

# FT구축 및 평가를 위한 FTA방법의 일반적 고찰(I)

- A Review of FTA Methods for FT Construction &  
Evaluation(I) -

박주식\*

Joo-sic, park

김길동\*\*

Gil-dong, kim

강경식\*\*\*

Gyung-sic, kang

박상민\*\*\*\*

Sang-min, park

## Abstract

This paper reviews and classify fault-tree analysis methods developed since 1960 for system safety and reliability. Fault-tree analysis is a useful analytic tool for the reliability and safety of complex systems. The literature on fault-tree analysis is, for the most part, scattered through conference proceedings and company reports.

This paper classify the literature according to system definition, fault-tree construction, qualitative evaluation, quantitative evaluation, and available computer codes for fault-tree analysis.

## 1. 서 론

FTA(Fault Tree Analysis)는 Bell Telephone Laboratories에서 근무한 H.A. Watson에 의해 1961년도에 처음 소개된 것으로, 미공군의 Minuteman Missile 발사 제어 시스템을 연구 개발하기 위해 개발된 것이다[5].

---

본 논문은 1998년 충청대학 산학협력진흥연구비에 의해 수행되었음.

\* 명지대학교 산업공학과 박사과정

\*\* 충청대학 품질관리과 부교수

\*\*\* 명지대학교 산업공학과 교수

\*\*\*\*인천대학교 산업공학과 교수

1965년 워싱턴 대학 및 보잉 항공사에서 주최한 Safety Symposium에서 FTA의 장점들을 여러 연구논문들이 설명하였다[41]. 이들 논문들의 소개를 통하여 FTA가 핵반응기들과 같은 복잡한 동적 시스템들의 시스템 안전 및 신뢰성 도구로서 사용가능하다는 관심이 널리 확산되기 시작하였다.

그리고 FT(Fault Tree) 분석을 산업분야에 적용시키고자 하는 관심은 Reactor Safety Study[37]를 통하여 그 중요성이 소개되었다.

FTA는 신뢰성 및 안전성을 계산하는데 필요한 유용한 도구이다. 그러나 FTA 모델들을 실행하는데는 여러 가지 어려운 점이 따르는데, 그 중 가장 큰 문제점은 FTA 모델을 시스템에 처음 시도할 경우 개발비용이 많이 소요된다는 것이다.

고장 모드 영향분석(FMEA : Failure-Mode-and-Effects Analysis)과 같은 몇몇 귀납적 분석기법은 단일-지점 고장분석(single point failure analysis)과 같은 규모가 작은 시스템들의 분석시 적용하는데 있어서 훨씬 단순하고 보다 비용이 적은 효과적인 기법이다. 하지만, 보다 복잡하고 재해가 연속적으로 발생하는 시스템들에서는 적용하기가 어렵기 때문에, FTA와 같은 기법이 적용된다. FTA는 시스템에 영향을 미칠 수 있고, 시스템 고장의 원인이 되는 휴먼 에러 및 환경조건들을 연관시켜서 표현할 수 있도록 이들을 기본사상들로 고려하여 시스템 상태를 효율적으로 분석할 수 있다. FTA를 자동화시킬 수 있는 연구가 빠른 속도로 진행됨으로서, 이러한 기법은 보다 효과적일 수 있으며, 정교한 분석적 신뢰성 도구로 이용할 수 있다[1].

본 연구에서는 1961년도부터 최근까지 FTA구축 및 평가방법에 관한 연구논문들을 상세히 분류하였으며, 대표적인 연구기법들을 소개하고자 하였다.

시스템의 신뢰성을 최적화하는 문제[43, 44], 유지된 시스템들의 가용도(availability)에 관한 문제[30], 시스템 효율성 모델에 관한 문제[45], 복잡하고/대규모의 시스템들을 위한 시스템 신뢰성 평가 기법들에 관한 문제[25], Bayes 신뢰성 및 가용도에 관한 문제[46]들을 토대로 조사한 것이다.

## 2. FT 구축

고장을 예측하는 방법으로는 부품의 고장으로부터 시작하여 제품 전체의 고장을 예측하는 고장 모드 영향 분석(FMEA)과 제품의 고장으로부터 고장 원인의 부품을 예측하는 결함나무(FT) 분석 기법을 생각할 수 있다. 특히 결함나무 분석 기법은 시스템의 고장을 도해적으로 표현하므로써 시스템의 구조를 충분히 이해할 수 있고, 고장을 연역적으로 찾아감으로써 고장의 형태를 계통적으로 파악할 수 있기 때문에 시스템이나 기계설비, 또는 제품의 구조가 복잡할 수록 유용하게 사용된다.

FT 구축의 목적은 정상사상(Top-event)을 발생시킬 수 있는 시스템 상황을 모델링 하는데 있으며, FT를 구축하기 전에 시스템에 대한 전체적인 이해가 요구된다. 분석가는 FT의 구축시 만들어진 가정들과 사용된 시스템의 기술 내용들을 모두 분명히 나타내야 한다.

FT 구축에 있어서 첫 번째 단계는 분석의 주체가 될 정상사상을 정의하는 것이며, 모든 후속사상은 그것이 정상사상에 미치는 효과 측면에서 고려될 것이다. 다음 단계

는 발생할 정상사상에 직접적으로 원인이 될 수 있는 중간사상 및 기본사상들(branch events)을 확인하는 것이다. 적어도 다음과 같은 네가지의 확률이 존재한다[22, 28] ;

- ① 작동신호와 같은 구성요소에 관련한 어떠한 입력 신호도 받아들이지 못하는 경우
- ② 구성요소 자체가 실패를 경험해서 작동하지 못하는 경우
- ③ 운전조작을 못하거나 구성요소를 적절히 설치하지 못하는 것과 같은 인간에러
- ④ 일반적인 고장원인의 외부 사상들이 발생하여 구성요소의 작동을 방해하는 경우

일반적으로 FT를 구축하는 작업은 상당히 복잡하며, 시간이 많이 소요된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 컴퓨터 지원 체계 하에서 여러 가지 방법들이 제안되고 있는데, <표 1>은 이러한 FT 구축 방법을 정리한 것이다

<표 1> FT 구축방법

개발자	컴퓨터 코드 및 알고리즘	내 용
David Haasl[12]	Structuring process	게이트의 사용 형태와 게이트의 입력 형태를 결정하기 위한 규칙들을 설정
J.B.Fussell[17]	DRAFT	전자 시스템을 설계하기 위한 것으로, Fussell이 개발한 STM (Synthetic Tree Model) 모형도를 통해 추적하여 여러 가지 전환 기능들의 구성요소들을 결합시키면서 최종 FT를 구축한다.
G.J. Powers, F.C.Tomkins[35]	Powers & Tomkins method	첫 번째 고장이 발생하는 시스템을 블록으로 구성하여 트리를 체계적으로 구성할 수 있도록 쌍으로 형성시켰으며, 시스템의 단일 구성요소에 대한 변수들 및 고장사상들 간의 원인-결과 관계
S.L.Salem, G.Apostolakis, D.Okrent[38]	CAT code	기계, 전기, 수력 및 인간의 상호작용과 일반적 영향요인들을 모델링하기 위한 컴퓨터 실행방법으로서 의사결정 테이블들을 기초로 사용하며, 시스템을 따라 추적을 하여 FT를 구축하고, 구성요소들을 쌍으로 하여 단계적으로 절차를 편집해 간다.
S.A.Lapp, G.J.Powers[29]	FTS	시스템을 구현하기 위해 처음으로 계산척(diagraph)을 개발하였으며, FT 합성 알고리즘을 사용하여 분석하였다.
J.R. Taylor, E.Hollo[42]	CCD	대수적 요인 모델을 사용하였으며, 복잡한 시스템들의 신뢰성 및 안전성 분석을 행하는데 널리 이용하고 있으며, 분석절차 및 사고 연쇄 결과들을 쉽게 이해할 수 있다.

### 3. Fault Tree 평가

#### 3.1 정성적 평가

적절히 구축된 FT의 주요 장점 중의 하나는 기본사상들이 어떻게 정상사상을 산출하는데 결합될 수 있는가에 대한 정보를 구체화 해 주는 것이다. 이러한 정보를 추출하는 것을 정성적인 FT 분석 혹은 컷-셋(Cut Set) 분석이라고 한다. 정성적인 FT 분

석은 구축된 FT가 기본사상들을 독립변수로, 중간사상 및 정상사상들을 종속변수로 하는 불(Boolean) 대수 등식의 집합으로 설명할 수 있다는 기본원리에 의해 진행된다. 이러한 등식들은 이때 정상사상이 기본사상들의 곱의 합으로서 표현되도록 불 대수 규칙을 적용함으로써 단순화시킬 수 있다[28, 33]. 이러한 불 합의 각 곱항은 정상사상의 원인이 될 수 있는 집합 즉, 컷-셋을 나타낸다. 이러한 컷-셋들은 최소 컷-셋(MCS ; Minimal Cut Sets)을 구하기 위해 흡수법칙을 적용하여 더 단순화할 수 있다. 만약 컷-셋은 더 줄어들지 않고 유일한 컷-셋으로 남는다면 그 컷-셋은 최소가 된다.

MCS는 FT에 관한 유용한 정보를 모두 제공한다. 고장에 대한 중요도 평가는 MCS의 크기에 따라서 MCS를 순서화 함으로서 구할 수 있으므로, MCS에 관련된 고장확률은 컷-셋의 크기가 커짐에 따라 크기 순서대로 감소하기 때문에 크기에 따른 순위는 MCS는 중요도에 대한 일반적 지표를 제공한다. 또한 MCS 정보는 설계 기준의 어떠한 구성요소도 시스템을 고장나지 않게 할 것이라고 한다면, 이것은 그 시스템이 어떠한 구성요소도 MCS에 포함되지 않는다고 할 수 있으며, MCS를 점검하여 봄으로써 이러한 기준이 충족되는지를 알아 볼 수 있다[22, 33]. 컷-셋 및 MCS를 결정하는 일반적인 방법의 특징은 <표 2>와 같다[23].

<표 2> 컷 셋 및 미니멀 컷 셋 결정 방법의 특징

방 법	특 성	장 점	단 점
몬테칼로 방법	①구성요소의 통계적시행 ② 시뮬레이션 방법	①현실적인 MCS를 구함. ②트리 크기에 관계없이 적용	①확률적 정보가 필요 ②MCS가 적은 경우 부적합
확정적 방법	불 대수 방법	①프로그래밍과 이해 용이 ②구성요소 작은 MCS용이 ③다른 방법 보다 용량이 작다	①구성요소 작은 MCS용이 ②소요시간이 길다.
	Matrix 증가법	①구성요소 많은 MCS 용이 ②모든MCS 가능(대용량tree) ③ 신속한 개선	①소수(prime number) 사용 ②용량이 많이 필요

정성적 FT 분석은 MCS, 최소 패스-셋(Minimal Path Sets), 우연 원인 고장(Common cause failures)들을 결정하기 위해 실시하는 것이다. MCS를 결정하기 위한 주요 방법들은 몬테칼로 방법(Monte Carlo simulation)과 확정적 방법(deterministic methods)으로 분류한다.

MCS를 구하기 위한 몬테칼로 방법 절차는 먼저 시간의 변화에 따른 각 구성요소의 고장을 찾아내는 것으로, 보통 지수고장분포를 따른다고 가정한다. 고장에 따른 이들 시간들은 각 구성요소가 일정하게 분포한 0과 1사이의 확률로 먼저 계산하여 선택하며, 이때 시간에 따라 변하는 고장을 찾아내는 것이다. 몬테칼로 실행에서, 시간변화에 따른 고장은 각 구성요소들을 대상으로 산출하며, 이때 구성요소들의 상태들은

고장사상의 집합이며, 정상사상을 구할 때까지 시간은 점차 증가하게 된다. 따라서 컷-셋을 축소하여 MCS를 만들어 낸다[27, 38].

확정적 방법에 대한 기본적 개념은 불 대수를 사용하여 기본사상들의 요인(구성요소)에 따라 FT의 정상사상을 직접 확장하거나 혹은 감축한다는 것이다[19, 20].

우연-원인 고장(Common-cause failure)이란 다수의 구성요소들에서 발생하는 임의의 고장 발생 또는 조건을 말하며, 중요 우연-원인 사상(Important common-cause event)이란 하나 또는 그 이상의 MCS에 모든 기본사상들이 공통적으로 포함되는 이차적 고장의 원인을 말하며[9, 50, 51], 우연-원인 고장 분석을 위한 세 개의 대표적인 정성적 평가 방법을 <표 3>에 소개하였다.

### 3.2. 정량적 평가

FT의 정량적 평가의 첫 단계는 기본사상들을 고려하여 정상사상을 구조적으로 표현하여야 한다. MCS들을 찾아내는 것은 이 단계를 달성하는 또 하나의 방법이다. 만약 모든 기본사상들의 발생을 및 결합의 지속시간을 알고 있다면, 그리고 각 기본사상이 통계적으로 종속성이 있다는 것을 알고 있다면(또는 가정한다면), 이때 정상사상의 통계적 예측치 및 확률을 결정할 수 있다[29].

코히런트(coherent) 구조이론의 관계는 FT들을 불 식으로 표현하여 설명할 수 있으며[4], 시스템의 고장보다는 시스템 성공을 나타내고자 할 때, 신뢰성 기초이론으로 코히런트 구조이론을 설명한다.

코히런트 결합나무의 MCS 및 패스-셋들은 MOCUS[19], MICSUP[34], PREP & KITTT[49] 코드들 중 하나를 사용하여 구할 수가 있다. 이때 시스템 불가용도(unavailability)는 다음 둘 중 하나를 사용하여 계산할 수 있다 ;

1) 기본사상들이 컷-셋들에서 반복적이지 않으며, 모든 기본사상들이 통계적으로 독립인 기본사상들을 곱의 합으로 표현한 트리의 구조함수를 MCS들과 패스 셋들을 정확히 사용하여 나타낸다[14]

2) 다음과 같은 표준 방법들 중 하나를 사용하여 나타낸다[15].

- ① MCS들에서 정상사상의 상.하한 확률 범위를 구하기 위한 종속적-배타적 방법 (inclusion-exclusion method)
- ② 기본사상들이 통계적 독립일 때, MCS의 하한범위와 최소 패스의 하한범위
- ③ 통계적으로 종속적인 기본사상들의 최소-최대한계(min-max bound)

유사한 진행방법으로 논코히런트(noncoherent) 결합나무들의 분석을 실시할 수 있다. 코히런트 구조들 하에서는 MCS들을 찾아내어 분석하는 반면에, 논코히런트 FT들에서는 주항(prime implicant)들을 찾아내어 분석한다. 주항이란 간략화하는 과정에서 변수에 의해 표시된 모든 항을 논리곱의 합 형식으로 모두 찾아낼 경우 이들 논리곱의 합 항을 말하며, 이것들을 구하기 위한 알고리즘들은 많이 개발되어 왔다[10, 31, 54].

1960년대 후반에, 기본사상들의 확률적 정보 및 정상사상의 확률적 정보에 이르기까지

<표 3> 정성적 평가 방법

분류	개발자	컴퓨터 코드 및 알고리즘	주요 내용
미니멀 컷셋 결정 방법	몬테칼로 방법 Salem, Apostolakis, Okrent[38]	CAT code	의사결정 테이블을 토대로 시스템을 따라 추적을 하여 FT를 구축하고, 구성요소들을 쌍으로하여 단계적으로 절차를 편집해 간다.
	Vesely, Narum [49]	PREP (FATE option)	시간의 변화에 따라 나타나는 각 구성요소의 고장을 찾아내는 것으로, 이때 구성요소들의 상태들은 고장 사상의 집합이며, 미니멀 컷 셋을 단축시킬 수 있는 컷 셋들을 만든다.
	Vesely, Narum[49]	PREP(COMBO option)	확정적 방법을 사용한 가장 최초의 컴퓨터 프로그램으로서, 직접 조합 검사를 통하여 미니멀 컷 셋을 결정한다.
	Fussell, Vesely[19]	Fussell & Vesely	AND게이트는 컷 셋 크기를 증가시키고, OR 게이트는 컷 셋 수를 증가시키는 원리. 조합 검사가 필요없다.
	Fussell, Henrey, Marshall[18]	MOCUS	사용되고 있는 최소 컷 셋 탐색 프로그램 중 가장 우수한 것으로, top-down 방식이다.
	P.K.Pande, M.E. Spectoar[34]	MISSUP	기본사상들만 입력 자료로 이용하여 가장 낮은 게이트들에서 출발하여 미니멀 컷 셋을 찾아내는 bottom-up 알고리즘.
	Semanders [40]	ELRAFT	FT의 각 중간사상을 기본사상의 곱·합형으로서 나타낸다. 이러한 작업은 하위 레벨의 중간사상에 대해 행해진 후, 순차적으로 상위 레벨의 중간사상으로 이어지는 bottom-up 방식. 또한 컴퓨터의 기억량을 감소시키고, 연산을 쉽게하기 위해서, 각 기본사상이 상이한 소수(prime number)를 소인수 분해함으로써 최소 컷 셋을 구성하는 기본사상을 파악.
	R.B.Worrell[54]	SETS	non-coherent FT에서 여사상의 기본사상들을 포함하지 않는 미니멀 컷 셋들을 구함.
	Kumamoto, Henley[31]	Kumamoto & Henley	상-하향 알고리즘으로서, non-coherent FT들의 상승항(上昇項; product term: 같은 기본사상이 두 번이상 나타나지 않는 논리곱)을 구성하는 기본사상을 파악한다.
우연   원인 고장 분석	G.R.Burdick, N.H.Marshall, J.R.Wilson[7]	COMCAN	FT로부터 어떤 사상이든지 간에 입력 자료를 이용하여 미니멀 컷 셋을 결정하는 알고리즘. 일반적 원인에 모두 민감한 미니멀 컷 셋들을 구할 수 있다. 하지만, 복잡한 시스템들에는 가끔 적용하기가 어려우며, 컴퓨터의 처리 시간 및 저장 능력이 한정적이기 때문에, 모든 원인들을 동시에 입력 자료로 하는 미니멀 컷 셋들에는 한계가 있다.
	C.L.Cate, J.B. Fussel Wagner et. al [51]	Wagner	COMCAN 알고리즘의 문제점을 개선한 것으로, 모든 미니멀 컷 셋들을 검사하지 않고 우연 원인들에 의해 실패할 수 있는 미니멀 컷 셋들만 대상으로하여 임의적으로 분석
	W.E.Vesely [48]	BACFIRE	정량적으로 분석하는 방법으로서 Marshall-Olkin 모델[7]을 특수화하여 통계적 기법으로 추정

<표 4> 정량적 평가방법

분류	개발자	컴퓨터코드 및 알고리즘	주요내용
몬테칼로	H.E.Kongsoe[27]	RELY4	컴퓨터 실행 시간을 단축하기 위해 통계적 샘플링을 실시한다. 형태 1과 3은 샘플링 방법을 취하였으며, 2와 4는 직접 시뮬레이션을 취하여 평가 실행.
	B.J.Garick[21]	SAFTE	시스템의 신뢰성 및 안전성을 동시에 고려하여 몬테칼로 시뮬레이션으로 실제 문제들을 실행.
시뮬레이션	H.E.Kongsoe[26]	REDIS	시스템의 신뢰성 분석을 직접 시뮬레이션을 행한 프로그램에서 현장 문제를 대상으로 하여 실행
	Reactor Safety Study[36]	SAMPLE-WASH1400	시스템 고장이 지수분포를 따른다는 가정하에 수학적 모델을 구축. 부품고장 및 수리분포에 관련한 매개 변수들이 불확실성 분포를 계산하는데 사용
분석적 방법	W.E.Vesely[47]	KITT	수리 가능한 구성요소들을 포함하고 있는 FT들을 평가하기 위한 방법. 정상사상에 완벽한 정보 제공.
	L.Caldarola, A.Wickenhauser[8]	Caldarola & Wickenhauser	4가지 서로 다른 요소들의 부류들을 이진 요인 상태들의 가정하에 coherent system프로그램과 다단계 요인을 지닌 noncoherent system들의 평가를 다룬다.
	W.Y.Gately, D.W.Stoddard, R.L.Williams[16]	GO	복잡한 시스템들의 신뢰성 분석을 다루기 위한 컴퓨터 프로그램이다.
기타	E.R.Woodcock[44]	NOTED	시스템 신뢰성을 다룬 것으로 WAM-BAM과 유사
	R.C.Erdmann, J.E.Kelly, H.R.Kirch, F.L.Levereng [13]	WAM-BAM	시스템의 신뢰성 분석시 정확성뿐만 아니라, 유연성을 고려하여 컴퓨터 코드들을 개발하였으며, 안전 분석에 필요한 논리 모델들을 정량화하였다.
	A.Blin,A.Carline[6]	PATREC	list-processing방법 기초. 동일 가지들(equivalent leaves)에 있는 서브 트리 및 패턴(pattern)들을 미리 인식하여 수리 불가능한 시스템들의 시스템 불신뢰성 및 수리 가능한 불 가용성이 나타날 수 있도록 FT를 반복적으로 제거. 최종 단축으로 FT계산.
	M.Astolfi,S.Contin: C.L. Muyjenberg G.Volta[7,39]	SALP	list-processing 기법을 기초로 하여, 그래프들을 직접 조정할 수 있는 컴퓨터 코드들을 개발하였다.
	M.F.Chomow,[33]	Diagraph Technique	폐쇄-형태(closed-form)방법 제안. 계산척(diagraph)과 연관행렬 방법(related matrix methods)을 기초. 표준 행렬 기법들에 의해 쉽게 수학적으로 해를 구할 수 있으며, 수작업으로도 실행할 수 있는 장점.
D.B.Wheeler et alli,[52]	Bit Manipulation	컴퓨터로 필요 사항들을 계산하고 저장하기 위해 bit 조정 방법분석. 여러 FT들을 분석하여 미니멀 컷 셋 및 정상 사상 확률을 효과적	

몬테칼로 방법을 사용한 컴퓨터 프로그램으로 이들 정보를 구해냈다. 이러한 프로그램들은 P. Crosetti[11], H. E. Kongsoe[27]등이 개발하였다.

보통 직접 시뮬레이션을 실행하기가 어려운 작업의 경우, 컴퓨터 실행 시간을 단축하기 위해서, 몬테칼로 분석방법을 사용하여 통계적 샘플링을 실시하였다[26]. <표 4>는 정량적 평가 방법을 정리한 것이다.

### 3.3 중요도 분석

FT들에서 사상들 및 컷-셋들의 중요도를 측정하는 것은 정량적인 FT 분석의 또 다른 중요한 특성이다. 정상사상을 평가하는 것은 시스템의 신뢰성 및 가용성 정보를 제공해 주는 반면, 확률적으로 정보를 계산하는 것은 시스템의 문제를 평가하는데 큰 기여를 할 수 있다.

중요도 분석을 실시하는 목적은 시스템 고장 확률에 관한 중요한 기본사상 또는 MCS를 규명하는데 있다. 확률적인 중요도 척도들은 기본사상이 시스템 불가용성에 어느 정도 영향을 미치는가를 판단하는 수단이다. 여기에는 여러 가지 형태의 평가척도가 있는데 : Barlow-Proschan[3], Fussell-Vesely[16], 그리고 Birnbaum 척도의 3가지 형태가 대표적이다[23]. Barlow-Proschan 중요도 분석은 구성요소들이 주어진 시간 내에 연속적으로 고장이 발생하는 시스템을 대상으로한 것이다. 컷 셋  $i$ 에 대한 Barlow-Proschan의 중요도 평가척도란 시스템의 모든 다른 기본사상들이 고장이 발생한 상태에서, 컷-셋에 있는 어떤 기본사상이 고장을 일으킬 확률을 말한다[3].

Fussell-Vesely 중요도 분석은 각 기본사상이 MCS에 한번 이상 발생함에 따라 시스템 전체에 어느 정도로 영향을 주는지를 파악하여 중요도가 높은 기본고장 사상을 먼저 개선하여 신뢰도를 효율적으로 향상시키는데 있다[24]. 기본사상  $i$ 를 포함하고 있는 MCS의 고장확률의 합을 시스템의 고장확률로 나눔으로써 측정된다. 이 정의에 의하면, 시스템에서 가장 중요한 기본사상은 MCS에서도 가장 중요한 기본사상이라는 것이다. 따라서 이 정의는 기본사상을 복구하는 것이 시스템을 복구할 수 있는 확률의 평가척도라는 것이다.

Birnbaum 평가척도는 전체 시스템의 고장확률이 기본사상 각각의 확률에 어느 정도 영향을 미치는가에 대한 민감도를 나타내는 것이다. 따라서 기본사상의 확률의 변화에 대한 시스템 고장확률의 변화율을 평가하는 것이다.

## 4. 결 론

FTA는 신뢰성 및 안전성을 계산하는데 필요한 다재다능한 도구이다. 그러나 FT 모델들을 실행하는 데는 단점이 있다. 아마도 가장 큰 단점은 시스템에 첫 번째 적용시 개발비용이 많이 든다는 것이다. FMEA(Failure-Mode-and-Effects Analysis)와 같은 몇몇 귀납적 분석 기법은 단순고장분석(SPFA; Single-Point Failure Analysis)이 적합



할 때 규모가 작은 시스템들의 분석시 적용하기 위하여 훨씬 단순하고 보다 비용이 적은 효과적인 기법이다. 하지만, 보다 복잡하고 재해가 연속적으로 발생하는 시스템들에서는 과묵적으로 되기 때문에, FTA와 같은 기법이 적용된다. FTA는 시스템에 영향을 미칠 수 있고, 시스템 고장의 원인이 되는 휴먼 에러 및 환경조건들을 연관시켜서 표현할 수 있도록 기본사상들로 고려하여 시스템 상태를 효율적으로 분석할 수 있다. FTA를 자동화시킬 수 있는 연구가 빠른 속도로 진행 되므로써, 이러한 기법은 보다 효과적일 수 있으며, 정교한 분석적 신뢰성 도구로 이용할 수 있다.

FT를 정량적으로 평가할 경우의 가장 큰 어려운 점은(어떠한 정량적 신뢰성 기법에서와 마찬가지로) 적합한 고장을 자료가 부족하다는 것이다. 하지만, 정량적 평가를 실시하는 것은 유사한 부품들을 가진 시스템들의 설계들을 비교하는데는 유효하게 사용할 수 있다. 고장 확률을 절대적으로 결정하여 시스템의 상태를 평가하는 것만큼 고장률 자료가 민감하지는 않으며, 또한 고장을 자료가 부정확하기 때문에, FT분석을 정량적으로 실시하는 것은 절대적으로 평가하기보다는 상대적으로 평가를 내리는 것이 타당하다. 따라서 시스템의 단계들을 상세히 설계하는 과정이 FT 분석을 시스템에 가장 적합하게 적용할 수 있다.

FT 분석은 대부분 단순하기도 하지만, 분석가들의 요구에 의하여 보다 정확한 신뢰성 분석도구로 사용할 수 있다. FT는 고장 형태 및 확률들을 분석하고, 시스템의 신뢰성을 평가하기 위한 객관적인 토대를 시스템 안전 분석가들에게 제공할 수 있다.

## 5. 참 고 문 헌

- [1] 김길동, "자료 구조 형태에 따른 퍼지 안전진단 전문가 시스템 개발", 동국대학교 대학원 박사학위 논문, 1997.
- [2] Astolfi, M., S. Contini, C. L. Van der Muyzenberg, G. Volta, "Fault Tree Analysis by List Processing techniques", Plenum Press, New York, pp.48-50.
- [3] Barlow, R. E, and F. Proschan, "Importance of System Computers and Fault Tree Analysis", Operations Research Center, University of California, Report' ORC 74-3, 1974.
- [4] Barlow, R. E, and F. Proschan, "Statistical Theory of Reliability and Life Testing", Holt, Rinchart & Winston, 1975.
- [5] Bell Telephone Laboratories, "Launch Control Safety Study", Section VII, vol I, Bell Telephone Labs., Murray Hill, NJ USA. 1961.
- [6] Blin, A., A. Carline, et alii. "PATREC, a Computer Code for Fault Tree Calculation in Synthesis and Analysis Methods for Complex and Reliability Studies, Plenum", 1978, pp.33-43.
- [7] Burdick, G. R., N. H. Marshall, J. R. Wilson, "COMCAN-a Computer Code for Common-cause Analysis", ANCR-1314, 1976, May.
- [8] Caldarola, L., A. Wickenhauser, "The Karlsruhe Computer Program for the

- Evaluation of the Availability and Reliability of Complex Repairable Systems", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.43, 1977, pp.463-470.
- [9] Cate, C. L., J. B. Fussel, "BACFIRE-A computer program for common cause failure analysis", The University of Tennessee, NERS-77-02, 1977.
- [10] Chu, T. L., G. Apostolakis, "Methods for probabilistic analysis of noncoherent fault trees", *IEEE Trans. Reliability*, Vol. R-29, 1980, Dec, pp.354-360.
- [11] Crosetti, P., "Computer program for fault tree analysis", Douglas United Nuclear, Inc., Richard, Wash., DUN-5508, Apr, 1969.
- [12] Dubois, D., H. Prade, "Fuzzy Sets and Systems; Theory and Applications", Academic Press, New York, 1980.
- [13] Erdmann, R. C., J. E. Kelly, H. R. Kirch, F. I. Leverenz, E. T. Rumble, "A method for quantifying logic models for safety analysis", Nuclear systems Reliability Engineering and Risk Assessment, Siam, 1977. pp.732-754.
- [14] Esary, J. D., F. Prochan, "Coherent Structures with Non-Identical Components", *Techno. Metrics*, Vol.5, 1963, p.191.
- [15] Esary, J. D., F. Prochan, "A Reliability Bound for Systems of Maintained and Independent Components", *J. of the American Statistical Association*, Vol.65, 1970, pp.329-338.
- [16] Fussell, B. J., "How to Hand-Calculate System Reliability Characteristics", *IEEE Trans. Reliability*, Vol.24, No.3, 1973, pp.122-129.
- [17] Fussell, B. J., "Synthetic tree model-A formal methodology for fault tree construction", ANCR~1098, 1973, March.
- [18] Fussell, B. J., E. J. Henrey, N. H. Marshall, "MOCUS-1 computer program to obtain minimal cut sets from fault trees", ANCR-1156, Aerojet Nuclear Company, Idaho Falls, Idaho, 1974, March.
- [19] Fussell, B. J., W. E. Vesely, "A new methodology for obtaining cut sets for fault trees", *Trans. Amer. Nuc. Soc.*, Vol.15, 1972, pp.794-801.
- [20] Fussell, B. J., "DICOMICS, an algorithm for direct computation of minimal cut sets of fault trees", EUR-5481e, 1975.
- [21] Garrick, B. J., "Principles of unified system safety analysis", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.13, 1970, pp.245-321.
- [22] Henley E. J., H. Kumamoto, "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice-Hall, 1981.
- [23] Henley E. J., H. Kumamoto, "Probabilistic Risk Assessment", Prentice-Hall, Inc., 1992.
- [24] Heo, Y. S., et al., "IMPORTANCE Code User's Manual", KOPEC/86-t-40, 1986.
- [25] Heo, Y. S., "Damage Assessment of Existing Structures", *J. Engineering*

*Mechanics Division*, Vol.4, 1980, pp.785-799.

[26] Kongsoe, H. E., "REDIS, a computer program for system reliability analysis by direct simulation", *Int. Symp. Reliability of Nuclear Power Plants*, Innsbruck, Austria, April, 1975, pp.14-18.

[27] Kongsoe, H. E., "RELY 4 : A Monte Carlo computer program for systems reliability analysis", Danish Atomic Energy Commission, RISO-M-1500, June, 1972.

[28] Lambert, H. E., "Fault Trees for Decision Making in Systems Analysis", Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, UCRL-51829, LLNL, 1975.

[29] Lapp, S. A., G. J. Powers, "Computer-aided synthesis of fault-trees", *IEEE Trans. Reliability*, Vol. R-26, 1977, pp.2-13.

[30] Worrell, R. B. "Set equation transformation system(SETS)", SLA-73-0028A Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1974, May.

[31] MIL-STD-882, MIL-HDBK-217E : Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1984.

[32] Marshall, A. W., I. Olkin, "A multivariate exponential distribution", *JASA*, Vol.62, 1967, pp.30-44.

[33] McCormick, N. J., *Reliability and Risk Analysis*, Academic Press, New York, 1981.

[34] Pande, P. K., M. E. Spector, P. Chatterjee, "Computerized fault tree analysis", TREE AND MICSUP, ORC 75-3, Operation Research Center, University of California, Berkeley, 1975, April.

[35] Powers, G. M., F. C. Tompkins, "Fault tree synthesis for chemical process", *AIChE Journal*, Vol.20, 1974, Mar, pp.376-387.

[36] Reactor Safety Study-An Assessment of Accident Risk in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400(NUREG-75/104), US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1975, Oct.

[38] Salem, S. L., G. E. Apostolakis, D. Okrent, "A computer-oriented approach to fault tree construction", EPRI NP-288, Electric Power Research Institute, 1976, Nov.

[39] Salem, S. L., J.S. WU, G.E. Apostolakis, "Decision table development and application to the construction of fault trees", *Nuclear Technology*, Vol.42, 1979, Jan., pp.51-64.

[40] Semanderes, S. N., "ELRAFT, a computer program for the efficient logic reduction analysis of fault trees", *IEEE Trans. Nuclear Science*, Vol. NS-18, 1971, Feb., pp.481-487.

[41] System Safety Symposium, Seattle, Washington: The Boeing Company, 1965, Available from University of Washington Library, Seattle, Washington.

[42] Taylor, J. R., E. Hollo, "Algorithm and programs for consequence diagram and

- fault tree construction", Report No. RISO-M-1907, Danish Atomic Energy Commission, Roskilde, Denmark, 1977.
- [43] Tillman, F.A., Hwang, C.L., W. Kuo, "Optimization techniques for system reliability with redundancy-A review", *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, 1977 Aug. pp.148-155.
- [44] Tillman, F.A. Hwang, C.L. W. Kuo, *Optimization of System reliability*, Marcel Deller, 1980.
- [45] Tillman, F.A. Hwang, C.L. W. Kuo, "System effectiveness models: an annotated bibliography", *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, 1980 Oct, pp.295-304.
- [46] Tillman, F.A. Kuo, W. Hwang, C.L. Grsh, D.L., "Bayesian Reliability and Availavility A Review," *IEEE Trans. Reliability and Availability-A Review*", *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, 1982 Oct, pp 362-372.
- [47] Vesely, W. E., "Analysis of fault trees by kinetic tree theory", IN-1330, Idaho Nuclear Corp., Idaho Falls, 1969, October.
- [48] Vesely, W. E., "Estimating common cause failure probabilities in reliability and risk analysis : Marshall-Olkin specialization", *Probabilistic Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., 1992, pp.314-341.
- [49] Vesely, W. E., Narum, R. E., "PREP and KITT computer code for the automatic evaluation of a fault tree", Idaho Nuclear Corporation, Idaho Falls, Idaho 1, IN-1349, 1970.
- [50] Wagner, D. P., C. L. Cate and J. B. Fussell, "Common Cause Failure Analysis for Complex Systems", *Nuclear Systems Reliability Engineering and Risk Assessment*, J. Fussell and G. Burdick, (eds.), SIAM, Philadelphia PA, 1977, p.288.
- [51] Wagner, D. P., C. L. Cate and J. B. Fussell, "Common cause failure analysis methodology for complex systems", in [22, pp.289-313].
- [52] Wheeler, D. B., "Fault tree analysis using bit manipulation", *IEEE Trans. Reliability*, Vol.26, Jun., 1977, pp.95-99.
- [53] Woodcock, E. R., "The calculation of reliability of systems: The program NOTED, UKAEA Authority Health and Safety Branch, Risley", Warrington, Lancashire, England, AHSB(S) R., 1971, p.153.
- [54] Worrell, R. B. "Set equation transformation system(SETS)", SLA-73-0028A Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1974, May.

## 저 자 소 개

**김길동** : 인천대학교 산업공학과, 동국대학교 대학원 석·박사학위를 취득하였다.  
관심분야 인간공학, 작업관리, 품질관리, 품질경영 등.

**박주식** : 인천대학교 산업공학과 와 동 대학원을 졸업하고,  
명지대학교 대학원 산업공학과 박사과정이다.  
관심분야 설비관리 및 보전, CIM, 자동화, Fuzzy응용,  
computer interface분야 등.

**강경식** : 현 명지대학교 산업공학과 정교수.  
명지대학교 산업안전센터 소장 및 안전경영과학회 회장  
관심분야 생산운영시스템, 시스템 안전

**박상민** : 현 인천대학교 산업공학과 교수.

### 경 력

1979 - 1983 건진솔라에너지(주) 상무이사  
1983 - 1985 인덕전문대학 전임강사  
1983 - 1985 한양대학교, 건국대학교 강사  
1985 - 현재 인천대학교 전임강사, 조교수, 부교수, 교수

### 관 심 분 야

경제성공학, 설비관리, 신뢰성공학, 원가공학