

# 고장수목분석(FTA) 기반 시스템 건전성 진단 기법 연구 동향

고장수목분석(fault tree analysis)는 시스템의 건전성을 분석하는 방법으로 다양한 시스템에 적용하여 활용되어 왔다. 시스템이 가지고 복잡해짐에 따라 생겨나는 여러 동적 특성들을 포함한 시스템의 건전성을 분석하기 위해 고장수목분석을 확장하거나, 다른 기법들을 활용하는 연구들이 이루어졌다. 본 논문에서는 다양한 건전성 진단 기법들을 접목한 고장수목분석 기반 시스템 건전성 진단 연구를 분류하고 분석한다.

변성일<sup>1</sup>, 이동익<sup>1</sup>(<sup>1</sup>경북대학교 전자공학부)

## I. 서 론

시스템의 규모와 복잡성이 증가함에 따라 시스템의 효율성, 신뢰성, 안전성 등에 대한 요구 수준도 크게 강화되고 있다[1]. 다양한 산업, 군사, 항공 우주 분야 등에서 높은 비중을 차지하는 복잡시스템(complex systems)은 다수의 하위 시스템 및 부품들로 구성된다[2]. 시스템을 구성하는 다양한 부품에서 고장이 발생하거나 성능 저하가 일어날 수 있고, 이에 따라 사고가 발생할 경우 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 인명손상을 유발할 가능성이 매우 높다. 그러므로 부품 결함으로 인한 시스템의 고장 또는 오동작을 방지하기 위해, 안전하고 안정적인 작동을 보장하기 위한 예방 조치를 취할 수 있도록 시스템의 상태 즉 건전성(health)을 철저히 감시해야 한다[3].

시스템의 건전성을 진단하는 방법은 크게 분석 기법과 시뮬레이션 기법으로 나뉜다. 분석 기법은 고장 수목 분석(FTA, Fault Tree Analysis), 이진 결정 다이어그램(BDD, Binary Decision Diagram), 고장 모드 및 효과 분석(FMEA, Failure Mode and Effects Analysis), 신뢰도 블록 다이어그램(RBD, Reliability Block Diagram), 마르코프 체인(MC, Markov Chain), 베이지안 네트워크(BN, Bayesian Network) 등이 있다. 시뮬레이션 기법으로는 주로 몬테카를로 시뮬레이션이 활용된다. 이와 더불어 데이터를 기반으로 하는 PHM(Prognostics and Health Management)과 시스템의 잔여유효수명(RUL, Remaining Useful Life)을 예측하-

는 연구들이 진행되고 있다. 본 기술논문에서는 이러한 다양한 시스템 건전성 진단 기법 중 FTA에 관련된 시스템 건전성 진단 기술 동향을 소개한다.

## II. 고장 수목 분석

고장수목(fault tree, 이하 FT)은 원하지 않는 시스템 고장의 잠재적 원인을 식별하는 데 사용되는 연역적·하향식 분석 방법이다. FT의 그래픽 표현은 부울 논리(boolean logic)를 기반으로 다양한 결합과 그 원인 사이의 논리적 관계를 표현한다. 최상위 사건(top event)은 일반적으로 치명적인 위험 또는 경제적 손실을 초래할 수 있는 시스템 고장을 나타낸다. FT는 최상위 사건을 기준으로 이를 발생시키는 기본 사건(basic event)이 정의될 때까지 아래쪽으로 FT를 구성해 나간다. 그림 1과 같이 FT에서 기본 사건은 원으로 표시되며 더 이상 분해할 필요가

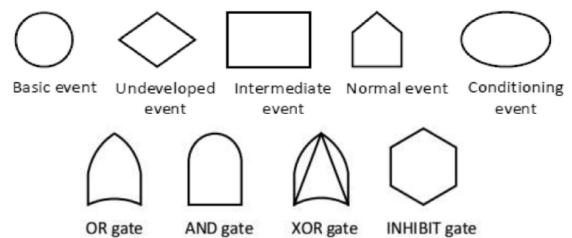


그림 1. FT 사건과 논리 게이트 기호 [5].

없는 수준의 고장을 나타낸다. 중간 사건은 직사각형으로 표현되는 이벤트이며 FT 아래쪽에 있는 다른 하위 레벨 사건으로 인해 발생한다. FT에서는 ‘AND’ 및 ‘OR’ 게이트를 통해 사건의 원인과 결과와 같은 관계를 표현한다[4].

FTA는 고장 모드 및 효과 분석(FMEA) 기법과 함께 신뢰도 분석에 가장 많이 사용되는 방법[6]의 하나이다. 군사[7] 및 항공우주[8] 분야에 처음 적용되었으며 이후 항공[9], 항법[10], 원자력[11,12] 등과 같은 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. 표준 FT 또는 정적 FT는 가장 일반적이고 기본적인 FT 모델로, 1960년대 벨 연구소에서 탄도 미사일의 제어 시스템을 분석하기 위해 도입되었다[13]. 보잉은 항공우주공학 분야에 FTA를 도입하는 데 선구적인 역할을 했다[14]. 고장 진단 및 대처 기술이 발달하고 시스템의 다양성과 크기가 커짐에 따라 나타난 시스템의 동적 특성을 표현하기 위해 기본 사건들의 순서 종속성을 표현할 수 있는 동적 FT 즉 DFT(Dynamic FT)가 제안되었다[15]. DFT는 기본 사건, 예비 부품 및 순서 종속 이벤트의 우선 순위와 같은 동적 고장을 표현할 수 있다. DFT의 동적 게이트로는 우선순위 AND 게이트(PAND), 가능 의존성 게이트(FDEP), 시퀀스 시행 게이트(SEQ), 콜드, 핫 및 워스페어 게이트(CSP, HSP, WSP)가 있다[16].

FT는 대상 시스템에 대한 정성적 분석뿐 아니라 정량적 분석에도 적용될 수 있다. FT의 정성적 분석은 일반적으로 최소 컷셋(minimal cut sets)을 산출하는 것으로부터 시작한다. MCS는 FT의 상위 사건을 발생시킬 수 있는 최소 기본 사건들의 조합이다. 아울러 FTA를 통해 시스템의 가장 중요한 부분을 파악할 뿐만 아니라 현장 데이터를 결합하고 가장 빈번한 상위 사건을 강조함으로써 복잡한 시스템의 신뢰성을 측정하고 정량화할 수 있다. 고장률 또는 고장 확률과 같은 시스템 구성 요소에 대한 정량적 데이터를 활용하여 FT의 정량적 분석을 수행하고, 구성 요소의 신뢰성, 가용성, 중요도 등과 같은 정량적 시스템 특성을 평가한다. FT의 정량적 분석은 일반적으로 FT의 사건이 통계적으로 독립적이라는 가정하에 수행된다. FT의 사건이 독립적일 때, MCS의 신뢰도는 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\Pr\{M_i\}(t) = \prod_m^{i=1} \Pr\{BE_i\}(t) \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 기본 사건의 개수,  $\Pr\{M_i\}(t)$ 는 시간  $t$ 에서  $i$  번째 MCS에서 고장이 발생할 확률을 의미한다. 여러 MCS의 고장 확률을 통합하여 최상위 사건의 발생 확률,  $\Pr\{TE\}$ 를 다음 식 (2)을 통해 구할 수 있다.

$$\Pr\{TE\}(t) = 1 - \prod_k^m (1 - \Pr\{m_k\}(t)) \quad (2)$$

하지만 실제 시스템에서는 기본/중간 사건은 통계적으로 의존(dependent) 가능성이 있다. 따라서 통계적 독립성 가정은 시스템 신뢰성 및 기타 관련 지수의 부정확한 평가를 초래할 우려가 있다[17]. 한 사건의 발생률이 다른 사건의 확률을 증가시키는 경우를 고려하여 기본 사건이 확률적으로 종속적인 시스템을 모델링하기 위한 FT에 대한 연구도 수행되고 있다[18].

### III. 시스템 건전성 진단 기법

시스템의 건전성을 진단하기 위해 건전성 예측 및 관리(PHM), 고장 모드 결과 및 위험 분석(FMEA), FTA, 마르코프 프로세스 분석, 몬테카를로 시뮬레이션 분석 및 베이지안 네트워크 분석[19-25] 등과 같은 다양한 기법들이 연구되고 있다. III장에서는 먼저 PHM 기법에 대해 간략히 살펴보고, 이어서 FTA 기반 건전성 진단 기법의 주요 개념을 소개한다.

#### 1. 건전성 예측 및 관리(PHM)

일반적으로 건전성 예측 및 관리 (PHM, Prognostics and Health Management) 기술은 환경, 운영 및 성능 관련 센서값 및 해석 매개 변수를 결합하여 기계와 시스템의 안정적이고 안전한 작동을 보장하기 위한 목적으로 사용되고 있다[26]. 시스템의 건전성을 진단하기 위해서는 작동 온도, 오일 온도, 진동, 압력 등과 같은 물리적 매개변수를 감지하고 전반적인 작동 및 환경 시스템 상태를 모니터링할 수 있도록 시스템에 다양한 센서를 장착한다. PHM은 핵심 부품에 대한 고장 탐지(detection) 및 진단(diagnosis) 기술을 통해 시스템 상태를 지속적으로 평가하고, 발생 가능한 시스템 고장에 대한 조기 경고를 제공하며, 예지 보수(predictive maintenance)를 수행할 수 있다[27].

시스템의 건전성을 예측하기 위해서 다음과 같은 다양한 방법들이 적용된다[28]: 1) 내장 테스트(built-in test), 2) 시스템의 중대 고장이 발생하기 전에 사전 경고를 제공할 수 있도록 시스템 보다 수명이 짧은 소모품 장치 사용, 3) 성능 매개 변수의 변화와 같은 임박한 고장의 전兆가 되는 매개 변수의 모니터링 및 추론, 4) 전자 부품 및 전자 부품의 스트레스 및 손상 모델링을 활용하여 누적 손상을 계산. 연구[29]는 건전성 상태 예측을 위한 새로운 PHM 기반 융합 예측 프레임워크를 개발했다. 시스템 건전성 상태를 나타내는 일반적인 건전성 지수를 생성하기 위해 다수의 센서 값들을 융합하고, 모델 기반 파티클 필터(particle filter)

와 데이터 기반 예측 접근 방식을 활용하였다. 그리고 엔트로피 기반 융합 예측 모델을 활용하여 여러 시간의 예측 결과들을 융합하였다.

지속적인 모니터링을 통해 축적된 시스템 상태 데이터를 기반으로 시스템의 잔여 유효 수명(RUL, Remaining Useful Life)을 예측할 수 있다. 특히 전력 전자 분야에서 다양한 데이터 기반 방법이 제안되었는데, 예를 들어 통계 회귀 기반 방법[30-31], 신경망[32], 베이지안 필터[33], 주성분 분석(principal component analysis)[34], 가우스 프로세스 회귀[35,36] 등을 활용한 방법들이 있다. 데이터 기반 방법의 경우, 센서값의 품질과 특징들(features)에 따라 정확한 RUL을 예측할 수 있다. 연구[37]는 노이즈가 많고 비주기적인 건전성 모니터링 방식에 따른 전력 장치의 건전성 추정 및 RUL 예측 방법을 제안하였다. 전력 장치의 정확한 RUL 예측하고, 암묵적인(implicit) 단조(monotonic)의 건전성 변화를 추적하기 위해 감마 상태 공간 모델에 기초한 프레임워크를 제안하였다.

## 2. Fault tree를 활용한 시스템 건전성 진단 기법

PHM은 시스템의 모델이나 과거 데이터를 기반으로 시스템의 현재와 미래 건전성을 추정한다. 따라서 건전성 추정 결과의 정밀도를 향상시키기 위해 시스템 모델의 정확성과 수집된 데이터의 양과 질이 중요하다.

반면 FT를 활용한 시스템 건전성 진단 기법은 현재 시스템의 구조와 상태를 기반으로 현재 시스템의 건전성을 진단한다. 따라서 현재 시스템의 상태를 잘 반영할 수 있도록 시스템에 대한 멀티 분석이 필수적이다.

FTA는 시스템을 반영한 FT를 기반으로 해당 시스템의 신뢰성 및 안전성 평가를 수행하기에 효과적인 기법으로 광범위하게 사용되고 있다. 논리 게이트를 활용하여 시스템을 분석하고, 가능한 시스템 고장 조합의 발생 확률을 계산하여 상응하는 조

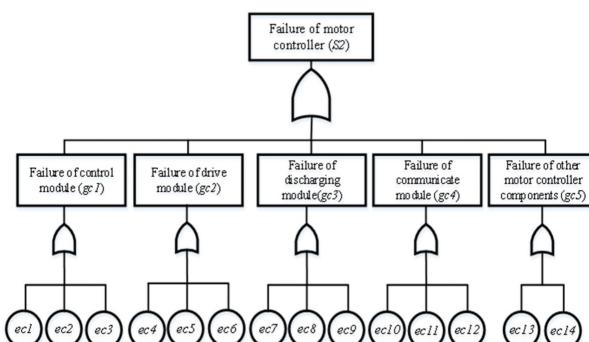


그림 2. 모터 제어기 FT [39].

처를 함으로써 시스템 신뢰도를 향상시킬 수 있다[38]. 연구[39]는 구동 모터 및 모터 제어기의 서브 어셈블리와 부품의 이론적 고장률을 먼저 예측하였다. 이어서 고장을 예측 결과, 구동 모터 및 모터 제어기의 FT(그림 2)를 기반으로 전체 모터 시스템의 신뢰성을 분석하였다. 연구[40]는 공랭식 냉동시스템의 신뢰도를 높이기 위해 FTA를 활용하여 고장 메커니즘에 기초한 모델을 구축하였다.

시스템의 규모가 커짐에 따라 FT의 크기와 복잡성도 증가하여 높은 계산 비용이 요구되고, 문제의 복잡성으로 인해 일부 신뢰도 분석 방법을 적용할 수 없는 경우가 발생하기도 한다[41,42]. 시스템이 발전함에 따라 다양한 부품이 사용되고 복잡하게 구성됨으로써 시스템이 동적인 특성을 갖게 되었다. 그러나 기존의 정적 FTA는 시스템의 동적 특성을 고려하지 못하여, 고장 간의 통계적 의존성을 모델링할 수 없다[43,44]. 이로 인해 동적 특성을 가지는 시스템에 대한 정확한 신뢰성 분석에 어려움이 발생했다. 신뢰성 분석은 사전의 일정한 고장 확률을 기반으로 수행되지만, 실제 시스템에서는 많은 부품이 피로와 노화로 인한 시간 의존적인 고장률을 가지고 있으며, 기존 FTA에서 이러한 부분이 고려되지 않았다[17,42]. 이외에도 FT는 장비의 부분적인 고장을 고려할 수 없다. 부분적으로 작동하는 장비의 경우, 이 구성 요소가 완전히 고장난 것으로 가정한다[45]. 마지막으로 FTA를 활용하여 시스템을 분석할 때 시스템 전문가들의 지식을 활용하는 경우가 많은데 이러한 전문가들의 지식과 평가는 불완전하고 편파적일 수 있다[46].

정적 FTA가 가지는 많은 문제점을 해결하기 위하여 RBD, BDD, MC, 의사결정 나무(DT, Decision tree), BN, Fuzzy FTA, 페트리 넷(PN, Petri Net), MC simulation, 신경망(NN, Neural Network) 등 다양한 신뢰도 분석 기법들을 접목하여 시스템의 신뢰도를 분석하는 연구들이 수행되고 있다. 연구[47]는 시스템의 신뢰성을 분석하기 위한 방법으로 신뢰성 블록 다이어그램(RBD, Reliability Block Diagram) 및 베이지안 네트워크[48]와 같은 FTA와 유사한 접근법이 있음을 보여주었다. 이와 함께 동적 FT(DFT) 또는 동적 RBD를 활용해 시스템을 분석하고, 그 결과를 동적 베이지안 네트워크로 변환되어 시스템의 신뢰성을 추정할 수 있다[49-51].

### 2.1. 이진 결정 다이어그램

이진 결정 다이어그램(BDD)을 활용하여 FT를 분석하면 시스템의 정량적 분석과 중요 구성 요소를 식별할 수 있으며, 시스템에 큰 영향을 미치는 중요 위험을 식별할 수 있다. 시스템의 신뢰도를 계산하는데 필요한 FT의 컷 셋을 다루는 새로운 방법으로

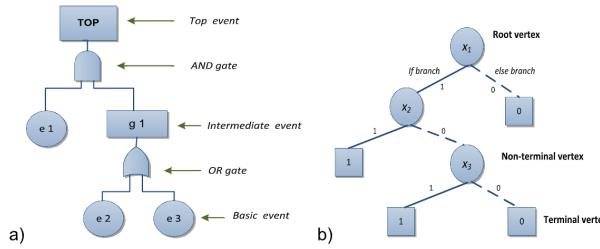


그림 3. a) FT 구조; b) BDD 구조 [54].

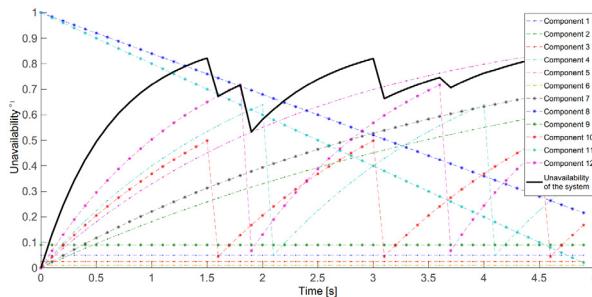


그림 4. 시스템의 비신뢰도의 예 [58].

BDD를 사용할 수 있다[52,53]. 그림 3은 FT와 BDD를 나타낸 것으로, 좌측의 FT를 우측의 BDD로 변환한 결과를 보여준다. BDD의 모델로부터 설계된 수학적 모델을 통해 기본 사건의 확률을 기반으로 시스템의 신뢰성을 추정할 수 있다[54,55]. 연구[56,57]는 BDD에 기반한 방법을 활용하여 시스템의 fault tree를 분석하고, 이를 통해 시스템의 중요 부품들을 식별하였다. 연구[58]는 정성적 분석을 기반으로 복잡한 시스템의 정량적 신뢰성 분석을 용이하게 하기 위해 FT와 BDD를 활용한 새로운 접근법을 제시하였다. FT를 활용하여 시스템의 작동과 구성 요소 간의 논리적 상호 관계를 표현하고, BDD에 기반한 시스템의 신뢰성에 대한 함수를 통해 시스템의 신뢰성을 계산하였다. 그림 4는 시스템의 비신뢰도(unreliability)를 분석한 예로, 12개의 부품들의 비신뢰도를 기반으로 전체 시스템의 비신뢰도를 계산하였다.

## 2.2. 신뢰성 블록 다이어그램

신뢰성 블록 다이어그램(RBD)은 시스템의 구성 요소를 그래프으로 표현하고, 이러한 구성 요소가 어떻게 신뢰성 측면에서 관련되는지 보여준다. RBD는 부품의 기능 상태 측면에서 시스템의 기능 상태(정상 또는 고장)를 나타낸다. BRD는 직렬 구성 시스템, 병렬 구성 시스템, 혼합 구성 시스템, k-out-of-n 시스템 구성 등 매우 다양한 방법을 사용하여 복잡한 시스템의 신뢰성과 가용성(availability)을 분석할 수 있다[59,60]. 연구[59]는 LHD(Load-Haul-Dumpers) 시스템의 신뢰성을 평가하기 위해

기능적 흐름도를 기반으로 하는 FTA와 RBD를 사용하였다. 연구[60]는 첨단 제조 시스템에 사용되는 복잡한 로봇 시스템을 위한 통합 FTA-RBD 모델을 개발하였다. 시스템의 신뢰도를 평가하기 위해 의사결정 나무(decision tree) 기반 위험 함수를 제안하였다. HDT(Hazard Decision Tree)의 역방향 계산 절차를 사용하여 시스템의 신뢰도를 분석하였다. 또한 로봇 시스템에 대해 누적 위험률과 평균 고장률에 대한 두 가지 분석 개념에 대해 논의하였다.

## 2.3. 베이즈 네트워크

베이즈 네트워크(BN)는 불확실성 문제를 다루는 분야에서 가장 인기 있는 방법 중 하나이다. 시스템의 고장과 고장의 원인 사이에는 불확실성이 존재하므로 BN을 활용하여 불확실한 추론 문제를 해결할 수 있다. 연구[48]는 FT와 BN을 결합하여 시스템 고장 진단에 적용하였다. 해당 연구에서 제안된 FT와 BN을 결합하는 방법은 사전 지식을 충분히 활용하여 데이터 품질뿐만 아니라 데이터양에 대한 요구 사항도 낮다. 연구[17]는 플레이 시스템의 신뢰성 평가를 위해 FTA와 DBN(Dynamic Bayesian Network)을 사용하였다. DBN은 고전적인 BN의 확장으로, 시간에 따른 변수 집합의 시간적 진행을 명시적으로 모델링하기 위한 유연한 구조와 독특한 모델링 메커니즘을 제공한다[61]. 해당 연구에서는 FT를 DBN에 매핑하여 위험 이벤트의 발생 확률을 추정하여 이벤트 간의 종속성 문제를 해결하였다.

연구[62]는 FT 기반의 신뢰도 계산의 비용을 줄이고 최소 컷셋을 찾는 것을 피하고자 DFT의 사건들을 BN 노드로 변환하는 방법을 제시하였다. 연구[63]는 DFT 분석 및 DBN을 기반으로 시스템 고장을 진단하는 정보 융합 방법을 제시하였다. 먼저 DFT를 사용하여 동적 결함 특성을 분석하고, 간격 번호(interval number)를 사용하여 기본 사건의 고장률을 평가하였다. DFT를 DEN에 매핑하여 각 사건의 중요도 지표를 계산하였다. 센서 데이터에 따라 신뢰성 분석 결과를 업데이트하고 시스템 진단을 최적화하기 위한 새로운 진단 알고리듬을 설계하는데 활용하였다.

## 2.4. Fuzzy FTA

FTA에서 발생할 수 있는 부정확한 정보와 모호성을 처리하기 위해 퍼지 논리를 결합한 FFTA(Fuzzy-FTA)가 제안되었다[64]. 기본 사건의 고장 확률을 정량적인 값으로 변환하여 분석 계층 프로세스(analytic hierarchy process) 등의 의사결정 방법을 적용하여, 시스템의 신뢰도를 분석하였다[65-67]. 연구[68]는 실시

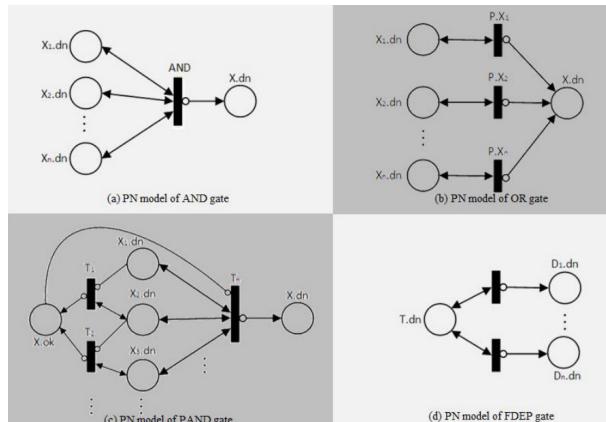


그림 5. DFT 논리 게이트의 PN 모델 [70].

간 연속 입력 데이터를 처리하는 RC-FFTA(Real-Time Continuous Fuzzy Fault Tree Analysis) 모델을 제안하였다. 기존의 FFTA 방법은 기본 사건의 고장 가능성을 계산했으나, 제안된 모델은 기본 사건이 최상위 사건에 미치는 영향을 고려하여 기본 사건들의 고장 확률을 구하였다. 선박의 센서들을 통해 순간 데이터를 수신하고, 알고리즘을 기반으로 위험 발생 확률을 연속적으로 계산하였다.

## 2.5. Petri Net (PN)

시스템 또는 임무의 신뢰성을 평가하기 위해 페트리 넷(PN, Petri Net)을 사용한 모델링에 관한 연구가 진행되고 있다. FTA와 PN를 접목함으로써 모든 부시스템의 모든 고장 모드와 시스템의 임무에 대한 신뢰도 분석이 가능하다. 또한 임무가 변경됨에 따라 PN을 쉽게 수정할 수 있다[69]. 연구[69]는 FTA와 PN을 결합하여 AGV(Automated Guided Vehicle)의 효과적인 신뢰도 평가 방법을 제안하였다. 개발된 기술을 사용하여 AGV 임무에서 중요한 단계를 식별하고 실패 확률을 획득하였다. PN 시뮬레이션은 다양한 작업을 수행하는 복잡한 AGV 시스템의 신뢰성을 분석할 수 있는 효율적인 방법으로 확인되었다. 연구[70]는 대수적 솔루션, PN 및 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 DFT의 하위 FT를 계층적으로 분석하고 정량화하는 방법을 제안하였다. 그림 5는 DFT의 논리 게이트를 PN 모델로 변환 예이다. 연구[71]는 FTA와 PN을 결합하여 시스템의 신뢰성을 평가하였다. 시스템의 임무에서 중요한 단계를 식별하고 임무의 실패 확률을 계산하였다. PN 시뮬레이션을 통해 다양한 작업을 수행하는 복잡한 시스템의 신뢰성을 효율적으로 분석할 수 있음을 보였다.

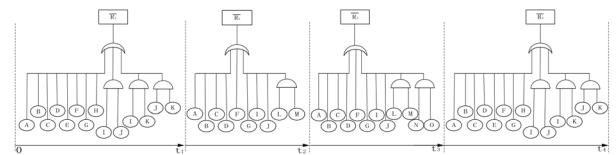


그림 6. PMSoS 단계별 FT [77].

## 2.6. Neural Network

FT의 다양한 한계를 극복하기 위해, 시스템의 FT를 ANN(Artificial Neural Network)로 변환하여 시스템의 신뢰성 평가에 적용할 수 있다. FT를 ANN으로 변환하는 알고리즘에 관한 연구들이 수행되고 있다. 연구[42]는 FT의 정보를 기반으로 ANN 위험 평가 모델을 개발하기 위한 방법론을 제안하였다. ANN의 아키텍처 및 구성과 FT 구조와의 연관성을 분석하여 FT를 ANN에 매핑하는 방법을 제안하였다. 연구[72]는 IoT에서 결함을 진단하기 위해 FTA와 퍼지 신경망(Fuzzy NN)을 기반으로 한 지능형 신뢰도 분석 방법을 제시하였다. FNN 모델은 연결 가중치와 임곗값을 수정하고 고장 간의 비선형 매핑 관계를 얻도록 훈련되었다.

## 2.7. 단계적 임무 시스템(Phased mission system)

단계적 임무 시스템(PMS)은 여러 개의 연속적이고 중복되지 않는 임무를 수행한다. 단일 임무 시스템의 경우와 비교하여, PMS의 신뢰성 분석은 시스템(구성 요소)의 서로 다른 단계 간의 상관관계로 인해 더 복잡하다. 특히, 시스템과 부품이 수리 불가능한 것으로 가정할 경우, 시스템(부품)은 이전 단계의 끝과 다음 단계 시작 시 동일한 상태를 가져야 한다. 연구[73]는 복구 불 가능한 PMSoS(Phased Mission System of Systems)의 신뢰성 추정을 수행하기 위해 개선된 다중값 의사결정 다이어그램(MDD) 알고리듬을 제안하였다. 임무 전반에 걸친 공통 고장 기본 임무(CFBM, Common Fault Basic Mission)에 따라 단순화된 고장 모드를 기반으로 단계별 FT를 설계하였다. 기본 이벤트는 CFBM을 기반으로 정렬되고, 단순화된 고장 트리 모델에서 MDD를 생성하였다. 이를 바탕으로 PMSoS의 임무 신뢰성을 추정하였다. 그림 6은 PMSoS의 임무 단계별 FT를 나타낸 것으로, 시간별 시스템이 수행하는 임무에 따라 시스템의 구성이 바뀔 수 있고 그로 인해 임무별 FT로 다른 형태를 나타내게 된다. 연구[74]는 대수 규칙과 부울 분리 알고리듬을 결합하여 FT 모델을 기반으로 한 임무 신뢰성 예측 기법을 제안하였다. 제안된 신뢰성 예측 기법은 계산의 복잡성과 정확도 및 엔지니어링 개발 난이도를 고려

하여 마이크로 컴포넌트의 교체를 기반으로 FT 분석하여 멀티 모드 고장 시 단계별 미션 시스템의 신뢰성 모델링 및 예측 문제를 해결하였다. 연구[75]는 무작위 충격이 발생하는 PMS의 신뢰도를 분석하기 위해 FT, MRGP(Markov Regenerative Process) 그리고 PMS-BDD를 활용하였다. 복합한 시스템의 FT 모델을 모듈화하여 분할하였다. MRGP를 활용하여 각 FT와 무작위 충격을 상태 공간 모델(state space model)로 통합하였다. 몬테카를로 방법을 활용하여 무작위 충격을 고려한 각 모듈의 신뢰성을 분석하였다. 마지막으로 PMS-BDD를 활용하여 각 모듈을 통합하여 전체 PMS의 신뢰성을 분석하였다.

### 3. 부품 단위의 건전성 진단

시스템의 건전성을 진단하기 위해서는 다양한 정보가 필요하다. 시스템을 구성하는 센서와 구동기와 같은 장비들의 고장 확률뿐만 아니라 다양한 건전성 정보를 획득할 수 있다면 시스템 건전성 진단의 정확도를 높일 수 있다. 장비의 건전성 정보를 추정할 수 있는 다양한 방법 중에 자체 검증 다기능 센서(self-validating multifunctional sensor)는 데이터 수집 장치 및 프로세서와 같이 다양한 장치로 구성된다. 프로세서는 FDIR(Fault Detection, Isolation and Recovery), 불확실성 추정, 측정값 상태, 건전성 평가 및 예측을 포함한 자체 검증 알고리즘을 구현하는데 사용된다[76]. FDIR은 특정 고장에 대한 고장 감지, 격리 및 복구를 통해 센서 시스템의 지속적이고 안정적인 작동을 보장하는 자체 적응적 방법론이다[77]. 하드웨어 다중화[78-80], 인공 신경망[81,82], 다항식 임펄스 반응 예측 필터[83,84]를 통해 FDIR 모델에 대한 연구가 진행되고 있다. 장비의 건전성은 성능 및 작동 모드와 관련이 있을 뿐만 아니라 환경의 영향을 받는다. 따라서 장비의 구조뿐 아니라, 타 장비의 영향력, 장비의 성능 저하 과정에 기초한 퍼지 이론[85], 계층 분석 방법 및 정량 방법 등을 종합적으로 활용하여 건전성을 진단할 필요가 있다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 시스템의 건전성을 분석할 수 있는 FTA를 활용한 다양한 기법에 대해 알아보았다. 먼저 다양한 건전성 진단 기법 중 PHM과 이를 활용한 RUL 추정 기법에 대해 간단히 살펴보고, 이어서 FTA를 활용한 시스템 건전성 기법들을 비교·분석하였다. 단순히 FTA만을 활용하는 방법뿐 아니라, 기존의 건전성 진단 기법들을 함께 활용하여 시스템의 건전성을 진단하는 기법들을 알아보았다. 분석 대상 시스템에 따라 다양한 기법들을

결합하여 시스템의 건전성을 분석할 수 있다. 센서나 구동부 등 시스템을 구성하는 부품들에 대한 건전성 또는 다양한 정보들을 수집·융합함으로써 시스템 건전성 분석의 정확도를 높일 수 있을 것으로 전망된다. 시스템의 유지 관리의 중요성이 커짐에 따라 시스템 건전성 진단 기법에 대한 연구가 더욱 활발히 이루어질 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원(과제번호: NRF-2020M3 C1C1A02086313)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2018 K1A3A7A03089832).

## REFERENCES

- [1] N. Yodo, P. Wang, and M. Rafi, "Enabling Resilience of Complex Engineered Systems Using Control Theory," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 67, no. 1, pp. 53-65, March 2018.
- [2] A. Falcone and A. Garro, "Distributed Co-Simulation of Complex Engineered Systems by Combining the High Level Architecture and Functional Mock-up Interface," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 97, pp. 1-23, 2019.
- [3] K. Deng, X. Zhang, Y. Cheng, Z. Zheng, F. Jiang, W. Liu, and J. Peng, "A remaining useful life prediction method with long-short term feature processing for aircraft engines," *Applied Soft Computing*, vol. 93, pp. 1-10 2020.
- [4] F. Pedro and G. Marquez, "Binary Decision Diagrams applied to Fault Tree Analysis," *2008 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring*. Birmingham, UK, Jun. 2008.
- [5] S. Kabir, An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis," *Expert Systems with Applications*, vol. 77, pp. 114-135, 2017.
- [6] H. Arabian-Hoseynabadi, H. Oraee, and P.J. Tavner, "Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, pp. 817-824, 2010.
- [7] U.S. Department of Defense, "Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis," U.S., MIL-P-

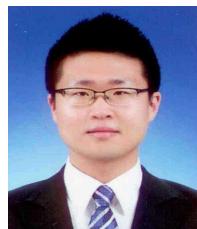
- 1629A, 1949.
- [8] M. Stamatelatos, W. Vesely, J. Dugan, J. Fragola, J. Minarick, and J. Railsback, "Fault tree handbook with aerospace applications," *Office of Safety and Mission Assurance NASA Headquarters*, U.S., 2002.
- [9] T.J. Leung and J. Rife, "Refining fault trees using aviation definitions for consequence severity," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 32, no. 3, pp. 4-14, Mar. 2017.
- [10] A. Aziz, S. Ahmed, F. Khan, C. Stack, and A. Lind, "Operational risk assessment model for marine vessels," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 185, pp. 348-361, 2019.
- [11] J.H. Purba, "A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 70, pp. 21-29, 2014.
- [12] J.H. Purba, D.T.S. Tjahyani, S. Widodo, and H. Tjahjono, "a-Cut method based importance measure for criticality analysis in fuzzy probability-Based fault tree analysis," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 110, pp. 234-243, 2017.
- [13] C.A. Ericson, "Fault tree analysis," *Proc. of System Safety Conference*, vol. 1, pp. 1-9, 1999.
- [14] Federal Aviation Administration. "U.S. Department of Transportation," *FAA Order 8040.4: Safety Risk Management*, 1998.
- [15] J.B. Dugan, S.J. Bavuso, and M.A. Boyd, "Fault trees and sequence dependencies," *Annual Proc. on Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 286-293, 1990.
- [16] J.B. Dugan, S.J. Bavuso, and M.A. Boyd, "Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 41, no. 3, 1992.
- [17] S. Kabir, M. Taleb-Berrouane, and Y. Papadopoulos, "Dynamic reliability assessment of flare systems by combining fault tree analysis and Bayesian networks," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1-18, 2019.
- [18] K. Buchacker, "Combining Fault Trees And Petri Nets To Model Safety-Critical Systems," *Proc. of Society for Computer Simulation International*, pp. 439-444, 1999.
- [19] B. Cai, X. Kong, Y. Liu, J. Lin, X. Yuan, H. Xu, and R. Ji, "Application of Bayesian Networks in Reliability Evaluation," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2146-2157, April 2019.
- [20] B. Cai, M. Xie, Y. Liu, Y. Liu, and Q. Feng, "Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 172, pp. 216-224, 2018.
- [21] F. Zhang, X. Xu, L. Cheng, L. Wang, Z. Liu, and L. Zhang, "Global moment-independent sensitivity analysis of single-stage thermoelectric refrigeration system," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 15, pp. 9055-9064, Dec. 2019.
- [22] J. Sadeghi, M.H. Esmaeili, and M. Akbari, "Reliability of FTA general vibration assessment model in prediction of subway induced ground borne vibrations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 117, pp. 300-3311, 2019.
- [23] B. Cai, X. Shao, Y. Liu, X. Kong, H. Wang, H. Xu, and W. Ge, "Remaining Useful Life Estimation of Structure Systems Under the Influence of Multiple Causes: Subsea Pipelines as a Case Study," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 7, pp. 5737-5747, July 2020.
- [24] B. Cai, X. Kong, Y. Liu, J. Lin, X. Yuan, H. Xu, and R. Ji, "Application of Bayesian Networks in Reliability Evaluation," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2146-2157, April 2019.
- [25] J.F.W. Peeters, R.J.I. Basten, and T. Tinga, "Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 172, pp. 36-44, 2018.
- [26] J. Xu, Y. Wang, and L. Xu, "PHM-Oriented Sensor Optimization Selection Based on Multiobjective Model for Aircraft Engines," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 9, pp. 4836-4844, Sept. 2015.
- [27] W. Li, H. Li, S. Gu, and T. Chen, "Process fault diagnosis with model- and knowledge-based approaches: Advances and opportunities," *Control Engineering Practice*, vol. 105, 2020.
- [28] N.M. Vichare and M.G. Pecht, "Prognostics and health management of electronics," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 222-229, March 2006.
- [29] Y. Wang, K. Jiang, and L. Xu, "Sensor-Data-Driven Fusion Prognostic Framework for Complex Engineered Systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 20421-20430, Sept.

- 2021.
- [30] S. Zhao, S. Chen, F. Yang, E. Ugur, B. Akin, and H. Wang, "A Composite Failure Precursor for Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction of Discrete Power Devices," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 688-698, Jan. 2021.
- [31] A. Ismail, L. Saidi, M. Sayadi, and M. Benbouzid, "Remaining useful life estimation for thermally aged power IGBT based on a modified maximum likelihood estimator," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, pp. 1-18, 2020.
- [32] A. Alghassi, S. Perinpanayagam, and M. Samie, "Stochastic RUL Calculation Enhanced With TDNN-Based IGBT Failure Modeling," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 65, no. 2, pp. 558-573, June 2016.
- [33] M.S. Haque, S. Choi, and J. Baek, "Auxiliary Particle Filtering-Based Estimation of Remaining Useful Life of IGBT," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2693-2703, March 2018.
- [34] W. Chen, L. Zhang, K. Pattipati, A.M. Bazzi, S. Joshi, and E.M. Dede, "Data-Driven Approach for Fault Prognosis of SiC MOSFETs," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 4048-4062, April 2020.
- [35] S.H. Ali, M. Heydarzadeh, S. Dusmez, X. Li, A.S. Kamath, and B. Akin, "Lifetime Estimation of Discrete IGBT Devices Based on Gaussian Process," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 395-403, Jan.-Feb. 2018.
- [36] A. Ismail, L. Saidi, M. Sayadi, and M. Benbouzid, "Remaining Useful Lifetime Prediction of Thermally Aged Power Insulated Gate Bipolar Transistor Based on Gaussian Process Regression," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 13, pp. 2507-2518, Sept. 2020.
- [37] S. Zhao, Y. Peng, F. Yang, E. Ugur, B. Akin, and H. Wang, "Health State Estimation and Remaining Useful Life Prediction of Power Devices Subject to Noisy and Aperiodic Condition Monitoring," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-16, 2021.
- [38] E. Ruijters and M. Stoelinga, "Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools," *Computer science review*, vol. 15, pp. 29-62, 2015.
- [39] X. Shu, Y. Guo, W. Yang, K. Wei, Y. Zhu, and H. Zou, "A Detailed Reliability Study of the Motor System in Pure Electric Vans by the Approach of Fault Tree Analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5295-5307, 2020.
- [40] F. Zhang, Y. Wang, Y. Gao, X. Xu, and L. Cheng, "Fault Tree Analysis of an Airborne Refrigeration System Based on a Hyperellipsoidal Model," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 139161-139171, 2019.
- [41] F.P.G. Márquez, I.S. Ramírez, B. Mohammadi-Ivatloo, and A.P. Marugán, "Reliability Dynamic Analysis by Fault Trees and Binary Decision Diagrams," *Information*, vol. 11, no. 6, 2020.
- [42] M. Sarbayev, M. Yang, and H. Wang, "Risk assessment of process systems by mapping fault tree into artificial neural network," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 60, pp. 203-212, 2019.
- [43] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, "Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 91, issues 1-2, pp. 46-53, 2013.
- [44] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, "Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, issue 8, pp. 925-932, 2011.
- [45] A.A. Baig, R. Ruzli, and A.B. Buang, "Reliability analysis using fault tree analysis: a review," *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 4, no. 3, pp. 169-173, June 2013.
- [46] D.A. Crowl and J.F. Louvar, *Chemical process safety: fundamentals with applications*, 3rd Ed., Pearson, London, 2011.
- [47] L. Zhifeng, Z. Wang, Y. Ren, D. Yang, and X. Lv, "A novel reliability estimation method of multi-state system based on structure learning algorithm," *Eksplotacja i Niezawodnosć - Maintenance and Reliability*, vol. 22, pp. 170-178, 2019.
- [48] Y. Zheng, F. Zhao, and Z. Wang, "Fault diagnosis system of bridge crane equipment based on fault tree and Bayesian network," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, issue 9, pp. 3605-3618, 2019.
- [49] K. Li, R. Yi, and Z. Ma, "Reliability analysis of dynamic reliability blocks through conversion into dynamic bayesian networks," *Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Bali, Indonesia, pp. 1330-1334, Dec. 2016.
- [50] J. Mi, Y. Li, H.Z. Huang, Y. Liu, and X. Zhang, "Reliability

- analysis of multi-state systems with common cause failure based on bayesian networks," *Proc. of the 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, Chengdu, China, pp.1117-1121, June 2012.
- [51] S. Montani, L. Portinale, A. Bobbio, and D. Codetta-Raiteri, "Radyban: A tool for reliability analysis of dynamic fault trees through conversion into dynamic Bayesian networks," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 93, issue 7, pp. 922-932, 2008.
- [52] F.P.G. Márquez, J.M.P. Pérez, A.P. Marugán, and M. Papaelias, "Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time," *Renewable Energy*, vol. 87, part 2, pp. 869-883, 2016.
- [53] F.G. Márquez, J. Papaelias, and R.R. Hermosa, "Wind turbines maintenance management based on fta and bdd," *Proc. of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*, Santiago de Compostela, Spain, pp. 4-6. March 2012.
- [54] A.A. Jiménez, C.Q.G. Muñoz, and F.P.G. Márquez, "Dirt and mud detection and diagnosis on a wind turbine blade employing guided waves and supervised learning classifiers," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 184, pp. 2-12, 2019.
- [55] C.Q.G Muñoz, F.P.G. Márquez, B. Lev, and A. Jimenez, "New Pipe Notch Detection and Location Method for Short Distances employing Ultrasonic Guided Waves," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 103. pp. 772-781, 2017.
- [56] A. Rauzy, "Mathematical foundations of minimal cutsets," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 50, no. 4, pp. 389-396, Dec. 2001.
- [57] Y. Dutuit and A. Rauzy, "Efficient algorithms to assess component and gate importance in fault tree analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 72, issue 2, pp. 213-222, 2001.
- [58] F.P.G. Márquez, I.S. Ramírez, B. Mohammadi-Ivatloo, and A.P. Marugán, "Reliability Dynamic Analysis by Fault Trees and Binary Decision Diagrams" *Information*, vol. 11, no. 6, 2020.
- [59] B. Jakkula, G.R. Mandela, and M. Ch. S N, "Reliability block diagram (RBD) and fault tree analysis (FTA) approaches for estimation of system reliability and availability – a case study," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 38, issue 3, pp. 682-703, 2021.
- [60] H. Fazlollahtabar and S.T.A. Niaki, "Integration of fault tree analysis, reliability block diagram and hazard decision tree for industrial robot reliability evaluation," *Industrial Robot*, vol. 44, issue 6, pp. 754-764, 2017.
- [61] R.E. Neapolitan, *Learning Bayesian networks*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 2004.
- [62] Z. Li, J. Gu, T. Xu, L. Fu, J. An, and Q. Dong, "Reliability analysis of complex system based on dynamic fault tree and dynamic Bayesian network," *2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)*, pp. 1-6, 2017.
- [63] R. Duan, Y. Lin, and Y. Zeng, "Fault diagnosis for complex systems based on reliability analysis and sensors data considering epistemic uncertainty," *Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability*, vol. 20, pp. 558-566, 2018.
- [64] R. Ferdous, F. Khan, R. Sadiq, P. Amyotte, and B. Veitch, "Fault and Event Tree Analyses for Process Systems Risk Analysis: Uncertainty Handling Formulations," *Risk Analysis*, vol. 31, pp. 86-107, 2011.
- [65] M. Abdelgawad and A.R. Fayek, "Comprehensive Hybrid Framework for Risk Analysis in the Construction Industry Using Combined Failure Mode and Effect Analysis, Fault Trees, Event Trees, and Fuzzy Logic," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 5 pp. 642-651, 2012.
- [66] K.C. Hyun, S.Y. Min, H.S. Choi, J.J. Park, and I.M. Lee, "Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 49, pp. 121-129, 2015.
- [67] J.H. Purba, J. Lu, D. Ruan, and G. Zhang, "A Hybrid Approach for Fault Tree Analysis Combining Probabilistic Method with Fuzzy Numbers," *Artificial Intelligence and Soft Computing*, vol. 6113, pp. 194-201, 2010.
- [68] Y.E. Senol and B. Sahin, "A novel Real-Time Continuous Fuzzy Fault Tree Analysis (RC-FFTA) model for dynamic environment," *Ocean Engineering*, vol. 127, pp. 70-81, 2016.
- [69] R. Yan, L. Jackson, and S. Dunnett, "Automated guided vehicle mission reliability modelling using a combined fault tree and Petri net approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, 2017.

- [70] S. Kabir, K. Aslansefat, I. Sorokos, Y. Papadopoulos, and S. Konur, "A Hybrid Modular Approach for Dynamic Fault Tree Analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 97175-97188, 2020.
- [71] R. Yan, L.M. Jackson, and S.J. Dunnett, "Automated guided vehicle mission reliability modelling using a combined fault tree and Petri net approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, issue 5, pp. 1825-1837, 2017.
- [72] Y. Chen, Z. Zhen, H. Yu and J. Xu, "Application of Fault Tree Analysis and Fuzzy Neural Networks to Fault Diagnosis in the Internet of Things (IoT) for Aquaculture," *Sensors*, vol. 17, no. 1, 2017.
- [73] R. Bian, Z. Pan, Z. Cheng, and S. Bai, "Improved MDD Algorithm for Mission Reliability Estimation of an Escort Formation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 51340-51351, 2020.
- [74] C. Liu, R. Wang, X. Wang, Y. Zhou, and W. Lu, "Reliability Analysis of Phased Mission System Based on Micro-Replacement Fault Tree," *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, pp. 1061-1067, 2018.
- [75] X.Y. Li, Y.F. Li, H.Z. Huang, and E. Zio, "Reliability assessment of phased-mission systems under random shocks," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 180, pp. 352-361, 2018.
- [76] Y. Chen, S. Jiang, J. Yang, K. Song, and Q. Wang, "Grey bootstrap method for data validation and dynamic uncertainty estimation of self-validating multifunctional sensors," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 146, pp. 63-76, 2015.
- [77] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim, and C. E. Seah, "A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 636-653, May 2010.
- [78] J. Frolik, M. Abdelrahman, and P. Kandasamy, "A confidence-based approach to the self-validation, fusion and reconstruction of quasi-redundant sensor data," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 6, pp. 1761-1769, Dec. 2001.
- [79] M. Henry and G. Wood, "Sensor Validation: principles and standards," *ATP International*, vol. 3, pp. 39-51, 2005.
- [80] M. Duta and M. Henry, "The fusion of redundant SEVA measurements," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 173-184, March 2005.
- [81] H.C. Cho, J. Knowles, M.S. Fadali, and K.S. Lee, "Fault Detection and Isolation of Induction Motors Using Recurrent Neural Networks and Dynamic Bayesian Modeling," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 430-437, March 2010.
- [82] F. Caccavale, P.C. Digilio, M. Iamarino, S. Masi, and F. Pierri, "A neural network approach for on-line fault detection of nitrogen sensors in alternated active sludge treatment plants," *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 62, no. 12, pp. 2760-2768, 2010.
- [83] Z. Shen and Q. Wang, "Status self-validation of a multifunctional sensor using a multivariate relevance vector machine and predictive filters," *Measurement Science and Technology*, vol. 24, 2013.
- [84] Z. Shen, F. Zhu, and Q. Wang, "Research on state self-validation of multifunctional sensor based on PFP-WRVM," *Chinese Journal of Scientific Instrument*, vol. 33, pp. 1986-1994, 2012.
- [85] X. Jijian, "Fuzzy Mathematics Method and Its Application," *Huazhong University of Science and Technology Press*, Chian, 2018.

## 저자 약력



## 변 성 일

- 2011년 경북대 전자공학부 졸업.
- 2013년 동 대학원 석사.
- 2013년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 박사 과정.
- 관심분야는 신뢰도 분석, 안전 필수 시스템 등.



## 이 동 익

- 1987년 경북대학교 전자공학과 졸업.
- 1990년 경북대학교 전자공학과 대학원 석사.
- 1990년~1997년 국방과학연구소 연구원.
- 2002년 영국 세필드대학교 자동제어시스템 공학과 박사.
- 2002년~2005년 영국 DRTS Ltd 공동설립 및 CTO.
- 2005년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수.
- 관심분야는 고장진단 및 고장대처, 시스템 안전, 무인잠수정 및 무인수상선 자율제어 등.