

발표분야 : 인간신뢰도/수행도

**Fault Tree구조로 나타낸 인간신뢰성의 퍼지추론적해석**  
**An Analysis of Human Reliability Represented as**  
**Fault Tree Structure Using Fuzzy Reasoning**

김 정 만  
경북산업대학교 산업공학과  
이 동 춘  
동아대학교 산업공학과  
이 상 도  
동아대학교 산업공학과

연락처: 713-701  
경북 경산시 하양읍 부호리 33  
경북산업대학 산업공학과  
김 정 만  
전화:053-850-7261  
FAX :053-853-8800

## ABSTRACT

In Human Reliability Analysis(HRA), the uncertainties involved in many factors that affect human reliability have to be represented as the quantitative forms.

Conventional probability-based human reliability theory is used to evaluate the effect of those uncertainties but it is pointed out that the actual human reliability should be different from that of conventional one. Conventional HRA makes use of error rates, however, it is difficult to collect data enough to estimate these error rates, and the estimates of error rates are dependent only on engineering judgement. In this paper, the error possibility that is proposed by Onisawa is used to represent human reliability, and the error possibility is obtained by use of fuzzy reasoning that plays an important role to clarify the relation between human reliability and human error.

Also, assuming these factors are connected to the top event through Fault Tree structure, the influence and correlation of these factors are measured by fuzzy operation.

When a fuzzy operation is applied to Fault Tree Analysis, it is possible to simplify the operation applying the logic disjunction and logic conjunction to structure function, and the structure of human reliability can be represented as membership function of the top event. Also, on the basis of the the membership function, the characteristics of human reliability can be evaluated by use of the concept of pattern recognition.

## 1. 서론

인간의 신뢰성을 합리적으로 평가하기 위해서는, 인간의 신뢰성에 영향을 미치는 다수의 요인의 평가에 수반되는 주관적불확정성(subjective uncertainty)의 정도를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 종래, 인간의 신뢰성해석에서는 확률 및 통계이론에 기초한 신뢰성척도를 사용하여 이들 불확정성의 영향을 고려하고 있으나, 실제의 인간신뢰성은 이와 다르지 않으면 안된다는 지적이 되어 오고 있다(1). 즉, 확률론으로 취급할 수 있는 불확정성의 인간의 경험과 공학적판단에 따라서 행해지는 평가 및 판단상의 착오와 작업 중의 과오, 또는 사회적, 정치적, 경제적요청등에 따른 불확정성의 영향도 정량적으로 파악하여 인간의 신뢰성에 결부시킴이, 합리적인 신뢰성해석을 위해 필요한 것이다(2). 따라서 인간이 행하는 평가 및 판단에는 주관적인 애매함이 수반되기 때문에, 인간주체의 system의 해석 및 모델화에는 이러한 애매함을 반영하여야 할 필요가 있다. 특히, 인간의 신뢰성해석에 있어서는, 해석 대상으로 되는 인간과 평가주체로서의 인간을 human factor로서 취급하여 인간의 신뢰성이 system전체에 미치는 영향을 애매함(fuzziness)의 정도로 표현할 필요가 있다.

종래, 다수의 인적과오(human error)에 따른 인간 신뢰성은 통상 전문가의 경험 및 공학적판단에 따라서 분석되고 평가될 뿐, 명확한 형태로써 취급된 경우는 적으며 또한, 수집된 자료의 대부분은 직접적인 원인에만 관계되는 것이고, 이에 대한 유인요소(elements of proximate cause)인 2차적요인 및 원인상호간의 관련성에 관해서는 별로 취급하지 않고 있다. 따라서, 본연구에서는 주관적 불확정성으로 표현된 인적과오와 그 원인간의 관계를 정량적으로 파악하고 인간신뢰성의 구조를 보다 명확히 하기 위하여 이들 다수의 요인들이 Fault Tree상의 원인사상으로 표현되어 계층적구조를 통해 정상사상으로 연결될 때, 정상사상의 종합적인간신뢰도(aggregated human reliability)를 퍼지집합으로 표현된 이들 사상의 인간신뢰도간을 퍼지연산으로 구한다.

즉, 각 원인사상간의 상대적중요도를 고려한 인간신뢰도를 퍼지추론 및 鬼澤에 의해 제안된 error possibility로써 표현하고, 구조함수에 논리화(disjunction)·논리적(conjunction)의 연산을 사용하여 정상사상의 종합적평가치를 귀속도함수(membership function)로써 나타내어, 이와 전형적(typical) 신뢰성pattern과 비교하여 system의 인간신뢰성을 언어로써 표현한다.

## 2. 신뢰성평가system과 퍼지이론

종래 신뢰성이론은 시스템이 고장하는 확률, 중대사고가 생기는 확률, operator가 실수하는 확률 등과 같이 확률론을 기본으로 해서 다루어지고 있다.

인간의 신뢰성을 확률로써 논한다는 것은, 인간의 신뢰성을 기계적 요소의 신뢰성과 동열에서 본다는 것으로 된다. 그러나 인간의 신뢰성은 기계적 요소의 신뢰성과 동열에서 논해질 수는 없는 것이다(3). 종래의 확률론적 수법으로 인간의 신뢰성을 정량적으로 해석함에는, 각 작업의 과오율이 추정되지 않으면 안되며 그 추정에는 풍부한 데이터를 필요로 하게 된다. 그러나 현실적으로 정확하게 추정할 만큼 데이터의 축적은 용이하지 않다. 또한, 표준적인 작업에 관한 과오율의 추정에 부족하지 않을 만큼의 데이터가 있다 해도 그로써 모든 작업을 망라한다는 것은 불가능하며 타당한 데이터로서의 요건을 결하는 경우도 있다. 이렇게 데이터로부터 직접 과오율을 추정함이 곤란한 경우 유사분야 및 유사작업의 데이터 등으로 부터 전문가의 경험적 판단을 기초로 해서 주관적인 평가로써 추정할 수밖에 없게 된다. 따라서, 인간의 신뢰성을 논할 때 과오율은 그 수치가 나타내는 것만큼의 정도를 보장할 수 없으므로 확률과 같은 수치 및 수식을 사용하기보다는 자연언어(natural language)로써 인간의 신뢰성을 평가하는 편이 인간의 판단구조에 적합하다.

또한, 수식을 주로 하는 수리모델보다는 언어를 주체로 한 언어모델의 편이 유연성이 풍부하고 인간의 복잡함 및 다양성을 보다 용이하게 수용할 수 있기 때문이다. 그러나, 자연언어는 언어표현의 대상이 지니는 의미를 명확하게 표현함이 곤란하므로 여기에서 fuzzy이론의 적용이 필요하게 된다.

鬼澤등은 그림 1.과 같이 인간의 신뢰도를 [0,1]상의 퍼지집합으로 생각하여 이를 error possibility 라고 부르고 이를 사용한 해석법을 제안하고 있다(4)(5)(6). 그림 1.의 횡축은 주관적 평가에 따른 인간의 신뢰도(정확히는 불신뢰도)를, 횡축의 0.5는 평가자가 갖고 있는 기준의 신뢰도를 나타내며 이 값이 0에 가까워질수록 높은 신뢰도를 나타낸다고 해석하고 있다. 즉, 고장율, 과오율등의 수치정보가 얻어진 때에는 평가자가 갖고 있는 기준치로써 평가하여 error possibility를 구하고 언어에 따른 정보가 있는 때에는 그 언어의 의미를 error possibility로써 나타내고 있다.

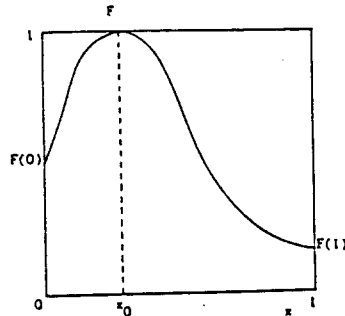


그림 1. 인간신뢰성의 퍼지표현

또한, 신뢰성의 평가의 애매함에 관해서는 표 1.과 같은 4가지의 언어적표현으로 나타내며,  $x_0$ 는 정도(degree)가 1로 되는 주관적 신뢰도를 나타낸다.

표 1. 인간의 신뢰성평가의 애매함의 표현과 parameter  $m$

수 준	신뢰성평가의 애매함의표현	$m$
1	애매함은 작다	2.0
2	애매함은 보통이다	2.5
3	애매함은 약간 크다	3.0
4	애매함은 크다	3.5

그림 1.과 같이 횡축의 [0,1]상의 신뢰도에 대응하는 정도(횡축의 값)가 0으로 되지 않게 하는 귀속도함수는 예를 들면,

$$F(x) = \frac{1}{1 + 20 \times |x - x_0|^m} \quad (1)$$

의 가능성분포함수(possibility distribution function)를 선택함에 따라서 같은 작업에서도 인간은 과오를 범할 가능성도 있고, 과오를 범하지 않을 가능성도 있다고 표현할 수 있다(7)(8).

그러나, 본연구에서는  $x_0$ 를 퍼지추론에 의해 구하고 이 값으로 인간의 신뢰성을 퍼지집합으로 나타낸다. 또한, 인간의 신뢰성에 영향을 미치는 요인으로는 기계의 사용성등을 포함한 작업조건, 스트레스수준 및 적성의 세 가지를 생각한다. 단, 이들 요인과 인간의 신뢰성과의 관계는 반드시 필요충분조건은 아니다. 왜냐하면, 예를 들어 적성이 있다고 해서 반드시 과오를 범하지 않는다고 할 수는 없기 때문이다. 더우기 양자의 관계는 명확하게 정량적으로 표현함이 곤란하나, 이들의 관계에는 다음과 같은 경향이 있음을 언어변수(linguistic variables)(34)로써 표현함이 가능하다.

즉,

- { 작업조건이 좋으면 신뢰성은 높다.
- { 작업조건이 나쁘면 신뢰성은 낮다.
- { 스트레스수준이 낮으면 신뢰성은 약간 낮다.
- { 스트레스수준이 적당하면 신뢰성은 높다.
- { 스트레스수준이 높으면 신뢰성은 낮다.
- { 적성이 있으면 신뢰성은 높다.
- { 적성이 없으면 신뢰성은 낮다.

로 평가하면 작업조건이 「좋다」 「나쁘다」, 스트레스수준이 「낮다」 「적당하다」 「높다」, 적성이 「있다」 「없다」, 신뢰성이 「높다」 「낮다」 「약간 낮다」 등의 언어를 그림 2와 같이 [0,1]상의 퍼지집합으로 표현한다. 즉, 이 표현 중에는 「좋다」 「나쁘다」, 「낮다」 「적당하다」 「높다」, 「있다」, 「없다」, 「높다」 「낮다」 「약간 낮다」 등의 의미를 명확하게 표현할 수 없는 언어가 포함되어 있는데, 이 의미를 정량적으로 나타내기 위해서 퍼지집합을 사용한다.

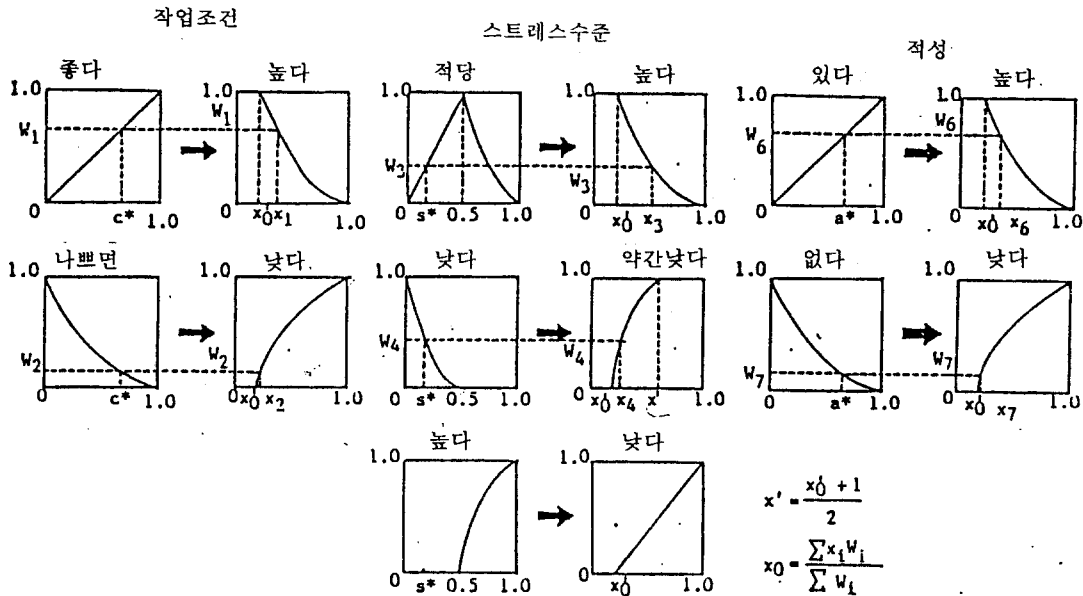


그림 2. 퍼지추론에 의한 인간신뢰성 평가

그림 2.에서 화살표 좌측의 퍼지집합은 각 요인(이 경우 작업조건, 스트레스수준, 적성)의 평가를 나타내고, 우측의 신뢰성은 그림 1.의 parameter  $x_0$ 로 치환해서 나타낸 것이다. 이때 귀속도함수는 평가자 자신의 주관적인 기준에 의해 결정하게 되는데 예를 들어, 스트레스수준과 신뢰성에 관해서, 스트레스수준의 횡축은 0이 극도로 낮고, 0.5가 최적, 1이 극도로 높음을 의미하며, 「낮다」 「적당하다」 「높다」를 [0,1]상의 퍼지집합으로서 표현하고있다. 신뢰성에 관해서는 「낮다」 「약간낮다」 「높다」를  $x_0$ 에 관한 [0,1]상의 퍼지집합으로 나타낸다. 특히 스트레스수준이 낮은 경우는 스트레스수준이 높은 경우에 비해서 신뢰성의 저하가 작기 때문에, 신뢰성이 「약간 낮다」의 퍼지집합을 표하는 parameter  $x'$ 를

$$x' = \frac{x'_0 + 1}{2} \quad (2)$$

으로 나타내는데 여기에서,  $x'$ 로서는 표2.의 <신뢰성은 약간 낮다>의  $x_0$ 의 대표치 0.625를 사용하는 것으로 한다.

표 2. 신뢰성평가에 관한 표현과 parameter  $x_o$ 와의 대응

class	신뢰성평가에 관한 표현	$x_o$ (대표치)
	( 시스템의 신뢰성은 )	
1	전혀없다	-
2	매우낮다	0.9 - 1.0 (0.95)
3	낮다	0.7 - 0.9 (0.8)
4	약간낮다	0.55 - 0.7 (0.625)
5	표준적이다	0.45 - 0.55(0.5)
6	약간높다	0.3 - 0.45(0.375)
7	높다	0.2 - 0.3 (0.25)
8	제법높다	0.1 - 0.2 (0.15)
9	매우높다	0.05 - 0.1 (0.075)
10	고장, 과오는 없는것에 가깝다	0.0 - 0.05(0.025)
11	고장, 과오는 전혀없다	-

단, 표 2.의 class 1, class 11에서는 다음의 멤버십함수를 가진다.

class 1

$$F(x) = \begin{cases} 1, & x = 1 \\ 0, & x \neq 1 \end{cases}$$

class 11

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$$

또한, 작업조건을  $c^*$ , 스트레스수준의 평가치를  $s^*$ , 적성의 평가치를  $a^*$ 로 하여  $x_o$ 를 퍼지추론에 의해 구하고, 전술한 주관적 신뢰도를 나타내는 퍼지집합으로 인간의 신뢰성을 표현 하는데(9) 이때, 각 요인에 관한 언어적 표현이나 그 의미를 나타내는 퍼지집합의 결정은 평가자에게 맡겨진 부분이며 여기에는 평가자의 주관의 개입된다.

또한,  $x_o$ 는, 그림 2.에서와 같이  $h_{c_i}(x)(i=1,2)$ ,  $h_{s_i}(x)(i=3,4,5)$ ,  $h_{a_i}(x)(i=6,7)$   $g_i(i=1,2,\dots,7)$ 를 각기 작업조건, 스트레스수준, 적성, 신뢰성을 나타내는 퍼지집합의 귀속도 함수로 할 때 아래와 같이 구한다.

$$i) \begin{cases} w_i = h_{c_i}(c^*) & (i=1,2) \\ w_i = h_{s_i}(s^*) & (i=3,4,5) \\ w_i = h_{a_i}(a^*) & (i=6,7) \end{cases} \quad (3)$$

로 되는  $w_i$ 를 구한다.

$$ii) w_i = g_i(x_i) \quad (i=1, \dots, 7) \quad (4)$$

으로 되는  $x_i$ 를 구한다.

$$iii) x_o = \frac{\sum_{i=1}^7 x_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^7 w_i} \quad (5)$$

를 계산한다.

단,  $c^*=0, s^*=1, a^*=0$ 의 때, 최악의 상태이며,  $x_0=1$ 이고, 역으로  $c^*=1, s^*=0.5, a^*=1$ 의 때, 최량의 상태이며,  $x_0=x'_0$ 가 된다.

### 3. Fault Tree상의 인간신뢰성 구조모델

#### 3.1 Fault Tree Analysis

FTA에서 시스템의 성공 혹은 실패의 가능성은 소위 구조함수를 사용하여 평가되며 성공의 확률은 시스템의 신뢰성의 척도로서 사용되고 있다(10). 그러나, 이 척도는 특수한 문제에 대해선 이용할 수 없는데 그 문제중 하나는 구조적 사고의 분석이다.

즉, 구조적 사고의 복잡한 연결관계 때문에 기본사상의 발생여부를 판단한다는 것은 대단히 어려우므로, 퍼지집합을 사용하여 기본사상의 발생여부를 정의함이 편리한 경우가 있다. 즉 기본사상의 상태를  $\{0,1\}$  대신에  $[0,1]$ 에 속하는 값으로 정의하는 것이다.

FTA에서 정상사상(1차적요인, 직접적요인)의 상태는 구조함수에 의해 추정할 수 있는데, 이 추정은 퍼지집합을 사용한 퍼지 MinMax연산에 의해 쉽게 이루어질 수 있다.

FTA에서 Fault Tree는 정상사상과, 기본사상으로 불리는 상호 통계적으로 독립이라고 생각되는 원인사상과의 관계를 주로 논리화및 논리적을 사용하는 Bool논리에 따라서 도식적으로 표현한 것이다. 이때 FTA에 퍼지연산을 사용하면, 구조함수에 논리화·논리적의 정의를 직접 사용하기 위한 연산의 간략화를 도모할 수 있으며, 시스템의 신뢰성은 정상사상에 대한 종합적 평가치의 귀속도함수로서 평가할 수 있다.

#### 3.2 기본사상의 중요도 계수

어떤 사상에 복수의 하위사상이 관계되는 때에는, 하위사상간 상대적중요도를 구할 필요가 있는데, Fault Tree를 통해 정상사상으로 연결되는 각 기본사상들의 상대적 중요도를 구하기 위해, 본 연구에서는 Saaty등(11)이 제안한 1쌍비교법에 의해 얻어진 주관적평가치를 멤버십값(membership value)화한다. 이에 의하면,  $e_{ij}$ 를 성분으로 하는 1쌍비교행렬  $E = [e_{ij}]$  는  $e_{ij} = 1/e_{ji}$ 이라는 역수관계(reciprocal)의 성질을 가진 역수행렬로써, 모든  $i, j, k$ 에 있어서  $e_{ij} \cdot e_{jk} = e_{ik}$  ( $i, k = 1, 2, \dots, n$ )의 관계가 성립하는 때,  $A$ 는 0이 아닌 고유치로서의  $\lambda = n$ 이며 계수(rank)가 1이 되므로,  $Ax = nx$  ( $x$ 는 고유벡터)이며  $e_{ij} = w_i/w_j$  ( $w_i$ 는 요소  $s$ 의 실제값)가 된다. 즉, 어떤 대상  $k$ 와  $l$  ( $k, l = 1, 2, \dots, n$ :  $n$ 은 요소의 수)에 대해 그 평가치  $w_k, w_l$ 이 주어진 때 이 값을 사용한 요소  $k$ 와  $l$ 의 상대적 중요도  $e_{kl}$ 은,

$$e_{kl} = w_k/w_l \quad (k, l = 1, 2, \dots, n, k \neq l)$$

이 값을 각각의 요소  $j$ 에 관해서  $e_{kl}$ 을 행렬요소로 한 행렬  $E$ 를 얻는다.

$$E = \begin{bmatrix} 1 & e_{12} & e_{13} & \dots & e_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러나,  $E$ 의 요소는 1쌍비교에 의해 얻어진 결과치임으로 그 관계에 모순이 생기는 경우가 있으므로 이에 대한 일관성의 유지를 위해 고유치해석에 따른 타당한 중요도  $w_i$ 를 구한다. 즉,

$$Ew = nw, \quad w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

또한, 평가자의 1쌍비교능력을 평가함에 있어 평가의 정합도(consistency index : CI)를 그 척도로 사용할 때,  $e_{ik} = e_{ij} \cdot e_{jk}$ 가 모든  $i, j, k$ 에 대해 성립하면 행렬  $E$ 는 정합성이 있다고 하고,

정합도를  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$  (7)

로 나타낼 때 정합성이 낮을수록 이 값은 커지게 된다. 또한, Saaty등은 두 대상의 선호도(relative importance)를 정하기 위해, 주대각 요소는 1, 그 외는 {1/9, 1/7, ..., 1/3, 1, 3, 5, 7, 9} 으로 한  $n(n-1)/2$  개의 값을 무작위로 추출하여 500 ~ 1,000개의  $n \times n$ 행렬의 요소로부터 정합도의 평균을 취한 무작위 정합도(random consistency index : RC)를 아래와 같이 제시하였다.

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RC	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

여기에서, 정합비(consistency ratio : CR)를  $CR = CI/RC$ 라 할 때  $CR \leq 0.1$  이면 평가자의 판단에 정합성이 있다고 하고 대상간의 상대적 선호도로써 구한 서수적(ordinal)순위에 무리가 없다고 할 수 있다. 따라서, 고유구조분석에 의한 1쌍비교능력유무의 판정은 Saaty등이 제안한 바와 같이  $CR \leq 0.1$ 을 기준으로 한다.

#### 4 퍼지추론을 이용한 Fault Tree상의 인간신뢰성구조

종래 FTA에서는, 어떤 기본사상의 발생이 정상사상에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위해서 구조함수(structural function)  $\Phi$ 를 정의한다. 기본사상 *i*의 상태를  $x_i$ 로 표시하면,  $x_i$ 는 다음과 같은 2치논리로서 정의되며,

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{기본사상 } i \text{가 생김} \\ 0 & \text{기본사상 } i \text{가 생기지 않음} \end{cases}$$

정상사상의 상태  $\Phi$ 는  $\underline{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 의 함수로서 다음식으로 정의한다.

$$\Phi(\underline{x}) = \begin{cases} 1 & \text{정상사상이 발생한다} \\ 0 & \text{정상사상이 발생하지 않는다} \end{cases}$$

또한, AND, OR의 논리 gate에 대한 구조함수는

$$\Phi_{AND}(\underline{x}) = \prod_{i=1}^m x_i \quad (8)$$

$$\Phi_{OR}(\underline{x}) = \prod_{i=1}^m x_i \triangle 1 - \prod_{i=1}^m (1 - x_i) \quad (9)$$

로 정의되는데 여기에서, *m*은 기본사상의 수이다. 일반적으로 Fault Tree에서는 AND gate와 OR gate가 조합되어 정상사상의 구조함수를 구성하므로, 직접  $\Phi(\underline{x})$ 를 계산해서 정상사상의 상태를 추정한다는 것은 기본사상의 수 및 gate의 수가 많으면 논리연산이 복잡하게 됨으로 용이하지 않다. 더우기, 구조함수가 2치논리로서 정의되기 때문에 기본사상의 발생유무가 명확하지 않는 경우에는 Fault Tree를 사용할 수가 없다. 따라서, AND gate, OR gate에 대한 구조함수를 논리화, 논리적인 사고방식을 직접 사용해서 식 (8),(9)의 정의를 다음과 같이 치환한다.

$$\Phi_{AND}(\underline{x}) = \bigwedge_{i=1}^m \triangle \text{Min } x_i \quad (10)$$

$$\Phi_{OR}(\underline{x}) = \bigvee_{i=1}^m x_i \triangle \text{Max } x_i \quad (11)$$



식 (10), (11)은 퍼지이론의 대수연산이 MinMax연산만으로써 실행되고 있음에 대응하고 있다. 이들은 식(8), (9)에 비해서 간단한 형태를 취하며 정상사상에 대한 구조함수  $\Phi$ 의 값을 직접 계산할 수 있어 계산의 간략화를 도모할 수 있다. 또한 기본사상  $i$ 의 상태  $x_i$ 를 반드시 0과 1의 2치 논리로써 취급할 필요가 없이,  $\{0,1\}$ 에서 부터  $[0,1]$ 로 확장할 수 있다.

인간의 신뢰성해석에서, 기본사상에 포함되는 주관적 불확정성의 영향을 단정적인 형태로 평가함은 곤란하기 때문에 여기에서는 Blockley(12)에 의해 제안된 언어변수에 따른 평가법을 이용한다. 지금 기본사상을  $F_i$ 로 표시하면,  $F_i$ 의 요인평가는 언어변수를 사용해서 행하게 되는데, 기본사상  $F_i$ 에 대한 인간의 신뢰도를  $G_i$ 로 하고 이는 퍼지집합으로 나타낸다. 또한,  $F_i$ 의 시스템에 관한 영향 및 다른 요인과의 관련성에 수반되는 영향을 고려하기 위해서, 기본사상의 중요도  $w_i$ 를 고려하여 양자를 조합한 형태로서  $F_i$ 의 영향을 정의한다. 여기에서 사용하는 각언어변수는  $[0,1]$ 로써 정의되는 대집합(support set)을 가진 퍼지집합으로서 규정되고 그 특성은 귀속도함수로서 주어진다. 중요도를 고려한  $F_i$ 의 신뢰도를  $E_i$ , 기본사상의 신뢰도를  $G_i$ , 중요도를  $w_i$ 라 하면, 이와 중요도의 Max연산에 의해  $E_i$ 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i = G_i \cup w_i \quad (12)$$

지금, 기본사상의 중요도를 그 합이 1이 되게 정규화(normalization)하고  $E_i, G_i, w_i$ 의 귀속도함수를 각기  $\mu_{E_i}, \mu_{G_i}, \mu_{w_i}$ 로 하면,  $\mu_{E_i}(x)$ 는

$$\mu_{E_i}(x) = \mu_{G_i}(x) \vee \mu_{w_i}(x), \quad x \in [0,1] \quad (13)$$

여기에서, 기호  $\vee$ 는 Max를 나타낸다.

## 5 신뢰성 pattern의 유사도평가

퍼지집합으로 표현된 인간의 신뢰성평가결과를 언어로써 표현하는 문제는 여러가지 레벨에서의 해가 존재하므로 어려운 문제이며, 지금까지 다수의 수법이 제안되어 왔지만 일반적인 해법은 존재하지 않는다. 본연구에서는 2종류의 퍼지집합간의 거리를 기준으로 신뢰성pattern의 유사도를 평가하는 것으로 한다. 이제 Fault Tree상의 개개의 기본사상에 대한 신뢰도의 평가치가 구조함수에 의해 정상사상에 대한 종합적 신뢰도(aggreated reliability)로 나타날 때, 이 종합적 신뢰도에 대한 귀속도함수를 사용하여 미리 정해진 전형적인(typical)신뢰성 pattern에 대한 유사도를 pattern인식의 개념을 사용하여 평가할 수 있다.

해석의 결과 얻어진 error possibility를  $F_R$ , 미리 정해진 전형적인 pattern의 error possibility를  $F_S$ 로하고 그 멤버십함수를 (1)식으로 하고,  $\alpha \in [0,1]$  에 대해서 0.1로 부터 1까지에서 0.1의 단위로  $\alpha$ -cut를 행하여,  $F_R, F_S$ 의  $\alpha$ -level집합을 각각  $(F_R)_\alpha = (x_{1R}(\alpha), x_{2R}(\alpha)), (F_S)_\alpha = (x_{1S}(\alpha), x_{2S}(\alpha))$ 로 하면,  $F_R$ 과  $F_S$ 의 거리는

$$d = \int_0^1 [ \{x_{1R}(\alpha) - x_{1S}(\alpha)\}^2 + \{x_{2R}(\alpha) - x_{2S}(\alpha)\}^2 ]^{1/2} d\alpha$$

로 나타낼 수 있으며, 일반적으로  $[0,1]$ 상에서 정의되는 사상  $i, j$ 의 평가치의 귀속도함수를  $\mu_{E_i}(x), \mu_{E_j}(x)$ 라 하면 이들간 유사도  $d_{ij}$ 는 식(20)으로 나타낼 수 있다.

$$d_{ij} = \int_0^1 | \mu_{E_i}(x) - \mu_{E_j}(x) | dx$$

이 식을 간단하게 하기 위하여, 종합신뢰도의 귀속도함수를  $\mu_{iE_T}(x)$ , 그림 3.과 같은 전형적 pattern의 귀속도함수를  $\mu_{jE_T}(x)$ 라 하면, 이들 귀속도함수가  $\alpha \in [0, 1]$  에 대하여 0.1간격의 대 집합상에서 나타나므로  $k(k=1, 2, \dots, l)$ 를 전형적 pattern의 수라 할 때, 이들간 유사도는

$$V_k = \int_0^1 | \mu_{iE_T}(x) - \mu_{jE_T}(x) | dx \quad (14)$$

로 변환할 수 있으며 이 값으로써 신뢰성평가결과가 어느 pattern으로 분류될 수 있는가를 판정한다.

여기에서는 인간의 신뢰도를 그림.3 과 같이, 「매우 높다」, 「높다」, 「보통」, 「낮다」, 「매우 낮다」의 5종류의 전형적인 pattern으로 분류하는데, 이 귀속도함수가 1에 가까우면 신뢰도가 높음을, 0에 가까우면 신뢰도가 낮음을 나타낸다. 즉, 구해진 귀속도함수가 어느 전형적인 pattern과 유사한가 하는 상대적인 값을 식(14)에 의해  $V(a)$ 에서  $V(e)$ 로 나타내는데, 이 값이 작을 수록 각 전형적인 신뢰성 pattern에 가까운 특성을 가진다고 해석할 수 있다.

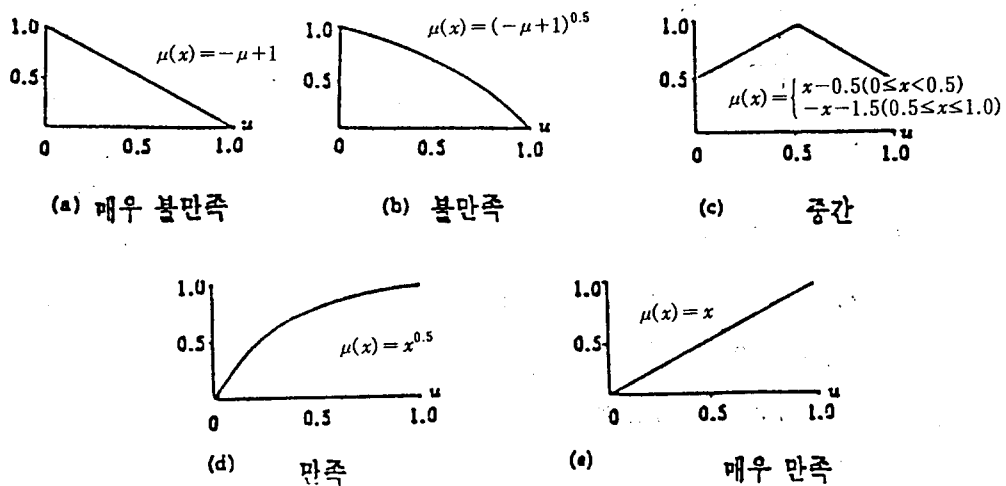


그림 3. 전형적 신뢰성 pattern

## 6. 수치예

### 6-1 기본사상별 퍼지집합

기본사상 ①, ②, ③, ④, ⑤가 그림.4와 같이 Fault Tree로써 연결되어 정상사상에 이를 때, 기본사상의 인간의 신뢰도의 평가치는 작업조건, 스트레스수준, 적성에 의해 정해지고 각 기본사상별 평가치는 표 3.과 같은 것으로 한다.

표 3. 기본사상별 평가치

기본사상	①	②	③	④	⑤
작업조건 ( $c^*$ )	1.0	0.5	0.3	0.0	0.7
스트레스수준 ( $s^*$ )	0.5	0.3	0.5	0.7	0.4
적성 ( $a^*$ )	1.0	0.5	0.8	1.0	0.8

즉, 그림 4.와 같이 정상사상에 포함된 인간의 신뢰성은 각기 다른 인간신뢰성을 가진 다수의 기본사상 및 중간사상들간의 동시작업(AND gate) 혹은, 연결작업(OR gate)의 관계를 통해 표현되는 것으로 한다. 단, 기계와 인간의 상호작용은 고려하지 않는 것으로 한다.

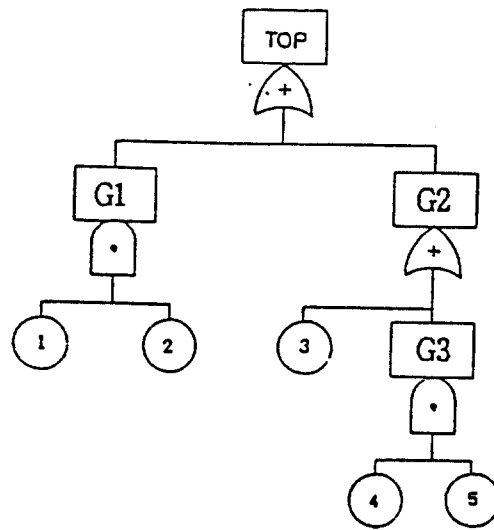


그림 4. Fault Tree의 예

여기에서,

○ : 기계 및 인간의 연합작업

□ : 기계작업

이며

①과 ②는 동시작업

④와 ⑤는 동시작업

③과 **G3**는 연결작업임을 나타낸다.

표 3.의 세 가지 요인에 대한 평가치를 식(5)에 의해  $x_o$ 를 구하면 먼저,

기본사상 ①에 대한  $x_o$ 은,  $c^*=1.0$ ,  $s^*=0.5$ ,  $a^*=1.0$ 의 최량의 상태에서  $x'_o$ 와 같고

$x_{o1}=0.31$ 이 되며,  $x_{o2}=0.36$ ,  $x_{o3}=0.40$ ,  $x_{o4}=0.67$ , 그리고  $x_{o5}=0.28$ 을 얻는다.

또한, 신뢰성평가의 애매함을 표.1에서  $m=2$ 로 할 때, 각 기본사상에 대한 신뢰도의 집합은 식 (1)과 그림 1.로 부터 아래의 표 4.와 같이 구할 수 있다.

표 4. 기본사상별 신뢰도의 퍼지집합

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_{E_1}(x)$	0.34	0.53	0.81	1.0	0.81	0.58	0.37	0.25	0.17	0.13	0.10
$\mu_{E_2}(x)$	0.28	0.43	0.66	0.93	0.97	0.72	0.46	0.30	0.21	0.15	0.11
$\mu_{E_3}(x)$	0.24	0.36	0.56	0.83	1.0	0.83	0.56	0.36	0.24	0.17	0.12
$\mu_{E_4}(x)$	0.1	0.13	0.18	0.27	0.41	0.63	0.91	0.98	0.75	0.49	0.31
$\mu_{E_5}(x)$	0.39	0.61	0.89	0.99	0.78	0.51	0.33	0.22	0.16	0.12	0.09

## 6.2 기본사상별 중요도

이제, 중요도를 고려한 각 기본사상의 신뢰도평가치를 구하기 위해 Saaty의 방법에 따른 중요도계산은, 1쌍비교에 의한 중요도 평가치가 표 5.와 같이 주어졌을 때,

표 5. 1쌍비교결과 평가치

	①	②	③	④	⑤
①	1	2.0	1.2	1.5	2.5
②	0.5	1	0.6	0.8	1.5
③	0.83	1.67	1	1.0	1.8
④	0.67	1.25	1.0	1	1.2
⑤	0.4	0.67	0.56	0.83	1
계	3.4	6.59	4.36	5.13	8.00

각 기본사상에 대한 정규화 후의 중요도  $w$ 는

$$w = (0.297, 0.156, 0.23, 0.191, 0.126)$$

이며, 평가결과의 정합성을 판정하는 척도로서의 최대고유치는

$$\lambda_{\max} = 5.02$$

$$\text{또, } CI = (\lambda_{\max} - n)(n-1)$$

$$= 0.08$$

이 얻어지며, 표 2.에서  $RI$ 는 1.12임으로

$$CR = CI/RI$$

$$= 0.08/1.12 = 0.0$$

따라서,  $CR \leq 0.1 \sim 0.15$ 이면 정합성이 있다고 판단해도 좋다.

## 6.3 기본사상의 중요도를 고려한 정상사상의 종합신뢰도

기본사상에 대한 신뢰도의 평가치와 중요도의 Min연산으로 구한 각 기본사상에 대한 신뢰도  $\mu_{E_i}$ 는,

$$\mu_{E_i} = \mu(x) \vee w_i \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

이며, 여기에서  $w_i$ 는 기본사상의 중요도를 의미하며, 각 기본사상에 대한 중요도를 고려한 신뢰도는 표 6.과 같다.

표 6. 중요도를 고려한 기본사상별 인간신뢰도

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_{E_1}(x)$	0.34	0.53	0.81	1.0	0.81	0.58	0.37	0.3	0.3	0.3	0.3
$\mu_{E_2}(x)$	0.28	0.43	0.66	0.93	0.97	0.72	0.46	0.30	0.21	0.16	0.16
$\mu_{E_3}(x)$	0.24	0.36	0.56	0.83	1.0	0.83	0.56	0.36	0.24	0.23	0.23
$\mu_{E_4}(x)$	0.19	0.19	0.19	0.27	0.41	0.63	0.91	0.98	0.75	0.49	0.31
$\mu_{E_5}(x)$	0.39	0.61	0.89	0.99	0.78	0.51	0.33	0.22	0.16	0.13	0.13

다음, AND, OR gate로 연결된 기본사상, 중간사상, 정상사상의 신뢰도는 그림 8.에 따라서 다음과 같이 구한다.

먼저, 기본사상④와 ⑤는 AND gate로써 연결되어 있으므로,  $\wedge$ 연산을 통하여 구할 수 있으며, 이는 중간사상  $\boxed{G3}$ 의 입력변수로 된다.

표 7.  $\mu_{E_{\alpha}} = \mu_{E_4} \wedge \mu_{E_5}$

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_{E_{\alpha}}$	0.19	0.19	0.19	0.27	0.41	0.51	0.33	0.22	0.16	0.13	0.13

또한, 그림 에서와 같이  $\boxed{G3}$ 와 기본사상 ③은 역시 AND gate로 연결되므로  $\mu_{E_{\alpha}} \wedge \mu_{E_3}$ 에 의해  $\boxed{G2}$ 에의 입력변수를 구한다.

표 8.  $\mu_{E_{\alpha}} = \mu_{E_{\alpha}} \wedge \mu_{E_3}$

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_{E_{\alpha}}$	0.19	0.19	0.19	0.27	0.41	0.51	0.33	0.22	0.16	0.13	0.13

다음, 기본사상 ①, ②는 OR gate로 연결되어 그 결과의 신뢰도평가치는 중간사상  $\boxed{G1}$ 의 입력변수가 된다.  $\mu_{E_1} \vee \mu_{E_2}$ 는,

표 9.  $\mu_{E_{\alpha}} = \mu_{E_1} \vee \mu_{E_2}$

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_{E_{\alpha}}$	0.34	0.53	0.81	1.0	0.97	0.58	0.46	0.3	0.3	0.3	0.3

최종적으로 정상사상에서의 신뢰도  $\mu_{E_T}$ 를 구하기 위해, 중간사상  $\boxed{G1}$ 과  $\boxed{G2}$ 가 OR gate로써 정상사상에 연결되어 있음을 고려하여,  $\boxed{G1}$ 와  $\boxed{G2}$ 의  $\vee$ 연산을 행하면 표 10.의 정상사상의 인간신뢰도의 퍼지집합을 구할 수 있다.

표 10.  $\mu_{E_T} = \mu_{E_{\alpha}} \vee \mu_{E_{\alpha}}$

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_{E_T}$	0.34	0.53	0.81	1.0	0.97	0.58	0.46	0.3	0.3	0.3	0.3

따라서, 그림 6.의 5종류의 전형적인 pattern에 대한 신뢰도의 귀속도함수가 아래 표 11.과 같을 때,

표 11. 전형적인 pattern상의 귀속도함수

$x$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\mu_a(x)$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
$\mu_b(x)$	1.0	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.45	0.32	0
$\mu_c(x)$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
$\mu_d(x)$	0	0.32	0.45	0.55	0.63	0.71	0.77	0.84	0.89	0.95	1.0
$\mu_e(x)$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

식(14)와 같이 전형적인 pattern과 평가결과와의 유사도를  $V_l (l = a, b, \dots, e)$  라 하면,

$$V_l = \sum_{i=a}^e \mu_i(x) \text{에 따라서}$$

$$V_a = 2.45$$

$$V_b = 2.54$$

$$V_c = 2.87$$

$$V_d = 4.62$$

$$V_e = 5.07$$

로서, 정상사상에 대한 신뢰성평가 pattern은 「매우 높다」에 가깝다고 평가할 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는, 인간신뢰성요인을 정상사상, 중간사상 및 기본사상으로써 Fault Tree구조로 나타내었고 또, 퍼지추론을 이용하여 인간신뢰도를 퍼지집합으로 표현한 후 이들 요인간의 인과관계를 구조함수를 사용하여 분석하고, 주관적불확정성의 정도와 신뢰성요인간 상대적중요도가 정상사상의 종합적신뢰도에 미치는 영향을 평가하였다.

즉, 본 연구에서 얻어진 결론은 아래와 같다.

(1) 정상사상에 영향을 미치는 직접적인 요인과 2차적 요인을 채택하여, 이들의 상호관련성 및 이들이 시스템의 인간신뢰성에 미치는 영향의 정도를 명확히 하기 위해서 FTA의 수법을 도입하였다. 그러나, 신뢰성해석에 종래의 2치논리연산에 기초를 둔 FTA를 이용할 경우 계산이 복잡하게 되고, 기본사상이 가진 주관적 불확정성을 고려한다는 것이 불가능하다.

그러나, 본 연구에서와 같이 퍼지연산에 기초한 FTA를 이용하면, 구조함수의 계산을 간단하게 행할 수 있고, 기본사상이 가진 주관적 불확정성의 영향을 고려한 시스템의 신뢰성해석을 행할 수가 있다.

(2) 정상사상의 종합적신뢰도에 기본사상간 상대적중요도의 영향을 반영하고, pattern인식의 개념을 이용하여 인간신뢰성을 언어로써 표현하여 인간-기계system의 인간신뢰성을 보다 명확한 형태로 정량화하였다..

## 8. 참고문헌

- (1) Pugsley, A., "The Prediction of the Structural Accidents", Structural Engineer, Vol.51, No.3, pp.195-196, 1973.
- (2) Yasuhiro Tsujimura and Mitsuo Gen, "Fault Tree Analysis Based on the Fuzzy Set Theory", 9th Fuzzy System Symposium, May, pp.821-824, 1993
- (3) 寺野, 淺居, 菅野, "ファジィシステム入門", オーム社, 1987
- (4) T. Onisawa, "An Application of Fuzzy Concept to Modelling of Reliability Analysis", Fuzzy Sets and Systems, Vol.37, No.3, pp.267-286, 1990
- (5) 鬼澤, "自然言語を用いるシステムの信頼性解析におけるファジィ集合の演算について", 日本ファジィ學會誌, Vol.5, No.1, pp.43-544, 1993
- (6) Y. Nishiwaki, "Human Factors and Fuzzy Set Theory for Safety Analysis", IAEA-SR-111/11, pp.253-274, 1985
- (7) T. Onisawa, "An Approach to Human Reliability in Man-Machine System Using Error Possibility", Fuzzy Sets and Systems, 27-2, 87/103, 1988
- (8) T. Onisawa and Nishiwaki, "Fuzzy Human Reliability Analysis on the Chernobyl

- Accident”, Fuzzy Sets and Systems, 28-2, 115/127, 1988
- (9)菅野道夫, “ファジィ制御”, 日刊工業新聞社, 1988
- (10)E. J. Henley, “Reliability Engineering and Risk Assessment”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981
- (11)Saaty, T. L., “A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures”, Journal of Mathematical Psychology, 15(3), pp.234-281, 1977
- (12)Blockley, D., “Predicting the Likelihood of Structural Accidents”, Proc. ICE, Vol.59, pp.659-668, 1975