

# Fuzzy Sets을 이용한 시스템 부품의 고장가능성 진단에 관한 모델 (The possibility of failure of system component by fuzzy sets)

김 길 동\*  
조        입\*\*

## Abstract

In conventional fault-tree analysis, the failure probabilities of components of a system are treated as exact values in estimating the failure probability of the top event.

For the plant layout and systems of the products, however, it is often difficult to evaluate the failure probabilities of components from past occurrences, because the environments of the systems change.

Furthermore, it might be necessary to consider possible failure of components of the systems even if they have never failed before.

In the paper, instead of the probability of failure, we propose the possibility of failure, viz, a fuzzy set defined in probability space.

Thus, in this paper based on a fuzzy fault-tree model, the maximum possibility of system failure is determined from the possibility of failure of each component within the system according to the extension principle.

---

\* 동국대학교 대학원 산업공학과

\*\* 동국대학교 공과대학 산업공학과

## I. 序 論

FTA의 定量的 分析에서 각각의 構成品 또는 故障事象들의 故障率 또는 故障確率을 정확히 추정하기란 매우 어렵다.

Brown[2]은 fault tree 構成時 入力이 되는 각 사상의 확률이 發生 및 非發生이라는 binary logic에 의하여 확실하다고 간주하고 불확실한 要素(components)는 불필요한 것으로 간주하였다. 하지만, 많은 시스템에서는 過去 故障 발생들에서부터 故障 확률들을 평가하기란 어렵다. 왜냐하면, 시스템의 주변 要因이 변화하고, 과거 결코 故障가 일어나지 않았던 부품의 故障도 고려할 필요가 있다.

그리고 FTA를 사용하는데 있어 주관적이고 정확하지 못한 故障자료를 바로 잡는 새로운 종류의 방법을 개발할 필요가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 fuzzy logic을 이용한 FTA 研究로서 Hitoshi와 Naruhito[5]는 事象의 확률 구조를 모호하다고 보고, 이를 Blokely[1]가 安全分析時 사용했던 言語變數(linguistic variables)에 의한 계산 방법을 제시하고 최종 사상의 확률계산에는 기존의 확률계산 방법이 아닌 Zadeh[6]가 제안한 연산 방법을 사용하였다. 그리고 Singer[8]는 사상의 확률이 하나의 값으로 주어지는 것이 아니라 약간의 公差를 가지고 있는 것으로 보고 Dubois와 Prade[3]가 제시한 L-R 연산

표현 방법을 이용 최종 사상의 公差를 구하였다. 또한, Hideo外 3人[4]은 기본사상의 故障확률 부여를 퍼지확률을 이용하여 故障확률 대신 故障가능성을 부여하는 방법을 연구하였다.

本 研究는 Hideo[4]의 퍼지확률에 의한 故障가능성의 연구를 導入하여 부정확한 故障자료와 시스템 모델링에 관련한 불확실성들을 다룰 수 있는 일반화된 FTA 構成을 試圖하였다. 즉, 基本事件의 상황을 {0,1} 대신에 [0,1](소속함수 : membership function)에 속하는 값에 의해 특징지우고, Top사상의 상황은 미니멀 컷셋을 통해서 시스템 故障가능성 분포를 구하였다.

## II. 故障확률과 可能性(Failure Probability and Possibility)

### 1. 기호설명

$E_j$	사상 j(요소j)
$\Pi(E_j)$	사상 j의 可能性 분포
$M(\cdot)$	( $\cdot$ )의 可能性분포 또는 소속함수
$M_j^u, M_j^d$	$M_j$ 의 증가, 감소 부분
$\hat{M}$	M의 판단 형태
i	level i(i=0, 1, ..., m-1)를 나타내는 階次
$y^i$	level i에서의 可能性
$a_j, b_j$	확률분포 $M_j$ 의 증가와 감소하는 위치에

서 y에 대응하는 x값

$C_k$  k번째 minimal cut

$a_k^i, b_k^i$   $a_j^i$  or  $b_j^i \in C_k$

$\widetilde{\max}, \widetilde{\min}$  확장한 최대, 최소 연산자

### 2. 고장가능성

고장 확률 대신에 시스템내의 각 구성품의 고장 가능성을 결정하는 것으로, fuzzy set[3]은 이러한 고장가능성에 해당되는 확률공간을 제시해 주고 있다. 따라서 고장가능성을 규명하므로써, 부정확한 고장 자료를 설명하는 것이 가능하다.

식 (1)은 기본고장  $E_j$ 를 고장가능성  $\Pi(E_j)$ (or  $M_j$ )로 나타낸 것이다.

$$E_j \rightarrow [\Pi(E_j) : \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}] \dots\dots\dots(1)$$

그리고 기본고장들은 AND, OR-logic(gates)으로 연관시키는 것이 가능하며, 다음은 확장연산  $\widetilde{\max}$  와  $\widetilde{\min}$  연산자들을 사용하여 가능성분포를 제안한다.

### 3. 고장확률 對 가능성

여기서는 확률과 가능성들간의 관련성과 아래의 가정들에 기초한 변환을 도입하고자 한다.[9]

-불가능한 고장에서는, 확률과 가능성은 둘다=0이다.

-명확한 고장에서는, 확률과 가능성은 둘다=1이다.

-단조로운 확률 증가에서는, 가능성은 증가한다.

확률  $P(E_j)$ 와 가능성  $\Pi(E_j)$ 간에 가능한 관련성을 식으로 나타내면 다음과 같다.[3]

$$\Pi(E_j)_{\max} = 1 - (1/10) * \log_{10} P(E_j) \dots\dots\dots(2)$$

where,  $\Pi(E_j) = 0$  if  $P(E_j) = 0$

식(2)를 이용하여 확률들과 가능성들간의 관련성을 <표1>과 같이 나타내었으며, <표1>은 위의 세가지 조건들을 모두 만족한다.

<표1> 가능성 ( $\Pi(E)$ )과 확률( $P(E)$ )간의 관련성

Point	$\Pi(E)$	Interval of $\Pi(E)$	$P(E)$
1	0.00	(0.00, 0.05)	0.00
2	0.10	(0.05, 0.15)	$1.00 * 10^{-9}$
3	0.20	(0.15, 0.25)	$1.00 * 10^{-8}$
4	0.30	(0.25, 0.35)	$1.00 * 10^{-7}$
5	0.40	(0.35, 0.45)	$1.00 * 10^{-6}$
6	0.50	(0.45, 0.55)	$1.00 * 10^{-5}$
7	0.60	(0.55, 0.65)	$1.00 * 10^{-4}$
8	0.70	(0.65, 0.75)	$1.00 * 10^{-3}$
9	0.80	(0.75, 0.85)	$1.00 * 10^{-2}$
10	0.90	(0.85, 0.95)	$1.00 * 10^{-1}$
11	1.00	(0.95, 1.00)	1.00

4.  $\widetilde{\max}$ 와  $\widetilde{\min}$  연산의 분할 분포

증감, 감소부분들에서 가능성 분포의 분할은  $\widetilde{\max}$ 와  $\widetilde{\min}$  연산들을 쉽게 수행할 수 있도록 해 준다. 식(1)에서 정의한 것처럼 M을 소속함수 또는 가능성분포로 놓고 각 가능성분포는 다음과 같은 특성들을 가진다고 가정한다.

가능성 함수는  $C \in [0,1]$ 에서 단지 한점을 가진다.

- ①구간  $[0,c]$ 에서 증가
- ② $X=c$ 에서 1의 값을 가진다. 즉  $M(c)=1$
- ③구간  $[c,1]$ 에서 감소

$[0,c]$ 에서 정의한 M의 증감부분을  $M^u$ 로 놓고,  $M^d$ 는 구간  $[c,1]$ 에서 정의한 M의 감소부분으로 나타낸다. 따라서, 집합  $M(x)$ 는 ;

$$M(x) = M^u(x) \cup M^d(x) \dots\dots\dots(3)$$

5.  $\widetilde{\max}$ 와  $\widetilde{\min}$ 의 특성

①만약  $M_1, M_2, \dots, M_K$ 가 퍼지숫자라면, 최대(최소)는

$$\widetilde{\max}(M_1, M_2, \dots, M_K), \widetilde{\min}(M_1, M_2, \dots, M_K)$$

또한 퍼지숫자이다.

② $M_1, M_2, M_3$ 의 세개의 퍼지숫자가 있다. 이때  $\widetilde{\min}$ 과  $\widetilde{\max}$ 는 상호교환적이고 서로 관련성이 있는 연산들이다. 그리고 이들 연산들은 상호분산적이

다. 즉,

$$\widetilde{\min}(M_1, \widetilde{\max}(M_2, M_3)) = \widetilde{\max}(\widetilde{\min}(M_1, M_2), \widetilde{\min}(M_1, M_3)) \dots\dots\dots(4)$$

$$\widetilde{\max}(M_1, \widetilde{\min}(M_2, M_3)) = \widetilde{\min}(\widetilde{\max}(M_1, M_2), \widetilde{\max}(M_1, M_3)) \dots\dots\dots(5)$$

와 같다.

이들 특성들은 FFTA(Fuzzy Fault Tree Analysis)에서 사용이 가능하고, 미니멀 컷을 사용하여 시스템 고장가능성의 평가를 위해 사용될 수 있다.

III. FFTA의 모델

1. 판단절차(Discretization Procedure)

식(3)에 따라서, level  $i$ 와  $i+1(i=1, \dots, m-1)$ 간에 놓여있는 곡선  $M^u_j(x)$ 의 부분은  $(a^i, y)$ 점에서  $x = a^i$ 에 의해 수직선으로 된다. 즉, 식(6)과 같다.

$$y = M^u(a^i), y^i \leq y \leq y^{i+1} (i=0, 1, \dots, m-2) \dots\dots\dots(6)$$

또한,  $i+1, i(i=m-1, m-2, \dots, 1, 0)$ 간에 놓여있는  $M^d(x) = b^i$ 에 의해  $(b^i, y)$ 점에서 수직선으로 된다. 즉, 식(7)과 같다.

$$y = M^d(b^i), y^{i+1} \leq y \leq y^i (i=m-2, m-3, \dots, 1, 0) \dots\dots\dots(7)$$

임의의 두지점  $x=b^i$ 와  $x=b^{i-1}$ 간의 수평선은 곡선에 접근하고, 단계함수를 형성한다. 이러한 관계를 도해적으로 나타내면 (그림1)과 같다.

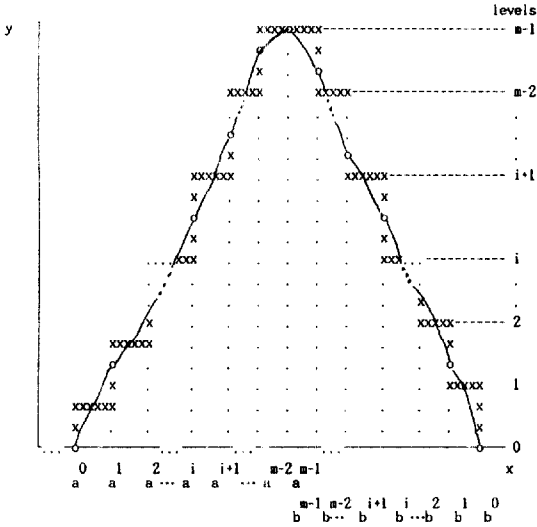


그림1. levels  $i=1, \dots, m-1$ 에서  $M^u(x)$ 와  $M^d(x)$ 의 판단 단계

식(6)(7)를  $\hat{M}$ 로 일반화 시키면,

$$\hat{M} = (m; a^0, a^1, \dots, a^{m-1}; b^{m-1}, b^{m-2}, \dots, b^1, b^0) \dots \dots \dots (8)$$

$\hat{M}$ 과 같이 되며,  $\hat{M}_i$ 는

$$\hat{M}_i = (m; a_i^j; b_j^i); i=0, 1, \dots, m-1 \dots \dots \dots (9)$$

로 표시할 수 있다.

2. FFTA(Fuzzy Fault Tree Analysis)의 모델

식(6)과 (7)를 이용하여, 두 level  $i-1$ 과  $i$ 간의 두 분포  $\hat{M}_1$ 과  $\hat{M}_2$ 의 max와 min 연산들을 구하면 ;

$$\widetilde{\max}(\hat{M}_1, \hat{M}_2) = (m; \max(a_1^i, a_2^i); \max(b_1^i, b_2^i)) \dots \dots \dots (10)$$

$$\widetilde{\min}(\hat{M}_1, \hat{M}_2) = (m; \min(a_1^i, a_2^i); \min(b_1^i, b_2^i)) \dots \dots \dots (11)$$

와 같이 정의 할 수 있다.

식 (10)(11)을 도해적으로 설명하면, (그림2) (그림3)과 같다.

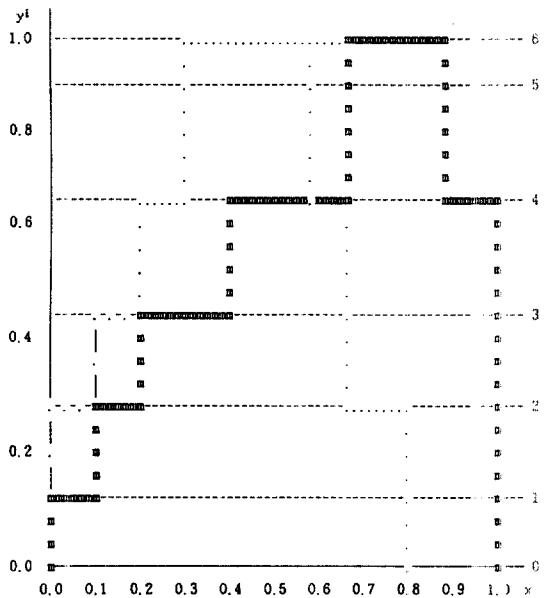


그림2.  $\widetilde{\max}(\hat{M}_1, \hat{M}_2)$  (mmmm) (여기서 최대화 하는데 필요치 않은  $\hat{M}_1, \hat{M}_2$ 의 부분은 (...)와 (---)로 각각 나타내었다.)

으로 나타내면 (그림4)와 같다.

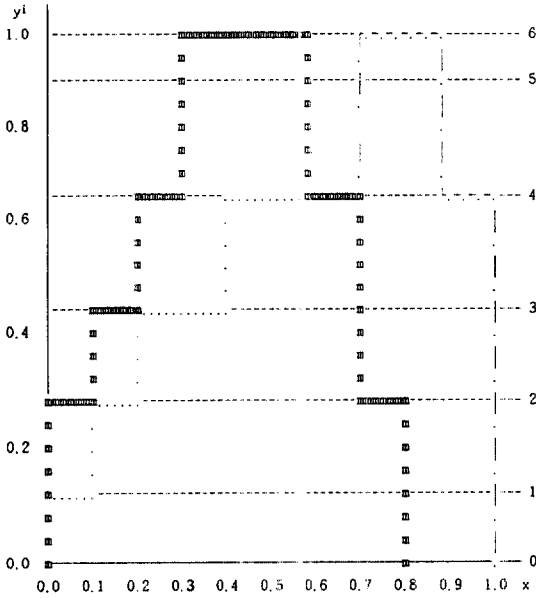


그림3.  $\widehat{\min}(M1, M2)$  (여기서 최대화 하는데 필요치 않은  $\widehat{M1}, \widehat{M2}$ 의 부분은 (...)와 (---)로 각각 나타내었다.)

식(10)(11)을 n판단 가능성분포로 일반화 시키면;

$$\widehat{\max}(M1, M2, \dots, Mn) = (\bigvee_{j=1}^n a_j^i; \bigvee_{j=1}^n b_j^i) : i=0, 1, \dots, m-1 \quad (12)$$

$$\widehat{\min}(M1, M2, \dots, Mn) = (\bigvee_{j=1}^n a_j^i; \bigvee_{j=1}^n b_j^i) : i=0, 1, \dots, m-1 \quad (13)$$

가 된다.

식 (12)(13)을 <표2>의 자료를 이용하여 그림

<표2>  $\widehat{M1}$ 과  $\widehat{M2}$ 의 판단 분포[1]

i	yi	Data for $\widehat{M1}$		Data for $\widehat{M2}$	
		$a_i^i$	$b_i^i$	$a_i^i$	$b_i^i$
0	0.0	0.0	0.8	0.0	1.0
1	0.1	0.1	0.8	0.0	1.0
2	0.3	0.2	0.7	0.1	1.0
3	0.5	0.2	0.7	0.4	1.0
4	0.7	0.3	0.6	0.7	0.9
5	0.9	0.3	0.6	0.7	0.9
6	1.0	0.3	0.6	0.7	0.9

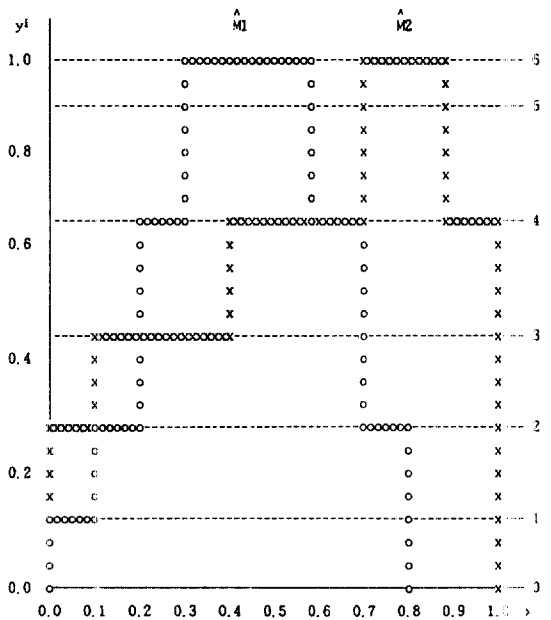


그림4.  $\widehat{M1}$ ,  $\widehat{M2}$ 의 판단 가능성분포( $\widehat{M1}$ :oooo,  $\widehat{M2}$ :xxxx)

<표3>은 <표2>를 이용하여  $\widehat{\max}(M1, M2)$ 와  $\widehat{\min}(M1, M2)$ 을 계산하여 얻은 자료로서 (그림2)와 (그림3)으로 각각 나타내었다.

<표3>  $\widehat{M1}$ 와  $\widehat{M2}$ 의 확장자 최대, 최소

i	yi	$\widehat{\max}(M1, M2)$		$\widehat{\min}(M1, M2)$	
		$a_1' \vee a_2'$	$b_1' \vee b_2'$	$a_1' \wedge a_2'$	$b_1' \wedge b_2'$
0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.8
1	0.1	0.1	1.0	0.0	0.8
2	0.3	0.2	1.0	0.1	0.7
3	0.5	0.4	1.0	0.2	0.7
4	0.7	0.7	0.9	0.3	0.6
5	(0.9, 1.0)	0.7	0.9	0.3	0.6

따라서 (그림2)와 (그림3)은  $\widehat{\max}$  연산인 경우에는  $\widehat{M2}$ 에 의해,  $\widehat{\min}$  연산인 경우에는  $\widehat{M1}$ 에 의해 결정된다는 것을 보여 준다.

이제 FFTA의 일반적 공식을 유도하면,

FT는 모두 미니멀 컷셋들의 연결이라 할 수 있으며, 임의의 미니멀 컷셋들이 고장난다면 시스템은 고장이다.[10]

따라서,  $E_j$ 를 미니멀 컷셋  $C_k$ (즉,  $E_j \in C_k$ )에 포함되는 구성품으로 하자. 이때, minimal cut  $C_k$ 에 포함되는 가능성분포  $\widehat{Mck}$ 는 식(13)으로 부터 :

$$Mck = (\bigwedge_{E_j \in C_k} a_j' : \bigwedge_{E_j \in C_k} b_j') \dots\dots\dots (14)$$

가 되고,

시스템 고장가능성분포는 식(12)와 (14)를 결합하여 다음 식을 얻는다.

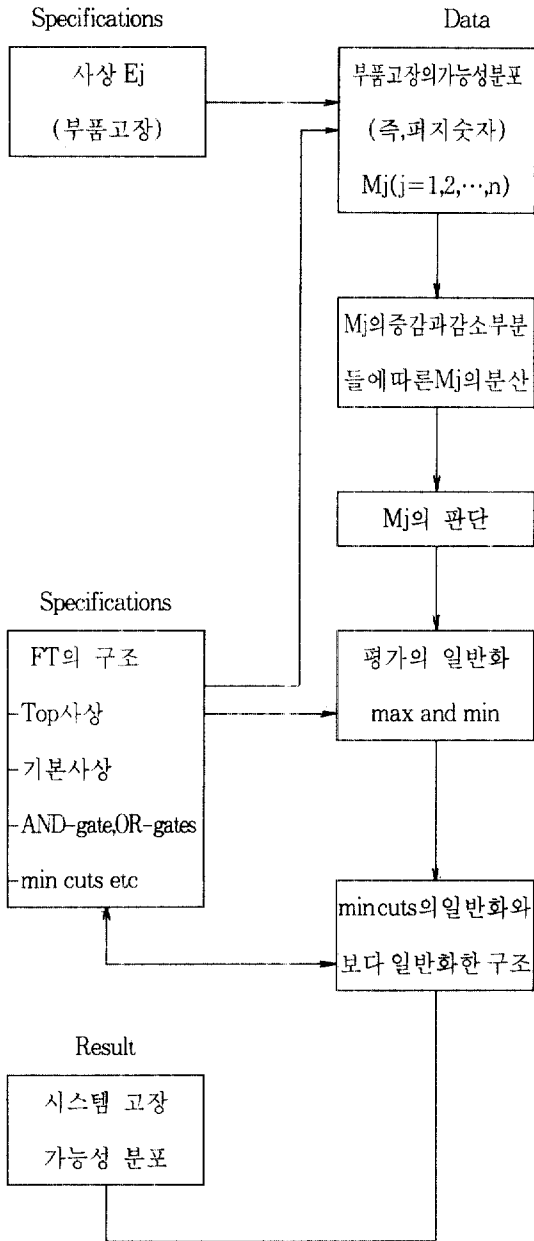
$$\widehat{Msys} = (\bigvee_{k=1}^L \bigwedge_{E_j \in C_k} a_j' : \bigvee_{k=1}^L \bigwedge_{E_j \in C_k} b_j') \quad i=1, 2, \dots, m$$

.....(5)

여기서  $\widehat{Msys}$ 은 시스템 고장 가능성이고,  $L$ 은 미니멀 컷의 수이다.

따라서 식(15)는 시스템 고장 판단 가능성분포를 나타내 준다.

FFTA의 체계적 흐름도는 (그림5)에 나타나 있으며, 모든 적절한 절차 단계들은 입력 data에서 최종 결과까지 즉, 시스템 고장을 의미하는 top사상의 가능성 분포를 block으로 나타냈다.



(그림5) FFT 절차의 흐름도

#### IV. FFTA의 적용예

[4]에 있는 자료를 사용하여, 본 연구 모델의 절차를 설명하고자 한다.

Fault-Tree는 top 사상을 유도하기 위한 사상의 조합을 표현하는 논리적 모델이다. (그림 6)은 두 가지 형태의 gate들을 사용한 간단한 FT의 예로서, 직사각형은 논리 gate의 출력인 중간 또는 top 사상을 정의한다. 원형은 기본적 사상 즉, 시스템 요소의 주요 고장을 나타내며, “ $\cup$ ”는 OR-gate를, “ $\cap$ ”는 AND-gate를 나타낸다.

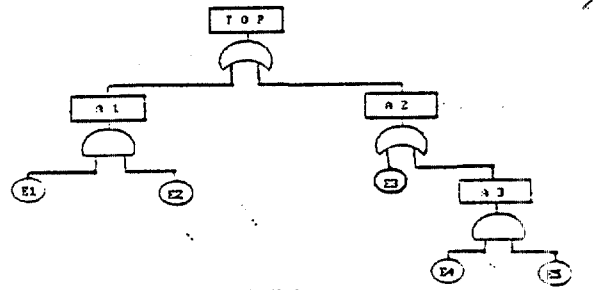


그림6. FT의 예

(그림6)에서 top사상은 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 \cup A_2 \\
 &= (E_1 \cap E_2) \cup (E_3 \cup E_3) \\
 &= (E_1 \cap E_2) \cup E_3 \cup (E_4 \cap E_5)
 \end{aligned}$$

$E_i$ 의 고장 확률을  $P_{E_i}$ 라 하면, top사상 T의 고장



확률은,

$$P_T(P_{E1}, P_{E2}, \dots, P_{E5}) = 1 - (1 - P_{E1}P_{E2})(1 - P_{E3})(1 - P_{E4}P_{E5})$$

와 같은 일반적 구조함수를 가지며, 퍼지집합으로 표현하면,

$$\tilde{P}_T(\tilde{P}_{E1}, \tilde{P}_{E2}, \dots, \tilde{P}_{E5}) = 1 - (1 - \tilde{P}_{E1}\tilde{P}_{E2})(1 - \tilde{P}_{E3})(1 - \tilde{P}_{E4}\tilde{P}_{E5})$$

와 같다.

여기서  $\tilde{P}_{Ej}$ 는  $[0,1]$ 구간에서 정의한 퍼지집합이다.

우선 (그림6)의 예제는 (그림7)과 같은 다섯개의 기본사상  $E_j$  ( $j=1,2,\dots,5$ )를 갖는 세계의 미니멀 컷셋 즉,  $(E_1, E_2), E_3, (E_4, E_5)$ 를 가진다.

그리고 기본사상의 퍼지확률 값들은 [4]에 있는 자료를 인용하였으며, 기본사상  $E_j$ 에 해당하는 가능성들을  $\hat{M}_1, \hat{M}_2, \dots, \hat{M}_5$ 라 하면, FT사상의 가능성 분포 자료는 <표4>와 같다.

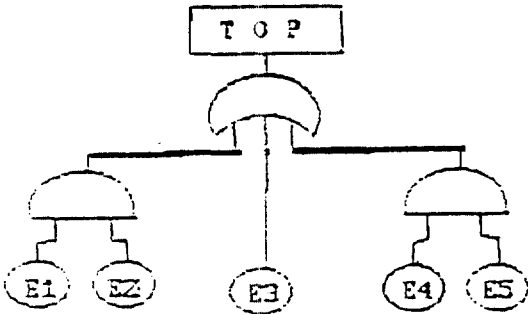


그림7.미니멀 컷셋의 FT

<표4> FT사상의 가능성분포

Levels	가능성분포 사상										
	$\hat{M}_1$		$\hat{M}_2$		$\hat{M}_3$		$\hat{M}_4$		$\hat{M}_5$		
i	$y_i$	$a_1^i$	$b_1^i$	$a_2^i$	$b_2^i$	$a_3^i$	$b_3^i$	$a_4^i$	$b_4^i$	$a_5^i$	$b_5^i$
0	0.0	.10	.25	.020	.08	.010	.040	.20	.50	.006	.035
1	0.1	.11	.24	.022	.08	.012	.038	.21	.48	.006	.030
2	0.3	.12	.23	.024	.06	.014	.036	.22	.46	.007	.025
3	0.5	.13	.22	.026	.06	.016	.034	.23	.44	.007	.020
4	0.7	.14	.21	.028	.04	.018	.032	.24	.42	.008	.015
5	(0.9,1.0)	.15	.20	.030	.04	.020	.030	.25	.40	.008	.010

따라서 (그림7)에 해당하는 FT의 미니멀 컷셋의 가능성 분포는 <표5>와 같다.

<표5> FT의 미니멀 컷의 가능성분포

Levels	미니멀 컷의 가능성분포						
	i	$y_i$	Cutset $C_1$		Cutset $C_2$		Cutset $C_3$
$a_1^i \wedge a_2^i$			$b_1^i \wedge b_2^i$	$a_3^i \wedge b_3^i$	$a_4^i \wedge a_5^i$	$b_4^i \wedge b_5^i$	
0	0.0	.02	.08	.010	.040	.006	.015
1	0.1	.022	.08	.012	.038	.006	.010
2	0.3	.024	.06	.014	.036	.007	.015
3	0.5	.026	.06	.016	.034	.007	.010
4	0.7	.028	.04	.018	.032	.008	.015
5	(0.9,1.0)	.030	.04	.020	.030	.008	.010

식(15)로부터  $M_j$ -curve의 증감, 감소 부분들에 대한 分散을 구하면,

$$\hat{M}_{sys} = \left( \bigwedge_{k=1}^3 \bigwedge_{E_j \in C_k} a_k^j : \bigwedge_{k=1}^3 \bigwedge_{E_j \in C_k} a_k^j \right)$$

$$= (a_1^1 \wedge a_2^1 \vee a_3^1) \wedge (a_1^2 \wedge a_3^2) : (b_1^1 \wedge b_2^1) \vee b_3^1 \vee (b_1^2 \wedge b_3^2)$$

) .....(16)

과 같다.

따라서 식(16)을 사용하면, <표6>과 같은 시스템 고장 가능성 분포를 구할 수 있다.

<표6>FT의 시스템 고장 가능성 분포

i	y <sub>i</sub>	(a <sub>1</sub> <sup>1</sup> ∧a <sub>2</sub> <sup>1</sup> )∨a <sub>3</sub> <sup>1</sup> ∨(a <sub>1</sub> <sup>2</sup> ∧a <sub>3</sub> <sup>2</sup> )	(b <sub>1</sub> <sup>1</sup> ∧b <sub>2</sub> <sup>1</sup> )∨b <sub>3</sub> <sup>1</sup> ∨(b <sub>1</sub> <sup>2</sup> ∧b <sub>3</sub> <sup>2</sup> )
0	0.0	.02	.08
1	0.1	.022	.08
2	0.3	.024	.06
3	0.5	.026	.06
4	0.7	.028	.04
5 (0.9,1.0)		.030	.04

## IV. 결 론

단일 수치로 나타내기에는 상당히 모호한 상황이 존재하게 된다. 그로 인하여 재해사상에 대한 확실한 단일 확률이라는 것을 사실상 불가능한 것이다. 이와같은 경우에 여러 안전 전문가에 의해 정의될 수 있는 재해발생의 불확실성을 퍼지집합론을 적용하여 안전도 분석을 한다면 보다 효과적이고 현실적인 분석을 기대할 수 있다.

본 연구는 확장원리를 미니멀 컷에 응용하므로써 보다 간단하고 정확한 고장진단을 내릴 수 있으며 각 기본사상이 Top사상에 어느 정도 영향을 미칠 수 있는가를 파악할 수 있다.

앞으로 전문가 시스템에 의한 재해사상의 분석과 멤버십의 값에 대한 보다 실제적인 연구가 수행된다면 효과적인 재해분석이 기대된다.

## References

1. Blockley, D.I.,(1975), "Predicting the Likelihood of Structural Accidents". Proc.ICE, Vol.59, pp.659-668.
2. David B.Brown,(1976), "Systems Analysis and Design for Safety", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
3. Dubois, D. and Prade H.,(1980), "Fuzzy Sets and Systems ; Theory and Applications", Academic Press, New York.
4. Hideo Tanaka & Fan, L.T., & Lai, F.S., & Toguchi, K.,(1983), "Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability" IEEE.Tr.on.Rel., Vol.R-32, No.5, pp.453-457.
5. Hitoshi F., and Naruhito,(1984), "Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis", pp.205-213.
6. Lotfi A.Zadeh, (1973). "Outline of a New Approach to the Analysis of a Complex System and Decision Processes", IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-3, No.1, pp.28-44.
7. Misra, K.B. and Sharma, A.,(1981), "Performance Index to Quantify Reliability using Fuzzy Subset Theory", Microelectronics and Reliability Vol. 21, No.4, pp.543-549.
8. Singer, D.,(1990), "A Fuzzy Set Approach to Fault Tree and Reliability Analysis", Fuzzy Sets and Systems, Vol.34, No.2, pp.145-155.
9. Sugeno, M., Onsiwa T., and Nishiwaki, Y.,(1984). "A New Approach Based on Fuzzy Sets Concept to Fault Tree Analysis and Diagnosis of Failure and Response to Abnormal Occurences at Nuclear Power Plants, Dresden, 12-15 June.
10. FTA 安全工學, 日本總合安全工學研究所編, 日刊工業新聞社.