴형 구조를 나타내며 구성 요소 A와 B는 기능 F1에 영향을 미치며 서로 독립적이다.

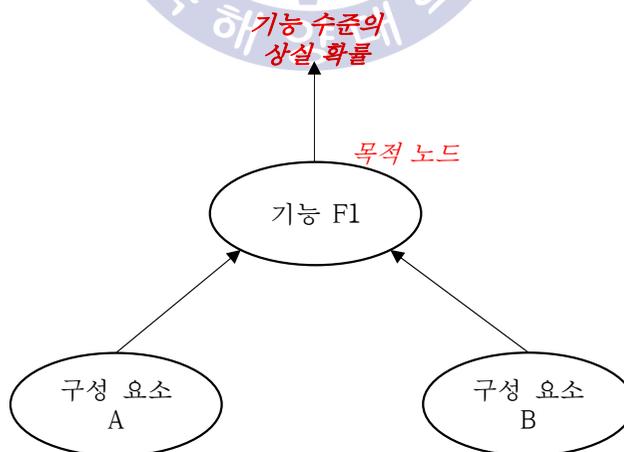


Fig. 3.5 Representation of function and components using BBN (converging)

Fig. 3.6은 임의의 값을 설정하여 Fig. 3.5에 대한 CPT를 나타낸 것이다. 구성 요소 A, B의 고장 확률과 구성 요소 A, B에 대한 기능 F1의 조건부 상실 확률이 필요하다. 구성 요소 A의 고장 확률이 0.3이고 구성 요소 B의 고장 확률이 0.5이다. 구성 요소 A, B의 고장이 발생했을 때, 기능 F1의 상실 확률이 1이며, 구성 요소 A, B가 모두 정상일 때 기능 F1의 상실 확률은 0.05이다. 구성 요소 A가 고장이고 구성 요소 B가 정상일 때 또는 구성 요소 A가 정상이고 구성 요소 B가 고장일 때 기능 F1의 상실 확률은 0.1이다.

구성 요소 A		기능 F1			
T	F	A	B	T	F
0.3	0.7	F	F	0.05	0.95
구성 요소 B		F	T	0.1	0.9
T	F	T	F	0.1	0.9
0.5	0.5	T	T	1	0

Fig. 3.6 CPTs of Fig. 3.5 (converging)

식 (3.5)는 식 (3.3)을 이용한 Fig. 3.5에 대한 계산 결과이며 구성 요소 A와 구성 요소 B의 고장이 서로 독립적일 경우 기능 F1의 상실 확률은 0.2175이다. 기능 F1에 대한 전투 시스템의 신뢰성은 식 (3.4)를 이용하여 구하며 ‘1 - 0.2175(기능 F1의 상실 확률) = 0.7825’ 이다.

$$\begin{aligned}
P(F1 = T) &= \sum_{A, B \in T, F} P(F1 = T, A, B) & (3.5) \\
&= \sum_{A, B \in T, F} P(F1|A, B)P(A)P(B) \\
&= P(F1 = T, A = T, B = T) + P(F1 = T, A = T, B = F) \\
&\quad + P(F1 = T, A = F, B = T) + P(F1 = T, A = F, B = F) \\
&= (1 \times 0.3 \times 0.5) + (0.1 \times 0.3 \times 0.5) + (0.1 \times 0.7 \times 0.5) + (0.05 \times 0.7 \times 0.5) \\
&= 0.15 + 0.015 + 0.035 + 0.0175 = 0.2175
\end{aligned}$$

Fig. 3.5와 같은 구조에서 만약 구성 요소 A가 구성 요소 B의 고장에 영향을 준다면 혼합형 구조를 가지는 Fig. 3.7과 같다.

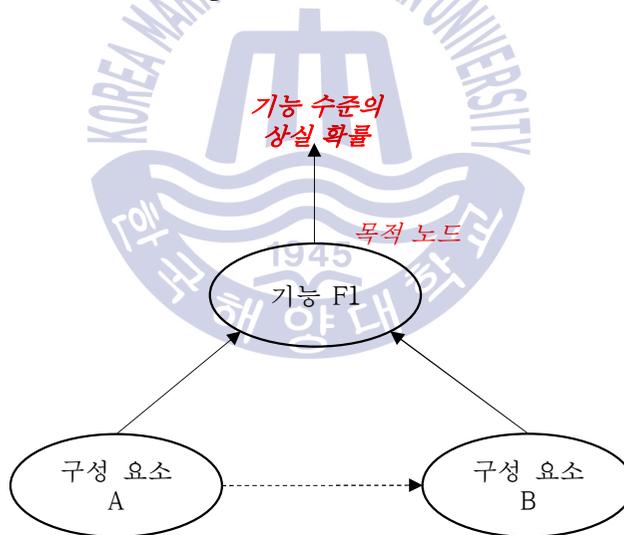


Fig. 3.7 Representation of function and components using BBN (hybrid)

Fig. 3.8은 Fig. 3.7에 대한 CPT로서 구성 요소 A, B와 기능 F1에 대한 CPT는 Fig. 3.6의 CPT와 동일하게 작성하였으며. 추가적으로 구성 요소 A에 대한 구성 요소 B의 조건부 확률을 정의한다. 구성 요소 A가 고장 날 경우, 구성 요소

B의 고장 확률(0.8)이 높아짐으로 표현하였다.

구성 요소 A			기능 F1			
T	F		A	B	T	F
0.3	0.7		F	F	0.05	0.95
구성 요소 B			F	T	0.1	0.9
A	T	F	T	F	0.1	0.9
T	0.8	0.2	T	T	1	0
F	0.5	0.5				

Fig. 3.8 CPTs of Fig. 3.7 (hybrid)

Fig. 3.7과 같이 구성 요소 A의 고장에 의해 구성 요소 B의 고장이 영향을 받는 경우, 기능 F1의 상실 확률은 식 (3.6)에 의해 0.2985이다. 기능 F1에 대한 전투 시스템의 신뢰성은 ‘1 - 0.2985(기능 F1의 상실 확률) = 0.7015’ 이다. 구성 요소 A와 구성 요소 B의 고장이 서로 독립적일 경우(기능 F1에 대한 전투 시스템의 신뢰성 : 0.7825)와 비교하여 종속적일 때 전투 시스템의 신뢰성이 낮아진다.

$$\begin{aligned}
 P(F1 = T) &= \sum_{A, B \in T, F} P(F1 = T, A, B) & (3.6) \\
 &= \sum_{A, B \in T, F} P(F1|A, B)P(A)P(B|A) \\
 &= P(F1 = T, A = T, B = T) + P(F1 = T, A = T, B = F) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = F, B = T) + P(F1 = T, A = F, B = F) \\
 &= (1 \times 0.3 \times 0.8) + (0.1 \times 0.3 \times 0.2) + (0.1 \times 0.7 \times 0.5) + (0.05 \times 0.7 \times 0.5) \\
 &= 0.24 + 0.006 + 0.035 + 0.175 = 0.2985
 \end{aligned}$$

연속형 구조는 Fig. 3.9와 같이 구성 요소가 다른 구성 요소에 영향을 주고 영향을 받은 구성 요소가 또 다른 구성 요소에 연속적으로 영향을 주는 경우를 나타낸다.

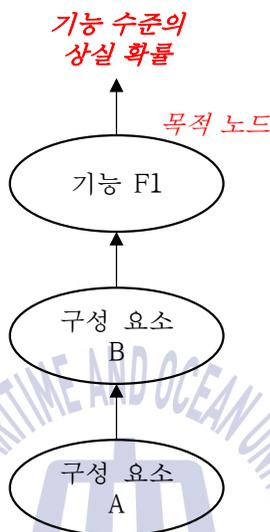


Fig. 3.9 Representation of function and components using BBN (serial)

Fig. 3.10은 Fig. 3.9에 대한 CPT를 나타내며 임의의 값을 이용하였다. 구성 요소 A의 고장 확률은 0.3이고 구성 요소 B의 고장 확률은 0.5이고 기능 F1의 상실 확률은 0이다. 구성 요소 A의 고장에 대한 구성 요소 B의 조건부 고장 확률은 0.8이며, 구성 요소 B의 고장에 대한 기능 F1의 조건부 상실 확률은 0.7이다.

구성 요소 A		구성 요소 B			기능 F1		
T	F	A	T	F	B	T	F
0.3	0.7	T	0.8	0.2	T	0.7	0.3
		F	0.5	0.5	F	0	1

Fig. 3.10 CPTs of Fig. 3.9 (serial)

구성 요소 A가 구성 요소 B의 고장에 영향을 미치고 구성 요소 B가 기능 F1에 영향을 주는 Fig. 3.9에 대한 계산 과정은 식 (3.7)과 같으며 기능 F1의 상실 확률은 0.413이다. 기능 F1에 대한 전투 시스템의 신뢰성은 ‘1 - 0.413(기능 F1의 상실 확률) = 0.587’ 이다.

$$\begin{aligned}
 P(F1 = T) &= \sum_{A, B \in T, F} P(F1 = T, B, A) && (3.7) \\
 &= \sum_{A, B \in T, F} P(F1|B)P(B|A)P(A) \\
 &= P(F1 = T, B = T, A = T) + P(F1 = T, B = T, A = F) \\
 &\quad + P(F1 = T, B = F, A = T) + P(F1 = T, B = F, A = F) \\
 &= (0.7 \times 0.8 \times 0.3) + (0.7 \times 0.5 \times 0.7) + 0 + 0 \\
 &= 0.168 + 0.245 = 0.413
 \end{aligned}$$

발산형 구조는 특별한 경우에 사용하며, 발산형 구조는 수렴형, 혼합형, 연속형과 함께 사용한다. Fig. 3.11은 구성 요소 C가 구성 요소 A와 구성 요소 B에 영향을 주며, 구성 요소 A와 구성 요소 B가 기능 F1에 영향을 주는 수렴형 구조와 함께 쓰인 예시이다.

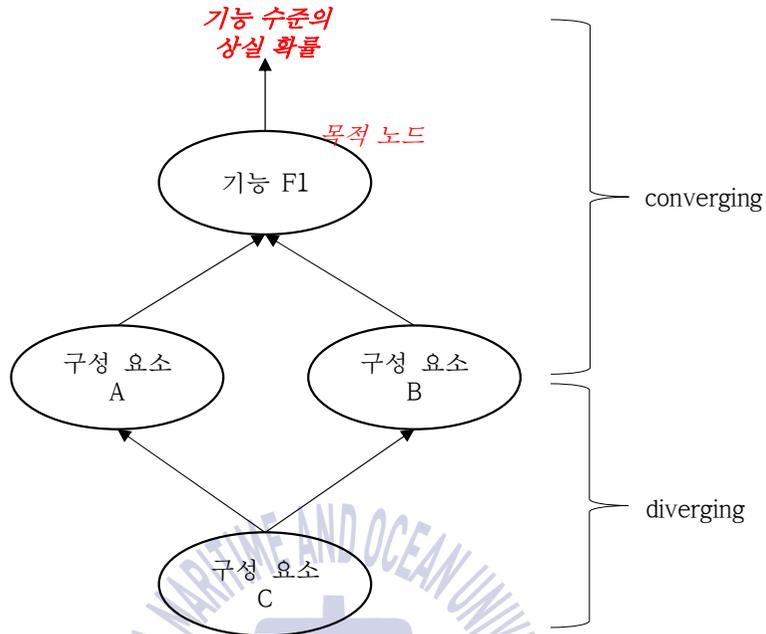


Fig. 3.11 Representation of function and components using BBN
(converging, diverging)

Fig. 3.11의 각 노드에 대한 CPT는 Fig. 3.12와 같다. 구성 요소 A와 B, 기능 F1에 대한 CPT의 일부는 Fig. 3.6의 CPT의 값을 적용하며 추가적으로 필요한 확률에 대해서는 임의의 값을 이용하였다. 구성 요소 C의 고장 확률은 0.5이며 영향을 받은 구성 요소 A와 구성 요소 B의 조건부 고장 확률은 각각 0.7, 1로 정의하였다.

구성 요소 C		구성 요소 A			기능 F1			
T	F	C	T	F	A	B	T	F
0.5	0.5	T	0.7	0.3	F	F	0.05	0.95
		F	0.3	0.7	F	T	0.1	0.9
		구성 요소 B			T	F	0.1	0.9
		C	T	F	T	T	1	0
		T	1	0				
		F	0.5	0.5				

Fig. 3.12 CPTs of Fig. 3.11 (diverging)

CPT를 기반으로 Fig. 3.11에 대한 계산 과정은 식 (3.8)과 같으며, 기능 F1의 상실 확률은 0.47375이다. 기능 F1에 대한 전투 시스템의 신뢰성은 ‘1 - 0.47375(기능 F1의 상실 확률) = 0.52625’ 이다.

$$\begin{aligned}
 P(F1 = T) &= \sum_{A, B, C \in T, F} P(F1 = T, B, A, C) & (3.8) \\
 &= \sum_{A, B, C \in T, F} P(F1|A, B)P(A|C)P(B|C)P(C) \\
 &= P(F1 = T, A = T, B = T, C = T) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = T, B = T, C = F) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = T, B = F, C = T) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = T, B = F, C = F) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = F, B = T, C = T) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = F, B = T, C = F) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = F, B = F, C = T) \\
 &\quad + P(F1 = T, A = F, B = F, C = F) \\
 &= (1 \times 0.7 \times 1 \times 0.5) + (1 \times 0.3 \times 0.5 \times 0.5) \\
 &\quad + 0 + (0.1 \times 0.3 \times 0.5 \times 0.5) + (0.1 \times 0.3 \times 1 \times 0.5) \\
 &\quad + (0.1 \times 0.7 \times 0.5 \times 0.5) + 0 + (0.05 \times 0.7 \times 0.5 \times 0.5) \\
 &= 0.35 + 0.075 + 0.0075 + 0.015 + 0.0175 + 0.00875 \\
 &= 0.47375
 \end{aligned}$$

제 4 장 사례 연구

4.1 분석 대상

제안하는 전투 시스템의 신뢰성 분석을 위하여 대상 전투 시스템, 분석할 기능, 위협에 대하여 정의한다. 대상 전투 시스템을 Fig. 4.1의 전차 모델로 정의하며 전차 모델은 총 26개의 구성 요소로 구성된다.

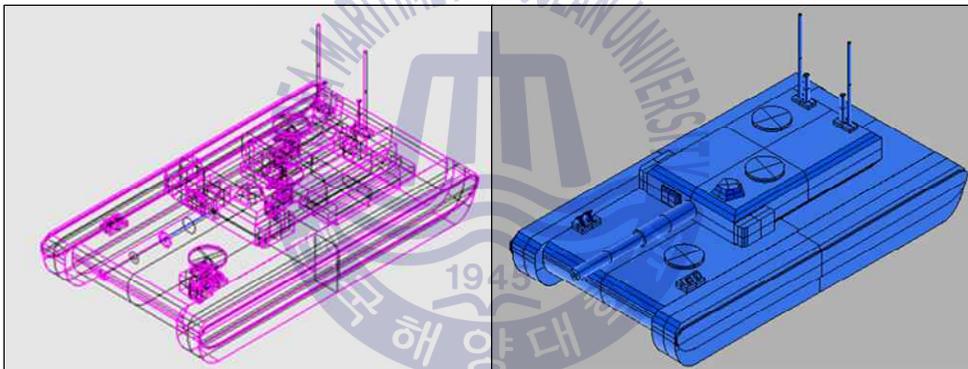


Fig. 4.1 A 3D tank model

통신 기능에 대하여 사례 연구를 진행한다. 전차의 26개의 구성 요소 중에 통신 기능에 대한 구성 요소는 Table 4.1과 같으며 무전기, 안테나(좌), 안테나(우), 전차장이다.

Table 4.1 Components of functions

기능	영향 구성 요소
통신	무전기, 안테나(좌), 안테나(우), 전차장

Table 4.2 Threat categories and types of the combat system

분류명	종류
충돌(Impact)	<ul style="list-style-type: none"> • 운동 에너지(Kinetic Energy) • 폭발 에너지(Blast Energy)
진동/충격(Vibration/Shock)	<ul style="list-style-type: none"> • 진동(Vibration) • 충격(Shock)
에너지(Energy)	<ul style="list-style-type: none"> • 고출력 레이저(High-Energy Laser) • 고출력 전자기파 (High-Energy Electromagnetic Wave) • 입자빔(Particle Beam)

위협은 [10]의 연구에서 Table 4.2와 같이 분류하였다. 분석할 구성 요소에 영향을 주는 위협은 충돌과 고출력 레이저이므로 두 종류의 위협을 고려하였다 [24,25]. 충돌과 고출력 레이저에 의해 영향을 받는 구성 요소는 Table 4.3과 같다. 모든 구성 요소가 충돌에 영향을 받고 안테나(좌), 안테나(우)가 고출력 레이저에 의해 영향을 받는다.

Table 4.3 Components affected by threats

구성 요소 \ 위협	무전기	안테나(좌)	안테나(우)	전차장
충돌	√	√	√	√
고출력 레이저		√	√	

[3]에서는 전투 시스템에 대하여 충돌에 대한 신뢰성 분석을 진행하였으며, 충돌에 대한 2차 영향으로 치명(critical) 구성 요소의 화재 유무, 승무원의 충격에 대한 사망을 고려하였다. 본 논문의 사례 연구에서는 [3]에 의해 분석된 전

면(front) 구성 요소별 고장 확률을 충돌에 의한 구성 요소의 고장 확률로 사용하였다. 고출력 레이저에 대한 구성 요소의 고장 확률에 대한 기존 연구는 없으므로, 임의의 확률을 정의하였다. 구성 요소의 위협별 고장 확률은 Table 4.4와 같다.

Table 4.4 Failure probability of components by threat on the front

구성 요소	충돌에 의한 고장 확률	고출력 레이저에 의한 고장 확률
무전기	0.12	0
안테나(좌)	0.13	0.2
안테나(우)	0.13	0.2
전차장	0.63	0

정의된 분석 대상에 대하여 Table 4.5로 정리하였다. 전차를 대상으로 충돌과 고출력 레이저를 고려하여 통신 기능에 대한 상실 확률을 도출한다. 구성 요소의 종속적 관계의 유무에 대한 비교를 진행하여 제안하는 방법의 효용성을 검증한다.

Table 4.5 Definition of targets

대상	정의
전투 시스템	전차(26개의 구성 요소)
기능	통신
위협	충돌, 고출력 레이저

4.2 신뢰성 분석

제안한 방법의 효용성을 검증하기 위해 안테나와 무전기가 종속적인 관계가 있는 경우와 없는 경우로 진행한다. 각 경우의 통신 기능의 상실 확률에 대하여 결과 변화를 확인한다.

제안하는 방법에 대한 계산을 자동화하기 위해 개발한 프로그램을 사용하여 계산한다. 개발한 프로그램은 FT에 대한 분석을 수행하는 각 구성 요소에 FT 텍스트 파일, 분석할 기능의 BBN에 대한 텍스트 파일, 각 BBN 노드의 CPT 파일을 입력으로 갖는다. Table 4.6은 각 파일에 대한 데이터 항목 및 설명을 나타낸다. FT에 대한 텍스트 파일은 구성 요소의 수만큼 작성하며, FT를 구성하는 모든 노드들에 대한 정보를 가진다. 또한, 하나의 노드에 대한 값은 다음과 같은 순서로 작성한다. 노드의 이름, 노드와 노드의 원인 노드간의 관계를 나타낸 게이트, 해당 노드가 위협일 경우, 위협에 의한 구성 요소의 고장 확률, 정상사상 노드로부터의 해당 노드 깊이, 원인 노드들의 이름을 가진다. BBN에 대한 텍스트 파일은 BBN을 구성하는 모든 노드 정보를 가지며 하나의 노드에 대한 값은 다음과 같은 순서로 작성한다. 노드의 이름, 노드에 대한 영향 노드들의 이름, 노드의 CPT 파일 위치를 가진다. CPT에 대한 텍스트 파일은 BBN 노드의 수만큼 생성하여야 하며, 각 텍스트 파일의 이름은 BBN에 대한 텍스트 파일에서 해당 노드에 명시한 것과 같아야 한다. CPT에 대한 텍스트 파일은 노드의 고장 확률과 필요한 경우, 조건부 고장 확률을 가진다. 해당 항목의 값이 없을 경우, null을 입력한다.

Table 4.6 Formats of input data types for each files(.txt)

파일 종류	항목	설명
FT	노드 이름	구성 요소 및 각 위협
	게이트	노드의 관계를 나타내는 게이트
	고장 확률	위협에 대한 구성 요소의 고장 확률
	노드 깊이	구성 요소 노드로부터의 노드 깊이
	원인(하위) 노드 이름	관련된 위협 또는 구성 요소의 기능
BBN	이름	기능 및 각 구성 요소
	영향 노드 이름	노드에 영향을 주는 구성 요소
	파일 위치	노드의 CPT 파일 위치
CPT	조건부 고장 확률	노드에 대한 CPT

Table 4.7은 Function1의 상실 확률 분석을 위해 Table. 4.6을 이용한 텍스트 파일 구성의 예시이다. Function1에 영향을 주는 구성 요소는 Component1로, Component1의 고장에 영향을 주는 위협은 Threat1과 Threat2로 설정한다.

Component1의 FT 파일에는 Component1, Threat1, Threat2 노드의 정보가 존재한다. Table 4.7의 FT 파일에 대한 입력 값인 ‘Component1 AND null 0 Threat1,Threat2’ 는 Component1 노드에 대한 정보이다. ‘Component1’ 은 노드의 이름이며, ‘AND’ 는 Threat1 및 Threat2와 Component1의 관계를 나타내는 게이트이다. ‘null’ 은 Component1의 고장 확률로 게이트로부터 계산되므로 값이 없으며, ‘0’ 은 Component1 노드의 깊이이다. ‘Threat1,Threat2’ 는 Component1의 고장에 영향을 주는 위협의 이름이다. ‘Threat1 null 0.5 1 null’ 은 Threat1 노드에 대한 정보이다. ‘Threat1’ 은 노드의 이름이며, 두 번째 항목인 ‘null’ 은 Threat1에 대한 원인 노드가 없어 게이트 항목의 값이 없다. ‘0.5’ 는 Threat1에 의한 Component1의 고장 확률이며, ‘1’ 은 Threat1 노드의 깊이이다. 마지막 항목의 ‘null’ 은 Threat1에 대한 원인 노드가 없음을 나타낸다.

Function1에 대한 BBN 파일에는 Function1과 Component1 노드의 정보가 존재

재한다. Table 4.7의 BBN 파일에 대한 입력 값인 ‘Function1 Component1 C:\Desktop\Funcl.txt’ 은 Function1 노드에 대한 정보이다. ‘Function1’ 은 노드의 이름이며, ‘Component1’ 은 Function1에 영향을 주는 노드 이름이다. 마지막 항목인 ‘C:\Desktop\Funcl.txt’ 는 Function1의 CPT 파일의 경로이다. ‘Component1 null C:\Desktop\C1_CPT.txt’ 는 Component1 노드에 대한 정보이다. ‘Component1’ 은 노드의 이름이며, ‘null’ 은 Component1에 영향을 주는 노드가 없음을 의미한다. 마지막 항목인 ‘C:\Desktop\C1_CPT.txt’ 는 Component1의 CPT 파일의 경로이다.

Table 4.7의 CPT 파일의 ‘Funcl.txt’ 은 Component1에 대한 Function1의 조건부 확률이다. Component1이 고장일 때 0.7의 상실 확률을 가지며 정상일 때, 0의 상실 확률을 가진다. 또한, ‘C1_CPT.txt’ 는 Component1의 고장 확률은 FT 파일에 의해 계산되기 때문에 null로 작성한다.

Table 4.7 Example of input data for each files(.txt)

파일 종류	예시		표현												
FT	Component1 AND null 0 Threat1,Threat2 Threat1 null 0.5 1 null Threat2 null 0.3 1 null														
BBN	Function1 Component1 C:\Desktop\Funcl.txt Component1 null C:\Desktop\C1_CPT.txt														
CPT	Funcl.txt	0.7 0.3 0 1	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Function1</th> </tr> <tr> <th>Component1</th> <th>T</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>T</th> <td>0.7</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <th>F</th> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Function1			Component1	T	F	T	0.7	0.3	F	0	1
	Function1														
Component1	T	F													
T	0.7	0.3													
F	0	1													
C1_CPT.txt	null null	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Component1</th> </tr> <tr> <th>T</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>null</td> <td>null</td> </tr> </tbody> </table>	Component1		T	F	null	null							
Component1															
T	F														
null	null														

Fig. 4.2는 개발한 프로그램의 사용자 인터페이스이다. FT 영역의 불러오기 버튼은 FT 텍스트 파일의 경로를 표시하고 구성 요소의 고장 확률을 계산하여 출력부에 나타낸다. 이때 불러온 파일은 FT 파일 설정부의 콤보 박스(combo box)의 하위 목록에 저장되며 저장된 하위 목록을 선택하면 해당 구성 요소의 고장 확률을 다시 확인할 수 있다. BBN 영역의 불러오기 버튼은 BBN 텍스트 파일의 경로를 표시하며 BBN 텍스트 파일을 읽어 BBN의 노드 표시부에 노드들을 나타낸다. BBN 영역의 분석 버튼은 표시부의 노드들 중에 분석할 노드를 선택하면 해당 노드에 대한 BBN을 분석하며 선택된 노드가 없을 경우 표시부의 첫 노드로 BBN을 분석한다. 분석 결과는 출력부에 나타낸다.

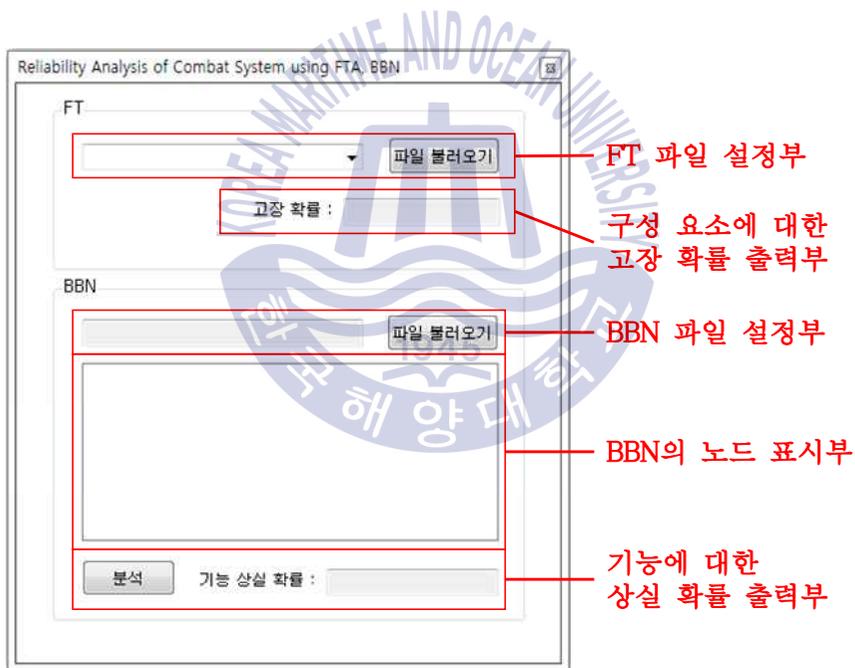


Fig. 4.2 User interface of the developed program

프로그램의 분석 순서는 먼저, FT 영역의 불러오기를 통해 분석할 기능과 관련된 모든 구성 요소에 대하여 고장 확률을 분석한 후, BBN 영역의 불러오기를 통해 BBN 노드를 가져온다. BBN 노드 표시부에서 분석할 기능 노드를 선택

하여 기능의 상실 확률을 도출한다.

(1) Case 1. 안테나와 무전기의 고장이 독립적으로 발생

먼저, 하위 계층의 위협에 의한 고장 확률을 분석한다. 통신 기능과 관련된 구성 요소 중에서 안테나(좌), 안테나(우)를 제외한 고장 요소는 충돌에 의해서만 고장이 발생한다. 이에 따라 무전기, 전차장의 고장 확률은 충돌에 의한 고장 확률이다. 안테나(좌)와 안테나(우)는 충돌 또는 고출력 레이저에 의해 고장이 발생하기 때문에 FT를 그리면 Fig. 4.3, Fig. 4.4와 같으며, Table 4.4를 이용하여 고장 확률을 부여하였다.

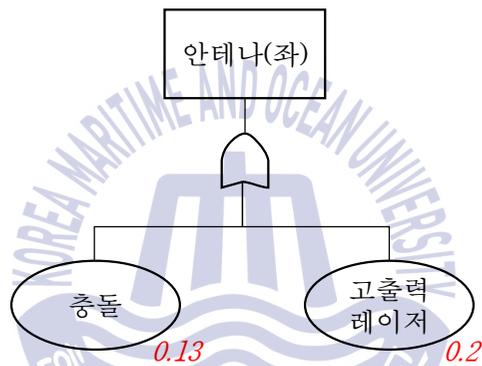


Fig. 4.3 FT for an antenna(left)

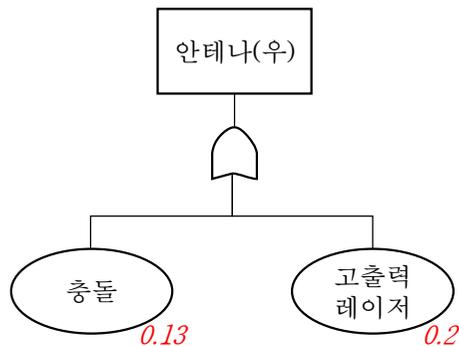


Fig. 4.4 FT for an antenna(right)

부여된 고장 확률을 기반으로 식 (3.2)을 이용하여 구성 요소별 고장 확률을 도출할 수 있다. Fig. 4.5는 안테나(좌), 안테나(우)의 FT에 대한 텍스트 파일이다.

(a) 안테나(좌)에 대한 FT 텍스트 파일

antenna_r	OR	null	0	impact,high_energy_laser
impact	null	0.13	1	null
high_energy_laser	null	0.2	1	null

(b) 안테나(우)에 대한 FT 텍스트 파일

antenna_l	OR	null	0	impact,high_energy_laser
impact	null	0.13	1	null
high_energy_laser	null	0.2	1	null

Fig. 4.5 Text file of FT for an antenna(left) and an antenna(right)

안테나(좌), 안테나(우)의 고장 확률은 ‘ $1 - ((1 - 0.13(\text{충돌에 의한 고장 확률})) \times (1 - 0.2(\text{고출력 레이저에 대한 고장 확률}))) = 0.304$ ’ 이다. Fig. 4.6은 개발한 프로그램의 안테나(좌)의 FT에 대한 결과 화면이다.

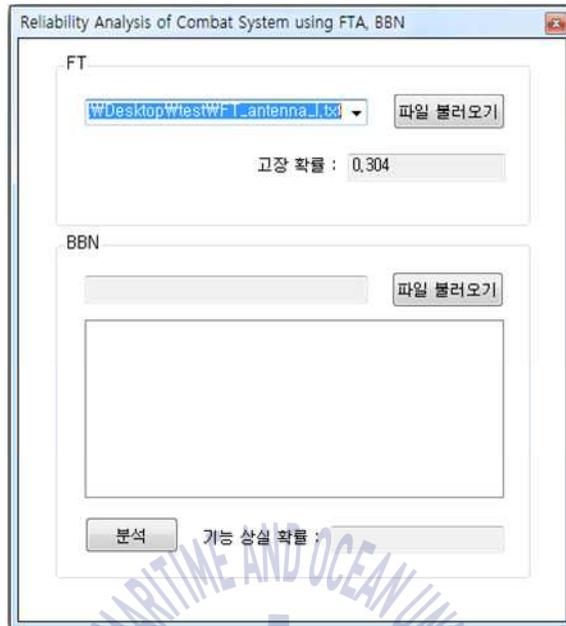


Fig. 4.6 A result of FT for an antenna(left)

Table 4.8은 충돌, 고출력 레이저에 의한 구성 요소들의 고장 확률이다.

Table 4.8 Failure probability of components

구성 요소	고장 확률
무전기	0.12
안테나(좌)	0.304
안테나(우)	0.304
전차장	0.63

상위 계층에서는 구성 요소와 통신 기능과의 관계를 기반으로 BBN을 나타내며 Fig. 4.7과 같다. 안테나(좌) 및 안테나(우)는 안테나의 일부이기 때문에 안테나 노드를 추가한다. 안테나(좌) 및 안테나(우)는 안테나에 영향을 주며, 무전기,

안테나, 그리고 전차장은 통신 기능에 영향을 준다.

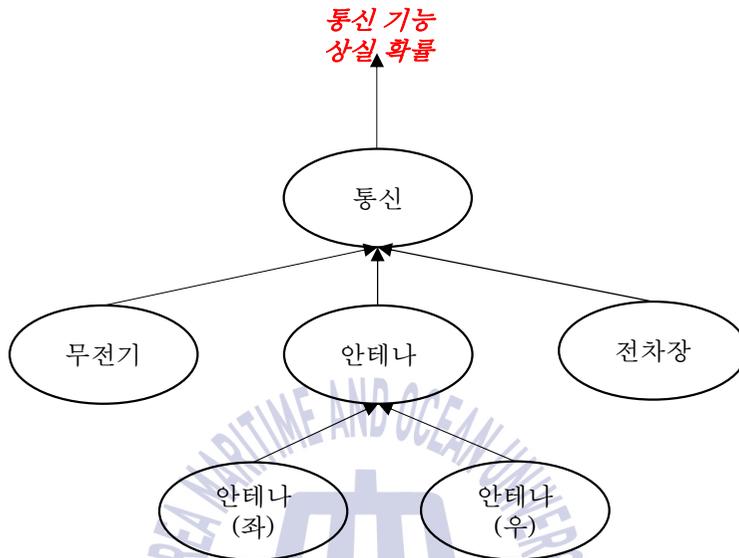


Fig. 4.7 BBN for communication function

통신 기능의 BBN을 구성하는 구성 요소에 대한 CPT는 Fig. 4.8과 같다. Table 4.4를 기반으로 안테나(좌) 및 안테나(우)의 고장 확률은 0.304, 전차장의 사망 확률은 0.63, 무전기의 고장 확률은 0.12이다. 안테나와 통신 기능에 대한 조건부 확률은 임의의 값으로 정의하였다. 안테나는 안테나(좌)와 안테나(우)가 전부 고장일 경우에만 고장이며, 통신 기능에 대한 조건부 확률은 통신 CPT와 같다.

안테나(좌,우)		안테나			
T	F	안테나(좌)	안테나(우)	T	F
0.304	0.696	F	F	0	1
		F	T	0	1
		T	F	0	1
		T	T	1	0

전차장		통신				
T	F	무전기	안테나	전차장	T	F
0.63	0.37	F	F	F	0	1
		F	F	T	0.3	0.7
		F	T	F	0.3	0.7
		F	T	T	0.5	0.5
		T	F	F	0.7	0.3
		T	F	T	0.7	0.3
		T	T	F	1	0
		T	T	T	1	0

무전기		통신				
T	F	무전기	안테나	전차장	T	F
0.12	0.88	F	F	F	0	1
		F	F	T	0.3	0.7
		F	T	F	0.3	0.7
		F	T	T	0.5	0.5
		T	F	F	0.7	0.3
		T	F	T	0.7	0.3
		T	T	F	1	0
		T	T	T	1	0

Fig. 4.8 CPTs for nodes of communication function

Fig. 4.7의 BBN을 분석하기 위해서 식 (3.3)을 이용한다. 통신 기능을 ‘C’, 무전기를 ‘E’, 안테나를 ‘A’, 전차장을 ‘H’, 안테나(좌)를 ‘AL’, 안테나(우)를 ‘AR’ 라고 했을 때, 통신 기능에 대한 계산은 식 (4.1)과 같다. 통신 기능은 무전기, 안테나, 전차장에 의해 영향을 받고 안테나는 안테나(좌), 안테나(우)에 의해서 영향을 받는다.

$$\begin{aligned}
 P(C=T) &= \sum_{E,A,H,AR,AL \in T,F} P(C=T,E,A,H,AR,AL) & (4.1) \\
 &= \sum_{E,A,H,AR,AL \in T,F} P(C=T|E,H,A) \times P(E) \times P(H) \\
 &\quad \times P(A|AR,AL) \times P(AR) \times P(AL)
 \end{aligned}$$

Fig. 4.9는 통신 기능의 BBN에 대한 텍스트 파일이다.



Fig. 4.9 Text file of BBN for communication function

Fig. 4.10은 통신 기능에 대한 텍스트 파일을 이용하여 분석을 진행한 실행 화면이며, 통신 기능의 상실 확률은 0.273이다. 통신 기능에 대한 전차의 신뢰성은 '1 - 0.273(통신 기능의 상실 확률) = 0.727' 이다.

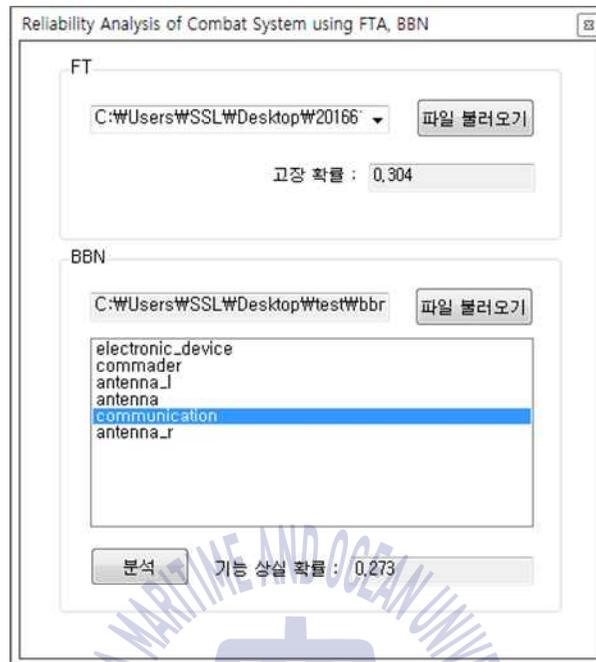


Fig. 4.10 A result of BBN for communication function

(2) Case 2. 안테나와 무전기의 고장이 종속적으로 발생

위협에 대한 구성 요소의 고장 확률을 분석하는 하위 계층은 Case 1과 동일하므로 생략한다. 상위 계층에서 안테나와 무전기의 종속적인 관계로 인한 통신 기능의 상실 확률을 분석한다. Fig. 4.11은 안테나와 무전기가 종속적인 관계가 있는 경우에 대한 BBN으로 안테나의 고장은 무전기의 기능의 상실(고장)에 영향을 준다.

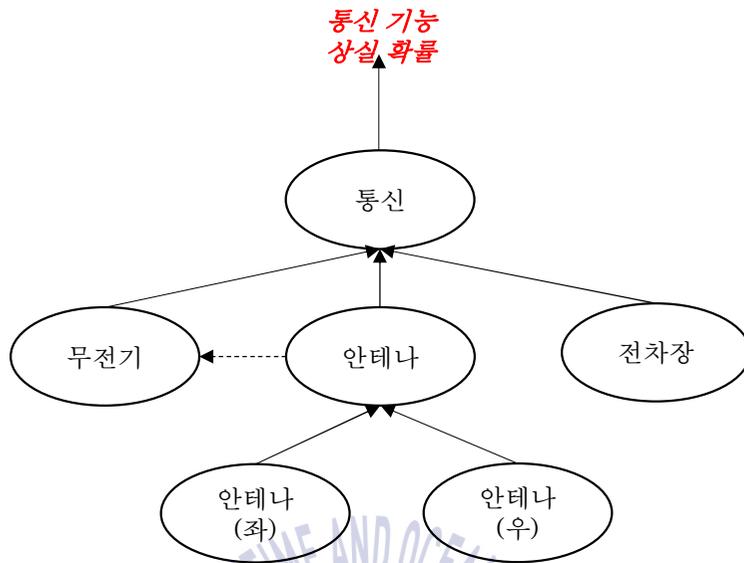


Fig. 4.11 BBN for communication function including the dependent between an antenna and a electronic device

분석을 위한 CPT는 Case 1과 동일하며, 추가적으로 안테나가 무전기에 영향을 주는 경우에 대한 CPT를 작성하였다. 안테나에 의해 무전기의 고장 확률이 높아지므로 무전기에 대한 CPT는 Fig. 4.12와 같이 정의하였다.

무전기		
안테나	T	F
T	0.7	0.3
F	0.12	0.88

Fig. 4.12 CPT of a electronic device

안테나와 무전기가 종속적인 경우의 수식은 식 (4.2)와 같다. 식 (4.1)에서는 안테나와 무전기의 독립적임을 $P(A)$, $P(E)$ 로 나타내고 식 (4.2)에서는 무전기가 안테나에 의해 영향을 받는 것을 $P(E | A)$ 를 통해 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 P(C = T) &= \sum_{E, A, H, AR, AL \in T, F} P(C = T, E, A, H, AR, AL) & (4.2) \\
 &= \sum_{E, A, H, AR, AL \in T, F} P(C = T | E, H, A) \times P(E | A) \times P(H) \\
 &\quad \times P(A | AR, AL) \times P(AR) \times P(AL)
 \end{aligned}$$

Fig. 4.13은 안테나와 무전기가 종속적인 경우, 통신 기능의 BBN에 대한 텍스트 파일이다.



Fig. 4.13 Text file of BBN for communication function including the dependent between an antenna and a electronic device

Fig. 4.14는 안테나와 무전기가 종속적인 경우, 통신 기능에 대한 텍스트 파일을 이용하여 분석을 진행한 실행 화면이다. 이 경우, 통신 기능의 상실 확률은 0.304이며, 통신 기능에 대한 전차의 신뢰성은 ‘1 - 0.304(통신 기능의 상실 확률) = 0.696’ 이다.

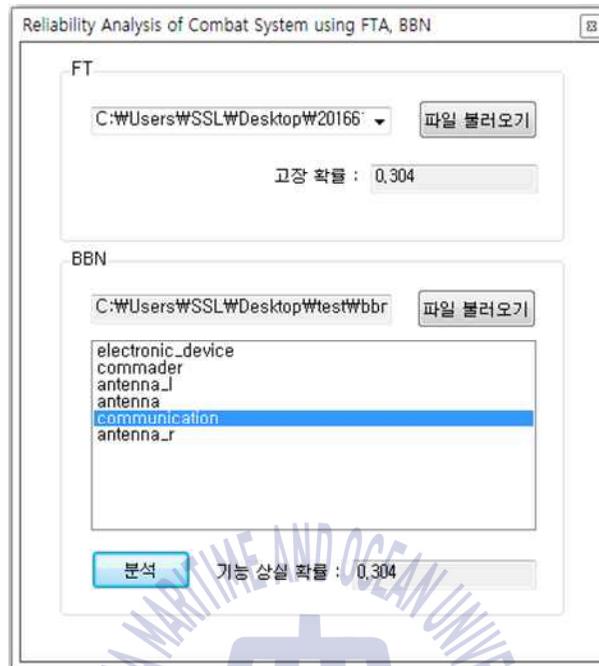


Fig. 4.14 A result of BBN for communication function including the dependent between an antenna and a electronic device

무전기와 안테나의 관계에 따른 통신 기능에 대한 전차의 신뢰성은 Table 4.9와 같으며, 독립적일 때 0.727이며 종속적일 때 0.696로 구성 요소의 종속적인 관계에 의해 신뢰성이 0.031만큼 낮아짐을 알 수 있다. 이와 같이 제안하는 방법을 활용하여 다양한 위협에 의한 고장과 구성 요소 관계를 고려한 분석이 가능하다.

Table 4.9 Reliability of the armored fighting vehicle for communication function

무전기와 안테나의 관계	신뢰성
독립적(Case 1)	0.727
종속적(Case 2)	0.696

제 5 장 결 론

전투 시스템의 생존성을 높이기 위해 전투 시스템의 신뢰성 분석에 대한 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 전투 시스템 신뢰성 분석은 충돌에 관련된 위협을 토대로 신뢰성을 분석하였다. 하지만 충돌과 더불어 에너지, 충격, 진동 등의 다양한 위협이 존재한다. 최근 다양한 위협의 특성에 대한 연구가 이루어지고 있으며 다양한 위협의 영향을 고려하는 것에 대한 필요성이 대두되었다. 또한, 전투 시스템의 신뢰성 분석에 많이 이용되는 FTA 기법은 구성 요소의 종속적인 관계를 표현할 수 없다. 이에 따라 전투 시스템 신뢰성 분석의 정확도를 높이기 위해서는 다양한 위협과 구성 요소의 종속적인 관계를 고려하여야 한다.

본 논문에서는 전투 시스템의 계층적 신뢰성 분석 방법을 제안하였다. 제안하는 전투 시스템의 신뢰성 분석 방법론은 하위, 상위의 2계층으로 구성된다. 하위 계층에서는 FTA 기법을 이용하여 다양한 위협에 대한 각 구성 요소의 고장 확률을 도출하고 상위 계층에서는 BBN을 이용하여 구성 요소간의 의존적 관계를 표현하고 하위 계층에서 분석된 값을 기반으로 기능 상실 확률을 도출하여 신뢰성 분석을 진행한다. 제안하는 분석 방법을 이용하여 전투 시스템 중 하나인 전차에 대하여 사례 분석을 하였으며, 다양한 위협과 구성 요소 간의 의존적 관계를 고려하여 정량적인 분석이 가능한 것을 확인하였다.

향후에는 각 위협에 의한 전투 시스템 구성 요소의 고장 확률에 대한 연구가 필요하다. 또한, 전투 시스템 구성 요소간의 관계 및 다양한 위협간의 관계에 대한 전문적인 분석을 진행하여 그에 맞는 모델을 구성하여 분석의 정확성을 높여야 한다.

참고문헌

- [1] 김인동, 하석태, 1998. 공대지 임무를 위한 항공기 전투생존성 분석모형. *한국국방경영분석학회지*, 24(2), pp.1-16
- [2] 이슬기, 김동성, 박종서, 2013. 무인항공기 시스템 모델링을 통한 신뢰성 및 가용성 분석. *한국지식정보기술학회 논문지*, 8(2), pp.81-91.
- [3] 황훈규, 2016. *전투 시스템의 통합 신뢰성 분석 방법론*. 박사학위논문. 부산: 한국해양대학교.
- [4] 안성모, 박종서, 김동성, 박지우, 우성충, 김태원, 2017. 한국형 전투시스템 생존성 분석 툴(Kusar):SRN을 활용한 장갑차의 생존성 분석. *대한기계학회 재료 및 파괴부문 2017년도 춘계학술대회 논문집*, pp.297-298
- [5] 위미선, 안성모, 엄태훈, 진현준, 김동성, 박종서, 2014. 전투시스템의 트리 구조 모델링을 통한 생존성 및 신뢰성 분석 연구. *대한기계학회 춘추학술대회*, p.174.
- [6] 김주영, 이경태, 2011. 지상위협에 대한 비행체 취약도 연구. *한국항공우주학회 학술발표회 논문집*, pp.902-906
- [7] 황훈규, 유병규, 이재웅, 이장세, 2015. FTA 기법을 활용한 피격 확률 기반의 전차 취약성 분석 시스템 개발. *한국정보통신학회 논문지*, 19(8), pp.1981-1989
- [8] 황훈규, 강지원, 이장세, 2015. FMECA 기반 위험도를 활용한 전차의 구성 부품별 취약성 분석 프로그램의 개발. *한국정보통신학회 논문지*, 19(8), pp.1973-1980.

- [9] G. Kevorkian, 2016. *UAS Risk Analysis using Bayesian Belief Networks: An Application to the Virginia Tech ESPAARO*. Ph.D. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [10] 사공재, 김종탁, 우성충, 박지우, 최준홍, 박종서, 김태원, 2017. 통합 생존성 예측기술 개발. *대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회*. April 5-7, 2017, pp.277-278.
- [11] 배춘익, 2010. FMEA를 이용한 공기공급시스템의 신뢰성 분석. *한국기계기술학회지*, 12(4), pp.205-210.
- [12] C. Hobbs, 2010. *Fault Tree Analysis with Bayesian Belief Networks for Safety-Critical Software*. QNX Software Systems.
- [13] Ridley, L.M., 2000. *Dependency Modelling using Fault-tree and Cause-consequence Analysis*. Ph.D. Loughborough University.
- [14] 김기국, 김한수, 2007. FMEA 기법을 이용한 초고층 건축시공의 주요 공사비 초과요인 발굴에 관한 연구. *대한건축학회 논문집*, 23(5), pp.171-178.
- [15] L. K. Roach, 1993. *Fault Tree Analysis and Extensions of the V/L Process Structure*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S.
- [16] International Electrotechnical Commission, 2006. *Fault Tree Analysis (FTA) Second edition*, IEC 61025, International Electrotechnical Commission.
- [17] 하솔, 구남국, 노명일, 2013. DEVS 형식론 기반의 Dynamic Reliability Block Diagram과 GPU 가속 기술을 이용한 신뢰도 분석 방법. *한국시뮬레이션학회 논문지*, 22(4), pp.109-118.
- [18] H. Boudali, P. Crouzen, and M. Stoelinga, 2007. Dynamic Fault Tree analysis using Input/Output Interactive Markov Chains. *Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks(DSN' 07)*, IEEE.
- [19] 신진수, 2017. 베이지 정리를 이용한 원자력시설 계측제어 시스템에 대한

사이버보안 평가. 박사학위논문. 서울:경희대학교.

- [20] A. Bobbio, L. Porinale, M. Minichino, and E. Ciancamerla, 2011. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering and System Safety* 71, pp.249-260.
- [21] 문일철, 2017. 인공지능 및 기계학습 개론 1 강의자료 [Online], Available at: <https://kooc.kaist.ac.kr/>
- [22] M. Frigault, Lingyu Wang, 2008. Measuring Network Security Using Bayesian Network-Based Attack Graphs. *Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference*, July 28, pp.698-703.
- [23] Bilal M. Ayyub, 2004. *Risk Analysis in Engineering and Economics*. Journal of the American Statistical Association, 99(466), pp.563-564.
- [24] 김태원, 장경영, 고광철, 김용수, 우성충, 2017. 에너지 침투 억제 연구. *대한기계학회 기계저널*. 57(12), pp.37-40.
- [25] 김진겸, 최성호, 윤성희, 장경영, 신완순, 2015. 고출력 CW 레이저에 의한 CMOS 영상 센서의 손상 분석. *대한기계학회 논문집 A권*, 39(1), pp.105-109.