

## 퍼지집합에 의한 FT 분석 및 신뢰성분석

### Fault Tree Analysis and Reliability Analysis by Fuzzy Set Approach

김길동\*·조암\*\*

Gil-Dong Kim · Am Cho

(1997년 3월 14일 접수, 1997년 9월 20일 채택)

#### ABSTRACT

The conventional fault tree and reliability analysis gives in many cases insufficient information concerning the relative frequencies of hazard events. This stems from that the basic events are not stationary and ergodic, and therefore the tolerances of the induced and top events cannot be calculated reliably based on the classical probability theory. To overcome this difficulty, the paper considers the relative frequencies of the basic events as fuzzy numbers and uses instead of probability, possible considerations for evaluating the mean values and tolerances of the top events.

The possibility distribution of the basic events can be approximated based on heuristic considerations.

This paper shows the use of these operators for constructing fault trees. The use of the method for numerical calculation is demonstrated on a field safety problem.

#### 1. 서 론

안전이란 모든 기술적 시스템들의 형태에 있어서 가장 기본적인 요구조건이다. 이들 문제들을 통제하기 위해서 적절한 이론적 방법들을 고안해 내는 것은 필수적이며, 시스템이 점점 더 복잡해짐에 따라 그 중요성이 증가하고 있다. 따라서, 시스템의 고장허용을 고려하여 시스템을 구축하여야

하고, 이러한 시스템의 안전을 분석하기 위한 방법 및 체계적인 방법들이 항공기, 우주, 핵산업에 서는 아주 중요한 요소가 되고 있다.

과거 30년동안, 부울 대수와 확률이론의 고전적 방법들을 토대로 한 연구는 신뢰성이론을 체계적으로 구축해 왔다<sup>1,2)</sup>.

실제 공학자가 흔히 직면하는 문제 중 기본사상들의 확률값들이 잘 알려지지 않은 그러한 안전과

\* 충청전문대학 품질관리과

\*\* 동국대학교 공과대학 산업공학과

신뢰성 문제들에 퍼지이론을 적용시키는 시도를 행하고 있다. 그 방법으로 fuzzy logic을 이용한 FTA 연구로서 Hitoshi와 Naruhito<sup>3)</sup>는 사상의 확률 구조를 모호하다고 보고, 이를 Blockely<sup>4)</sup>가 안전 분석시 사용했던 언어변수(linguistic variables)에 의한 계산 방법을 제시하고 최종사상의 확률계산에는 기존의 확률 계산 방법이 아닌 Zadeh<sup>5,6)</sup>가 제안한 연산방법을 사용하였다.

그리고 Hideo<sup>7)</sup>는 기본사상의 고장확률 부여를 퍼지확률을 이용하여 고장확률 대신 고장 가능성을 부여하는 방법을 연구하였다. 또한 Kim<sup>11)</sup>은 Hideo<sup>7)</sup>의 퍼지확률에 의한 고장 가능성의 연구를 도입하여 부정확한 고장 자료와 시스템 모델링에 관련한 불확실성들을 다룰 수 있는 일반화된 FTA 구성을 시도하였다.

따라서, 본 연구의 목적은 기본사상의 상대적 위험 빈도수를 퍼지숫자로 규정하고, 고장확률대신에 가능성을 고려하여 문헌<sup>9)</sup>의 예제를 인용하여 정상사상(top event)의 평균값과 허용치들을 구하였으며, 일반적 FT 연산을 실시하였다.

## 2. 신뢰성 문제의 퍼지접근방법

확률적 방법을 가능성 방법으로 전환하기 위한 방법으로, 퍼지숫자를 이용하여 사상들의 상대적 발생 빈도치를 고려하는 것이다.

이러한 고려사항은 확률사상의 곱과 합을 확률함수로 나타낸 것으로, 두개의 상대적 발생 빈도치들이 퍼지숫자  $0 < \tilde{p} < 1$ 인 차이를 갖는 퍼지영역을 명확하게 고려하는 것이다. 퍼지영역을 확장시키는 기초는 Zadeh의 확장원리이다<sup>6)</sup>. 여기서 “ $\sim$ ”는 퍼지변수들을 나타낸다.

〈Theorem 1〉

실변수들  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 의 실함수  $y = \psi \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 을 퍼지영역에 확장시키는 것은 퍼지변수들  $\{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n\}$ 이 퍼지함수  $y = \tilde{\psi} \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n\}$ 이 되도록 하고, 그 소속함수는 다음과 같다.

$$\mu_y(t) = \sup_{t = \psi(s_1, \dots, s_n)} \min(\mu_{x_1}(s_1), \mu_{x_2}(s_2), \dots, \mu_{x_n}(s_n)) \dots \dots \dots (1)$$

〈Definition 1〉

퍼지숫자는 다음을 만족하는 볼록한 소속함수

$\mu(x)$ 를 갖는 모집단 R의 연속퍼지집합이다 :

$$\text{Max}_{x \in R} \mu(x) = 1 \dots \dots \dots (2)$$

이 정의에 의하면, 퍼지숫자의 소속함수는 여러 가지 형태를 가질 수 있지만, 최대값은 1을 초과하지 않는다(Fig. 1). 소속함수의 폭은 퍼지숫자의 흠어짐의 척도이다. 만약 흠어짐이 무한히 작다면, 식(2)는 최대를 유지할 뿐만 아니라, 전체 소속함수와 퍼지숫자의 “값”은 보통숫자와 동일하다.

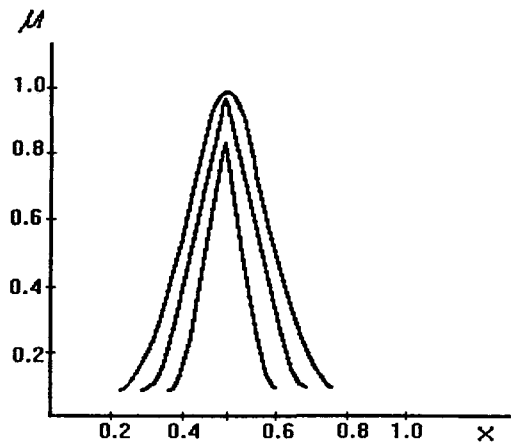


Fig. 1 Example of membership functions

대부분 실질적인 경우에는, 소속함수  $\mu(x)$ 는  $\max \mu(x) \equiv 1$ 과 교차하는 지점의 두개의 함수 L(x)와 R(x)에 의해 구할 수 있다<sup>10)</sup>. 여기서 “L”은 왼쪽, “R”은 오른쪽을 나타낸다. m은 실수이며,  $\tilde{m}(\mu_{\tilde{m}}(m) = 1)$ 의 평균값을 나타낸다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 좌·우 흠어짐을 표시하며; 흠어짐이 “0”일 때,  $\tilde{m}$ 는 비퍼지숫자이며; 흠어짐이 무한일 때  $\tilde{m} = R$ : 즉  $\alpha = +\infty$ , 이때  $\mu_{\tilde{m}}(x) = 1, x \leq m$ ,  $\tilde{m}$ 는  $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ 로 나타낸다. 이것은 m과 근사치에 가까운 모델로 표현하는데 편리하다.

〈Definition 2〉

퍼지숫자  $\tilde{m}$ 는 L-R 형태이다. 만약 소속함수가 다음과 같은 형태를 따르면,

$$\mu_{\tilde{m}}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right) & \text{for } x \leq m, \alpha > 0 \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right) & \text{for } x \geq m, \beta > 0 \end{cases} \dots \dots \dots (3)$$

$m$ 은  $\mu_{\tilde{m}}(m)=1$ 에서 최대값이고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 좌우의 흠어짐이고, L과 R은  $(m-x)/\alpha$ 와  $(x-m)/\beta$ 에 각각 적합한 함수이다.

단순화하면, L-R type의 퍼지숫자들은  $(m, \alpha, \beta)$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 점에서, 퍼지숫자들을 확장하기 위한 대수적 연산작업들은 다음과 같다.

Changing of sign :

$$-(m, \alpha, \beta)_{L,R} = (-m, \beta, \alpha)_{RL} \dots\dots\dots (4)$$

Addition  $\oplus$  :

$$(m, \alpha, \beta)_{L,R} \oplus (n, \gamma, \delta)_{L,R} = (m+n, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR} \dots\dots\dots (5)$$

Subtraction  $\ominus$  :

$$(m, \alpha, \beta)_{L,R} \ominus (n, \gamma, \delta)_{L,R} = (m-n, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR} \dots\dots\dots (6)$$

Multiplication  $\odot$  :

$$(m, \alpha, \beta)_{L,R} \odot (n, \gamma, \delta)_{L,R} = (mn, m\gamma + n\alpha, m\delta + n\beta)_{LR} \dots\dots\dots (7)$$

if  $\tilde{m} > 0, \tilde{n} > 0$

식(7)은 비교적 작게 흠어짐을 나타낸 것이다. 보다 큰 흠어짐을 나타내기 위해서는 다음과 같다.

$$(m, \alpha, \beta)_{L,R} \odot (n, \gamma, \delta)_{L,R} = (mn, m\gamma + m\alpha - \alpha\gamma, m\delta + n\beta + \beta\delta)_{LR} \dots\dots\dots (8)$$

if  $\tilde{m} > 0, \tilde{n} > 0$

Devision  $\odot$  :

$$(m, \alpha, \beta)_{L,R} \odot (n, \gamma, \delta)_{RL} = \left( \frac{m}{n}, \frac{m\delta + n\alpha}{n^2}, \frac{m\gamma + n\beta}{n^2} \right)_{LR} \dots\dots\dots (9)$$

if  $\tilde{m} > 0, \tilde{n} > 0$

### 3. 신뢰성 분석을 위한 퍼지연산

AND, OR, NOT 연산자들을 이용하여 퍼지신뢰성을 분석하고자 할 때, 앞에서 주어진 연산들을 사용하여 퍼지함수들을 구축해야만 한다. 즉, 이것들은 일반적 분포가 아닌 상호연관이 있는 것들이다.

fuzzy AND, OR, NOT 연산자들의 가능성(소속)함수들은 퍼지변수들로서 확률연산자의 변수들을 고려하고, 식(4)~(7)에서 주어진 퍼지연산의 대수연산들을 대체하므로써 구할 수 있다.

$$\tilde{P}_Y = \prod_{i=1}^n P_i = \text{AND}(\tilde{P}_1, \dots, \tilde{P}_n) \dots\dots\dots (10)$$

$\tilde{\Pi}$ 는 퍼지곱을 나타낸 것이다. 식(7)를 사용하여 퍼지곱을 계산하면, 식(10)은 다음과 같은 반복적인 형태로 다시 쓸 수 있다 :

$$\tilde{P}_Y(X) = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \odot (m_{P_2}, \alpha_{P_2}, \beta_{P_2}) \odot \dots \odot (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n}) = (m_{r_1} m_{P_1}, m_{r_1} \alpha_{P_1} + m_{P_1} \alpha_{r_1-1}, m_{r_1} \beta_{P_1} + m_{P_1} \beta_{r_1-1}) \mid i=n \dots\dots\dots (11)$$

여기서  $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$ 는 다음과 같은 반복형태를 나타낸다<sup>8)</sup>.  $i=0, 1, 2, \dots, n$

$$m_{r_0} \triangleq m_{P_1}, m_{r_1} = m_{P_1} m_{P_2}, m_{r_2} = m_{r_1} m_{P_3}, \dots, m_{r_i} = m_{r_{i-1}} m_{P_{i+1}} \dots\dots\dots (11a)$$

$$\alpha_{r_0} \triangleq \alpha_{P_1}, \alpha_{r_1} = m_{P_1} \alpha_{P_2} + m_{P_2} \alpha_{P_1}, \alpha_{r_2} = m_{r_1} \alpha_{P_3} + m_{P_3} \alpha_{r_1}, \dots, \alpha_{r_i} = m_{r_{i-1}} \alpha_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \alpha_{r_{i-1}} \dots\dots\dots (11b)$$

$$\beta_{r_0} \triangleq \beta_{P_1}, \beta_{r_1} = m_{P_1} \beta_{P_2} + m_{P_2} \beta_{P_1}, \beta_{r_2} = m_{r_1} \beta_{P_3} + m_{P_3} \beta_{r_1}, \dots, \beta_{r_i} = m_{r_{i-1}} \beta_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \beta_{r_{i-1}} \dots\dots\dots (11c)$$

일반적 OR 연산함수의 퍼지확장자 형태는 식(12)와 같다.

$$\tilde{P}_Y = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{P}_i) = \text{OR}(\tilde{P}_1, \dots, \tilde{P}_n) \dots\dots\dots (12)$$

식(7)를 사용하면, 식(12)는 다음과 같은 반복형태로 다시 쓸 수 있다 :

$$\tilde{P}_Y(x) = (1, 0, 0) - \{ (1, 0, 0) - (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \odot (1, 0, 0) - (m_{P_2}, \alpha_{P_2}, \beta_{P_2}) \odot \dots \odot (1, 0, 0) - (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n}) \} \dots\dots\dots (13)$$

식(7)을 사용하면 식(12)는 다음과 같은 반복형태로 다시 쓸 수 있다.

$$P_Y(X) = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = 1 - \{ m_{r_{i-1}}(1 - m_{P_i}), m_{r_{i-1}} \alpha_{P_i} + (1 - m_{P_i}) \alpha_{r_{i-1}}, m_{r_{i-1}} \beta_{P_i} + (1 - m_{P_i}) \beta_{r_{i-1}} \} \dots\dots\dots (14)$$

### 4. 사례연구

두대의 grinding 기계가 각각 다르게 작업한다. 기계 가까이에서 작업하는 작업자들의 눈에 주로 금속 부스러기가 들어가 상처를 입는 가능성은 얼마인가? 가장 위험한 사람들은 기계 작업자들이다. 안전 보호경을 써야 하나 대체로 이것을 하지 않는다. 좀 더 위험한 경우는 기계에 근접해오는 사람들로써, 자재들을 가져오거나 운반하는 사람

들이고, 좀 더 위험한 경우는 다른 이유로 그 지역에 들어오는 사람들이다.

누군가 상해를 입을 수 있는 정상사상의 FT는 앞에서 언급한 원리들을 기초로 구축할 수 있다. 사상에 기여하는 기본사상들은 Table 1과 같다. [events/million man-hours]에서 발생하는 상대적 빈도수의 중앙값과 아래에 계산한  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 분산값들을 포함한다.

Table 1 Basic events contributing to the accident<sup>9)</sup>

기호	기본 사상	m	$\alpha, \beta$
A	작업자 1이 안전보호경을 착용하지 않음	0.02	$1.112 \cdot 10^{-2}$
B	작업자 2가 안전보호경을 착용하지 않음	0.02	$1.112 \cdot 10^{-2}$
C	기계 1이 가동	0.8	$4.448 \cdot 10^{-2}$
D	기계 2가 가동	0.8	$4.448 \cdot 10^{-2}$
E	안전보호경을 착용하지 않은 채 일반인이 작업역에 들어갈 경우	1.0	$5.566 \cdot 10^{-2}$
F	자재운반자가 위험지역에 들어간 경우	0.05	$2.778 \cdot 10^{-3}$
G	생산제품을 운반하기 위해 작업역에 들어간 경우	0.05	$2.778 \cdot 10^{-3}$
H	기타 이유로 작업역에 들어간 경우	0.01	$5.560 \cdot 10^{-4}$

m :  $\mu_{\text{중}}(m)=1$ 에서의 최대값  
 $\alpha, \beta$  : 좌·우의 흠여짐

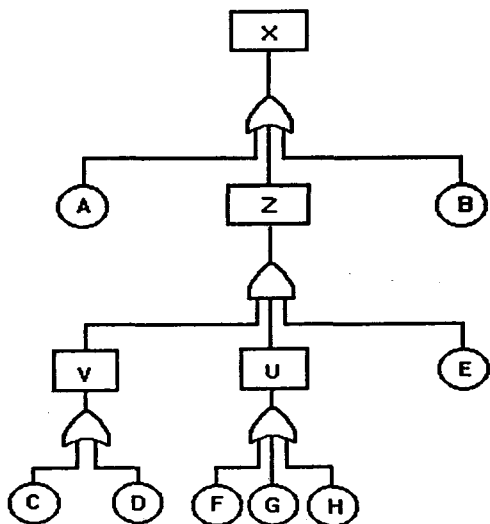


Fig. 2 Fault tree for the example

본 예제를 계산하기 위하여 다음과 같은 세가지 가정을 둔다.

가정 1) FT는 여기서 간단한 사항들만을 고려하여 구축할 수 있으며, Fig. 2와 같이 나타내었다. 기본사상들은 서로 상호 독립적이라고 가정한다. 따라서, Fig. 2의 정상사상(top event) X의 함수를 구하면 다음과 같다.

$$U=F+G+H \quad V=C+D$$

$$Z=E \times U \times V \quad X=A+B+Z \dots\dots\dots (15)$$

퍼지가능성 함수를 구하면 다음과 같다.

$$P_U = P_F \oplus P_G \oplus P_H$$

$$P_V = P_C \oplus P_D$$

$$P_Z = P_E \otimes P_U \otimes P_V$$

$$P_X = P_A \oplus P_B \oplus P_Z \dots\dots\dots (16)$$

또한 식(10)과 (12)에 의해 정의한 퍼지 AND ( $P_1, \dots, P_n$ )와 OR( $P_1, \dots, P_n$ ) 연산자 함수들을 사용하여 구하면 다음과 같다.

$$P_U = \text{OR}(P_F, P_G, P_H)$$

$$P_V = \text{OR}(P_C, P_D)$$

$$P_Z = \text{AND}(P_E, P_U, P_V)$$

$$P_X = \text{OR}(P_A, P_B, P_Z) \dots\dots\dots (17)$$

가정 2) 가능성 분포함수들(소속함수)을 평가하면, 이것들은 대칭적이고 L-R type의 함수에 접근한다고 가정한다.

$$P_i = \begin{cases} L_i \left( \frac{m_i - x}{\alpha_i} \right) = \frac{1}{1 + |(m_i - x)/\alpha_i|} & \text{if } x < m_i \\ R_i \left( \frac{x - m_i}{\beta_i} \right) = \frac{1}{1 + |(x - m_i)/\beta_i|} & \text{if } x > m_i \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

$$\alpha_i = \beta_i, \quad i=A, B, C, D, E, F, G, H$$

가정 3) 퍼지상대적 빈도치들은  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 의 값들과 관계가 있어야 한다. 만약, 중앙값의 편차가  $x = \pm 0.5m_i$ 라면, 모든  $\mu_{P_i}$  값들은 0.1보다 작거나 같다고 가정한다. 따라서,  $\pm 50\%$ 인 중앙값  $m_i$ 의 상대적 빈도치는 단지 0.1의 가능성 값을 가질 때이다. 즉,  $pf(0.5m) = pf(1.5m) = 0.1$ 로서, 한 지점이 평균의 방향으로 이동할 때, pf는 최대값(평균에서 발생) 0.1에서 뺄수록 된다. 여기서,

pf : possibility function

m : 최대값을 가지는 pf의 중앙값,  $pf(m) = 1$ 이다.

이러한 가정하에, 식(18)에 따라서

$$\frac{1}{1 + |(m_i - x)/\alpha|} = \frac{\alpha}{\alpha + 0.5m} = 0.1$$

..... (19)

$$\alpha_i = \beta_i = 0.0556m_i$$

Table 1에 있는 분산  $\alpha_i = \beta_i$ 는 식(19)를 이용하여 계산한다.

$P_U = OR(P_F, P_G, P_H)$ 는 (14)에 의해 구할 수 있다.

$$m_U = 1 - (1 - m_F)(1 - m_G) \\ = 1 - (1 - 0.05)(1 - 0.05) = 0.097$$

$$m_U = 1 - (1 - m_{r_1})(1 - m_H) \\ = 1 - (1 - 0.097)(1 - 0.01) = 0.106$$

$$\alpha_{r_1} = (1 - m_F)\alpha_G + (1 - m_G)\alpha_F \\ = (1 - 0.05)0.003 + (1 - 0.05)0.003 \\ = 0.003$$

$$\alpha_U = \beta_U = (1 - m_U)\alpha_H + (1 - m_H)\alpha_{r_1} \\ = (1 - 0.097)0.001 + (1 - 0.01)0.003 \\ = 0.004$$

$$p_U = (m_U, \alpha_U, \beta_U) = (0.106, 0.004, 0.004)$$

$P_V = OR(P_C, P_D)$ 는 식(14)에 의해 구할 수 있다.

$$m_V = 1 - (1 - m_C)(1 - m_D) \\ = 1 - (1 - 0.8)(1 - 0.8) = 0.960$$

$$\alpha_V = \beta_V = (1 - m_C)\alpha_D + (1 - m_D)\alpha_C \\ = (1 - 0.8)0.045 + (1 - 0.8)0.045 \\ = 0.018$$

$$p_V = (m_V, \alpha_V, \beta_V) = (0.960, 0.018, 0.018)$$

$P_Z = AND(P_E, P_U, P_V)$ 는 식(11)에 의해서 구할 수 있다.

$$m_{r_1} = m_E \cdot m_U = 1.0 \cdot 0.106 = 0.106$$

$$m_Z = m_{r_1} \cdot m_V = 0.106 \cdot 0.96 = 0.102$$

$$\alpha_{r_1} = m_E \alpha_U + m_U \alpha_E \\ = 1.0 \cdot 0.004 + 0.106 \cdot 0.056 = 0.010$$

$$\alpha_Z = \beta_Z = m_{r_1} \alpha_V + m_V \alpha_{r_1} \\ = 0.106 \cdot 0.018 + 0.96 \cdot 0.01 = 0.012$$

$$p_Z = (m_Z, \alpha_Z, \beta_Z) = (0.102, 0.012, 0.012)$$

마지막으로 최종사상은 (14)에 따라서 구하면 :

$$P_X = OR(P_A, P_B, P_Z)$$

$$m_{r_1} = 1 - (1 - m_A)(1 - m_B) \\ = 1 - (1 - 0.02)(1 - 0.02) = 0.039$$

$$m_X = 1 - (1 - m_{r_1})(1 - m_Z) \\ = 1 - (1 - 0.039)(1 - 0.102) = 0.138$$

$$\alpha_{r_1} = (1 - m_A)\alpha_B + (1 - m_B)\alpha_A \\ = (1 - 0.02)0.011 + (1 - 0.02)0.011 = 0.022$$

$$\alpha_X = \beta_X = (1 - m_{r_1})\alpha_Z + (1 - m_Z)\alpha_{r_1}$$

$$= (1 - 0.039)0.012 + (1 - 0.102)0.022 = 0.032$$

$$P_X(x) = (m_X, \alpha_X, \beta_X) = (0.138, 0.032, 0.032)$$

즉, 사람이 임의로 million man-hours 동안에 상해를 입는 확률은 정상사상의 발생가능성의 중앙값  $m_X = 0.138$ 일 때를 나타낸다. X의 좌우 흩어짐은  $\alpha_X, \beta_X = 0.032$ (똑 같은 단위)이다. 사상의 가능성 분포 함수는  $m_X, \alpha_X, \beta_X$ 의 값들을 (18)에 대입하여 평가하며, Fig. 3에 이것을 나타내었다.

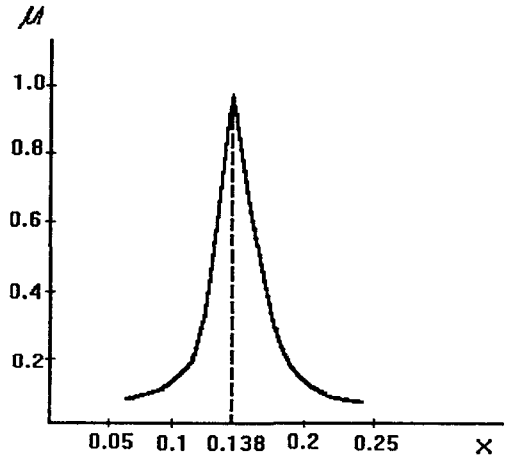


Fig. 3 Possibility distribution of accident

## 5. 결 론

전통적 FT와 신뢰성분석은 위험사상의 상대적 빈도수에 관한 불충분한 정보를 많이 가지고 있다. 이러한 것은 기본사상들이 변화하지 않고 모호하다는 사실에서 비롯되며, 따라서 발생한 빈도치와 정상사상들은 고전적 확률이론을 토대로 해서는 신뢰할 정도로 계산할 수는 없다. 이러한 어려운 점을 해결하기 위해, 기본사상들의 상대적빈도수를 퍼지숫자로 규정하고, 확률대신에 가능성을 고려하여 정상사상의 평균값과 허용치들을 평가하는데 사용하였다. 기본사상들의 가능성분포는 경험적 자료들을 토대로 접근할 수 있다.

주요사상들의 가능성분포들을 올바르게 평가하기 위해서는 n-ary 가능성에 대한 AND, OR and NEG의 연산작업들을 정확하게 표현하여야 하며, 주요사상들의 가능성분포들을 기초로한 잘못된 알려진 기본사상들의 허용치들이 미치는 영향에 대해

서 컴퓨터로 수치계산을 할 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다. 따라서, 이러한 조사 및 연구들은 복잡한 안전분석 및 위험한 기술적 시스템들에는 아주 중요하게 영향을 미칠 것이다.

### 참 고 문 헌

- 1) D.B. Brown, Systems Analysis and Design for Safety (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976).
- 2) H.H. Kolodner, The Fault Tree Technique of System Safety Analysis as Applied to the Occupational Safety Situation, ASSE Monograph (ASSE, 1971).
- 3) F. Hitoshi, and Naruhito, "Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis", Fuzzy Sets & Systems, Vol. 12, pp. 205~213, 1984.
- 4) D.I. Blockley, "Predicting the Likelihood of Structural Accidents", Proc., ICE, Vol. 59, pp. 659~668, 1975.
- 5) L.A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", IEEE Trans. Systems Man Cybernet. Vol. 3, pp. 28~44, 1973.
- 6) L.A. Zadeh, "The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 11, pp. 199~227, 1983.
- 7) T. Hideo & Fan, L.T. & Lai, F.S., & Toguchi K., "Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability", IEEE. Tr., Rel., Vol. R-32, No. 5, pp. 453~457, 1983.
- 8) 김길동, 조암, "Fuzzy Sets을 이용한 시스템 부품의 고장 가능성 진단에 관한 모델", 한국 품질관리학회지, Vol. 20, No. 2, pp. 44~54, 1992.
- 9) L.B. Page, J.E. Perry, "Standard Deviation As an Alternative to Fuzziness in Fault Tree Models", IEEE. Tr., Rel., Vol. 43, No. 3, pp. 402~407, 1994.
- 10) D. Dubois and H. Prade, "Fuzzy real algebra : Some results", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 2, pp. 327~348, 1979.
- 11) H.J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory-and Its Application, Kluwer-Nijhoff, Dordrecht-boston, 1986.