

시스템 신뢰도 분석에서의 퍼지집합 응용†

윤 원 영* · 허 길 환*

Fuzzy Sets Application to System Reliability Analysis†

Wonyoung Yun* · Gilhwan Heo*

Abstract

In this paper, we deal with the application of the fuzzy sets theory to evaluate and estimate the system reliability under the fault tree analysis. We formulate the uncertainty of component reliability to fuzzy sets, and propose a procedure for obtaining the system reliability in case the system structure is described by fault tree. An importance measure of each component is proposed. Computer program for fuzzy fault tree analysis(FFTA) is developed using C language to obtain the system reliability and the component's fuzzy importance.

1. 서 론

오늘날 대부분의 설비나 기계 또는 제품들은 많은 부품들로 구성되어진 복잡한 형태의 구조를 가지고 있다. 그러면서도 최근에는 보다 높은 신뢰도를 가지는 설비나 제품들을 요구하고 있는 것도 사실이다. 이처럼 복잡한 구조의 시스템을 설계, 제작, 운영, 혹은 정비하는 각 단계에서 이루어지는 의사결정을 위해 시스템의 신뢰도를 평가하고 예측하는 일은 매우 중요한 과제이다.

하지만 지금까지의 구조신뢰성 이론체계로써 시스템신뢰도를 평가하기에는 불충분한 경우가 존재한다. 부품의 경우에 높은 신뢰도를 일반적으로 요구하고 있기 때문에 수명시험을 통한 데이터의 수집이 어렵고, 이로 인해 충분한 고장자료가 부족한 경우가 많다. 그러므로 이같은 상황에 적합한 분석방법으로 시스템신뢰도 평가에 퍼지집합론(Fuzzy Sets Theory)을 응용하는 것이다. 이같은 문제에 대한 논문으로는 Cai 등[2]과 Singer[9] 그리고 Tanaka 등[10]이 있다. Cai 등[2]은 부품에 대한 신뢰도정보를 확률(Probability) 대신에 가능성(Possibility)으로 표현하여 시스템 상태를 퍼지변수(Fuzzy Variables)로 표현하는 방법을 제안하고 있다. 이 논문에서

† 본 연구는 92년도 과학재단 기초연구비 지원에 의하여 수행되었음.(과제번호 921-0900-036-1)

* 부산대학교 산업공학과

고려하는 시스템의 구조는 직렬 및 병렬 구조 그리고 일반 구조로 구성된 경우를 제시하고 있다. 그리고 Singer[9]와 Tanaka 등[10]은 부품에 대한 신뢰도 정보가 불확실한 상황에서의 시스템 신뢰도 평가를 위해 퍼지집합론을 이용한 방법을 제안하고 있다. 그러나 두 논문에서 고려하는 시스템의 구조는 직렬과 병렬 구조로 구성된 경우만을 국한하여 제시하고 있다. Grazdik [6]은 시스템의 고장을 유발하는 원인과 그 징후 사이의 관계가 퍼지집합으로 표현될 때, 시스템의 고장진단과 예방방법을 제시하였다.

그러므로 본 논문에서는 시스템의 구조가 결함수 구조(Fault Tree Structure)인 경우에 부품 신뢰도의 불확실성을 고려하여 퍼지집합론에 기초한 시스템신뢰도의 평가방법을 제안하고, 이것을 위한 FTA 프로그램을 개발하고자 한다. 따라서 본 논문의 목적은 일반적인 시스템 구조의 신뢰도 평가를 위하여 퍼지집합론의 응용에 대한 기초적인 분석체계를 마련하고자 하는 것이다.

또한 기본사상의 중요도(Importance)를 계산하는 문제도 다루고자 한다. 보통 중요도의 값들은 기본사상들의 발생확률들과 정상사상의 실패확률과 같은 확률정보(Probability Information)를 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 기본사상의 상태가 퍼지사상으로 표현된다면 단지 확률정보를 기초로 각 사상의 중요도를 논의하는 것은 불가능하다. Furuta & Shiraishi[4]는 퍼지 최대/최소 연산자(Fuzzy Max/Min Operator)를 이용한 신뢰도 함수의 계산과정의 간소화와 퍼지 적분(Fuzzy Integral)을 이용한 퍼지중요도(Fuzzy Importance)를 제안하고 있다. 그 외 퍼지수들을 비교하는 측도들에 대한 연구로서는 Bortolan & Degani[1], Chen[3], 그리고 McCahon & Lee[8] 등이 있다. 본 논문에서는 간단하며 합리적인 퍼지중요도를 정의하고 프로그램에 이 중

요도를 계산하는 부분을 포함하였다. 그러므로 본 연구에서 개발된 프로그램으로 부품신뢰도에 대한 퍼지정보(Fuzzy Information)들과 시스템 구조로부터 시스템신뢰도에 대한 평가와 부품의 퍼지중요도 평가를 동시에 할 수 있을 것이다.

2. 퍼지집합론 및 퍼지중요도

2.1 퍼지집합론

기존의 FTA 신뢰도 연구에서 부품 신뢰도, R_i 는 추정이 가능한 것으로 인식하고, 시스템 구조에 따른 신뢰도 계산방법에 대한 것이 대부분이다. 그러나 R_i 의 추정은 매우 어려운 경우가 많으므로 전문가들의 R_i 에 대한 판단을 기초로 시스템신뢰도 예측을 다루는 데, 이같은 R_i 에 대한 전문가 판단을 퍼지집합개념을 이용하여 표현하는 것이 본 논문의 한 방법이다.

본 연구는 FTA에서의 기본사상들에 대한 발생가능성을 표현하기 위해서 퍼지수(Fuzzy Number)를 이용하고자 한다. 본 연구에서 사용되는 퍼지수는 Zadeh가 제안한 삼각꼴 퍼지수와 사다리꼴 퍼지수이다. 먼저 삼각꼴 퍼지수를 살펴보면 그 자격함수는 3 개의 모수 (a,b,c)로 표현된 식 2.1과 같다.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} & a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (2.1)$$

그리고 퍼지수의 연산을 위한 합과 차 그리고 곱 연산식은 다음과 같다.

1) 합

$$A(+)B = (a_1, b_1, c_1) (+) (a_2, b_2, c_2)$$

$$= (a_1+a_2, b_1+b_2, c_1+c_2)$$

로서 다시 삼각꼴 퍼지수이다.

2) 차

$$A(-)B = (a_1, b_1, c_1) (-) (a_2, b_2, c_2)$$

$$= (a_1-a_2, b_1-b_2, c_1-c_2)$$

로서 다시 삼각꼴 퍼지수이다. ($a_1 > a_2, c_1 > c_2$)

차 연산은 역상(Reverse Imagine)에 의해 합 연산으로 표현이 가능하다. 즉, $A(-)B = A(+)$ B' 여기서 $B' = (c_2, b_2, a_2)$ 이다.

3) 곱

$$A(\circ)B = (a_1, b_1, c_1) (\circ) (a_2, b_2, c_2)$$

$$\approx (a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2)$$

로서 근사적으로 삼각꼴 퍼지수이다.

다음으로 사다리꼴 퍼지수의 경우는 4개의 모 수 (a,b,c,d)로 표현되는 데, 그 자격함수는 식 2.2와 같다.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad (2.2)$$

그리고 퍼지수의 연산을 위한 합과 차 그리고 곱 연산식은 다음과 같다.

1) 합

$$A(+)B = (a_1, b_1, c_1, d_1) (+) (a_2, b_2, c_2, d_2)$$

$$= (a_1+a_2, b_1+b_2, c_2+c_2, d_1+d_2)$$

2) 차

$$A(-)B = (a_1, b_1, c_1, d_1) (-) (a_2, b_2, c_2, d_2)$$

$$= (a_1-a_2, b_1-b_2, c_2-c_2, d_1-d_2)$$

여기서 ($a_1 > a_2, b_1 > b_2, c_1 > c_2, d_1 > d_2$)

차 연산은 역상(Reverse Imagine)에 의해 합 연산으로 표현이 가능하다. 즉, $A(-)B = A(+)$ B' 여기서 $B' = (d_2, c_2, b_2, a_2)$ 이다.

3) 곱

$$A(\circ)B = (a_1, b_1, c_1, d_1) (\circ) (a_2, b_2, c_2, d_2)$$

$$\approx (a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2, d_1 d_2)$$

위의 두 간단한 자격함수에서도 차 연산과 곱 연산인 경우에 기본 형태(삼각꼴, 사다리꼴)가 제한적으로 유지됨을 알 수 있다. 또한 일반적인 시스템의 신뢰도 표현식은 기존의 직렬 구조이나 병렬 구조의 신뢰도 표현식보다 더 많은 연산을 요구하므로 본 연구에서는 제한적으로 성립되는 위의 결과를 근사적으로 사용하고자 한다.

2.2 퍼지 중요도(Fuzzy Importance)

기본사상과 정상사상의 퍼지수와 관련된 비정 확성에 대한 평가는 중요한 연구 분야 중의 하나이다. FTA에서 신뢰도 중요도(Reliability Importance)의 개념은 기본사상들이 정상사상에 얼마 만큼의 영향을 미치는가 하는 평가로 사용된다. 그래서 신뢰도 중요도는 시스템 설계 및 평가에 유효하게 사용된다. 지금까지의 많은 신뢰도 중요도 응용에서는 확률 개념을 근간으로 하고 있다. 보통 신뢰도 중요도의 값들은 기본사상들의 발생확률들과 정상사상의 실패확률과 같은 확률정보를 이용하여 계산되어 진다. 하지만 이 확률을 근간으로 한 신뢰도 중요도 개념은 기본사상들의 발생이 정확하게 묘사되기 어려운 경우에는 부적절할 수 있다. 즉, 기본사상들의 상

태가 퍼지사상으로 표현된다면 단지 확률정보를 기초로 하여 각 사상의 중요도를 논의하는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 구조 중요도 (Structural Importance)와 신뢰도 중요도의 대안으로 퍼지 중요도(Fuzzy Importance)를 제안한다.

일반적으로 퍼지중요도는 Removal, 최빈치 (Mode), 그리고 발산성(Divergence)과 같은 측도로 기준조건을 만족하는 선형관계의 순서로 정해진다. Removal 측도는 구해진 임시 퍼지 중요도(Temporary Fuzzy Importance,TFI)의 요소 중에서 최빈치에 대해서는 상대적으로 많은 가중치를 주어서 구한 대표값을 기준으로 중요도 순서를 결정하는 데, 기본사상 A의 TFI가 (a, b, c)로 주어진 삼각플 퍼지수인 경우를 예를 들면

$$\text{Removal, } \hat{R}_A \text{은 } \hat{R}_A = \frac{(a+2 \times b+c)}{4} \text{로 정의된다.}$$

그리고 최빈치 측도는 구해진 TFI에서 가장 빈도가 높은 값을 가진 부품의 순으로 중요도로 정한다. 즉, Removal에서 b의 값에만 가중치를 두어 계산한 값으로 해석할 수 있다. 마지막으로 발산성 측도는 구해진 TFI의 산포를 중요도의 측도로 사용한다.

본 논문에서 제안한 “적분을 이용한 가중합 (Weighted Sum using Integral)”이라는 새로운 측도를 사용한 퍼지중요도를 계산하기 전에 부품 i의 임시 퍼지 중요도인 $I_T^{(i)}$ 및 퍼지중요도에서 필요한 새로운 모수를 다음과 같이 정의한다.

$R_S(i\text{부품 작동})$: 부품 i가 작동한다고 가정할 때의 시스템신뢰도

$R_S(i\text{부품 고장})$: 부품 i가 고장이라고 가정할 때의 시스템신뢰도

$\mu_i(x)$: TFI의 자격함수, $x \in (a,b)$.

그러면 부품 i의 TFI, $I_T^{(i)}$ 는 기존의 신뢰도 중요도 개념을 확장하여

$$I_T^{(i)} = R_S(i\text{부품 작동}) - R_S(i\text{부품 고장}) \tag{2.3}$$

으로 정의가 가능하다. 여기서 퍼지 차 연산의 형태로 표시되어진 TFI는 다시 하나의 퍼지집합이 된다. 그래서 본 논문에서 사용한 가중합 퍼지중요도는

$$I_{ws}^{(i)} = \int_a^b \mu_i(x) \cdot x \, dx \tag{2.4}$$

이다. 즉, 가중합 퍼지중요도는 가중치를 주는데 있어서 구하여진 임의의 TFI, x에 대해서 주어진 구간에 대해 값 x의 자격함수를 가중치로 하는 적분에 의한 가중합으로 나타낸 것이다. 만일 $I_T^{(i)}$ 의 퍼지수가 (a, b, c, d)인 경우에 i부품의 가중합 퍼지중요도는 식 2.4에 의해서

$$\begin{aligned} I_{ws}^{(i)} &= \int_a^b \frac{(x-a)}{(b-a)} x \, dx \\ &+ \int_b^c x \, dx + \int_c^d \frac{(d-x)}{(d-c)} x \, dx \\ &= \frac{1}{(b-a)} \int_a^b (x^2 - ax) dx + \int_b^c x \, dx \\ &+ \frac{1}{(d-c)} \int_c^d (dx - x^2) dx \\ &= \frac{1}{(b-a)} \left(\frac{b^3}{3} - \frac{ab^2}{2} + \frac{a^3}{6} \right) + \frac{c^2 - b^2}{2} \\ &+ \frac{1}{(d-c)} \left(\frac{d^2}{6} - \frac{dc^2}{2} + \frac{c^3}{3} \right) \end{aligned}$$

이다. 그러므로 각 기본사상에 대한 TFI들이 구해지면 그 퍼지수가 어떠한 형태를 가지더라도 퍼지 중요도의 비교는 가능하다. 그리고 식 2.3으로 중요 부품의 신뢰도 개선이 시스템신뢰도에 미치는 영향도 평가가 가능하다.

3. FFTA 프로그램

3.1 FT 처리 로직

본 프로그램은 먼저 복잡한 구조의 FT를 아래의

표 1과 같은 양식에 맞추어 데이터화일을 미리 작성해야 한다.

표 1. 결합수의 데이터화일 형식

(실제 데이터화일에서는 OR Gate : "0", AND Gate : "1")

Gate Name	Gate Type	각 Gate의 Subevent 수	Subevent		
			1	2	...
A	OR	2	B	C	...
B	AND	2	4	D	...
.
.
.

그리고, 작성된 위의 표 1에서 아래에 설명된 로직에 의해 MPS를 구하고, 구한 MPS를 이용하여 구조함수를 나타낸다. 물론 MCS 역시 같은 방식에 의해 나타낼 수 있다.

MPS를 구하고자 할 때, MPS를 구하기 전에 부울 대수(Boolean Algebra) 연산식을 응용하여 구해지는 前단계 MPS인 BIPS(Boolean Indicated Path Set) 행렬을 먼저 구해야 한다. BIPS란 MPS의 前단계 세트로서 이것의 요소 중에는 중복된 사상이 존재할 수도 있다. 그래서 정해진 규칙-누승동률의 법칙, 최소 상승항 우선의 원칙-에 따라 BIPS에서 중복된 사상을 제거한 후에 MPS가 된다. 그리고 BIPS의 행과 열의 수를 계산하기 전에 다음과 같은 모수의 정의가 필요하다. BIPS의 행의 수 계산에서 i번째 게이트에의 i번째 입력모수를 $x_{i,j}$ 라고 한다면, 모수 $x_{i,j}$ 가 기본 사상일 경우에는 $x_{i,j}$ 를 1로 두고, 모수 $x_{i,j}$ 가 게이트 k일 경우에는 $x_{i,j}$ 를 X_k 로 둔다. 또, 열의 수에 대한 계산도 역시 i번째 게이트에의 j번째 입력을 $y_{i,j}$ 라는 모수로 두고, 모수 $y_{i,j}$ 가 기본 사상일 경우에는 $y_{i,j}$ 를 1로 두고, 모수 $y_{i,j}$ 가 게이트 k일 경우에는 $y_{i,j}$ 를 Y_k 로 둔다. 그러면, BIPS 행렬의 행과 열의 수 계산은 각각 식 3.1

과 식 3.2에 의해 구할 수 있다.

$$X_i = \begin{cases} x_{i,1} \cdot x_{i,2} \cdot \dots \cdot x_{i,jmax} \\ ; i \text{가 OR게이트일 경우} \\ x_{i,1} + x_{i,2} + \dots + x_{i,jmax} \\ ; i \text{가 AND게이트일 경우} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$Y_i = \begin{cases} y_{i,1} + y_{i,2} + \dots + y_{i,jmax} \\ ; i \text{가 OR게이트일 경우} \\ \max(y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,jmax}) \\ ; i \text{가 AND게이트일 경우} \end{cases} \quad (3.2)$$

그 다음 BIPS의 크기가 결정이 되면, 이 행렬에 표 1의 하위사상 기호를 순서대로 기입해 감으로써 BIPS를 구할 수 있다. 기입 수순은 번째 게이트의 종류가 OR 게이트인 경우에는 i번째 게이트의 하위사상들을 가로로 기입하고, AND 게이트인 경우에는 i번째 게이트의 하위사상들을 세로로 기입한다.

이렇게 구해진 BIPS에 누승동률의 법칙과 최소 상승항 우선의 원칙을 적용하면 비로소 MPS가 된다.

그리고 MCS에 대한 계산을 수행하면, MPS의 BIPS와 마찬가지로 MCS의 前단계 세트인 BICS(Boolean Indicated Cut Set) 행렬도 그 요소들 중에는 중복사상이 존재할 수 있고, 따라서 BICS를 정해진 규칙에 따라 중복사상들을 제거하면 MCS가 된다. MCS의 BICS의 행과 열의 수는 쌍대성을 이용한-AND 게이트는 OR 게이트로, 그리고 OR 게이트는 AND 게이트로 서로 치환한-쌍대 결합수(Dual Fault Tree, DFT)를 이용하여 구할 수 있다. DFT란 원 FT의 이론곱(AND 게이트)은 이론합(OR 게이트)으로, 이론합은 이론곱으로 치환하여 만든 FT이다. 그래서 이 DFT에서 MPS를 구하면 그것은 원 FT의 MCS가 된다. BICS의 행과 열의 수 계산식은 식 3.1과 식 3.2와 유사하게 각각 식 3.3과 식 3.4

에 나타나 있다.

$$X_i = \begin{cases} x_{i,1} \cdot x_{i,2} \cdot \dots \cdot x_{i,jmax} \\ \quad ; i \text{가 AND게이트일 경우} \\ x_{i,1} + x_{i,2} + \dots + x_{i,jmax} \\ \quad ; i \text{가 OR게이트일 경우} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$Y_i = \begin{cases} y_{i,1} + y_{i,2} + \dots + y_{i,jmax} \\ \quad ; i \text{가 AND게이트일 경우} \\ \max(y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,jmax}) \\ \quad ; i \text{가 OR게이트일 경우} \end{cases} \quad (3.4)$$

그리고 BICS의 크기가 결정되어지면, BICS 행렬의 기입 수순은 BIPS와는 반대로 i 번째 게이트의 종류가 OR 게이트인 경우에는 i 번째 게이트의 하위사상들을 세로로 기입하고, AND 게이트인 경우에는 i 번째 게이트의 하위사상들을 가로로 기입한다.

이렇게 구해진 BICS에 누승등물의 법칙과 최소 상승항 우선의 원칙을 적용하면 MCS가 된다. 누승등물의 법칙과 최소 상승항 우선의 원칙은 표 2에 예를 들어 설명하였다. 그리고 이 모든 로직들은 프로그램되어져 있다.

표 2. 누승등물의 법칙과 최소 상승항 우선의 원칙

예		
누승등물의 법칙 ($F_1^* = F_1$)	$F_1 \cdot F_3 \cdot F_3$	$F_1 \cdot F_3$
	$F_2 \cdot F_2 \cdot F_5 \cdot F_5$	$F_2 \cdot F_5$
	$F_4 \cdot F_4 \cdot F_4 \cdot F_6$	$F_4 \cdot F_6$
최소 상승항 우선의 원칙	$F_2 \cdot F_4$	$F_2 \cdot F_4$
	$F_2 \cdot F_3 \cdot F_4$	
	$F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5$	
	$F_1 \cdot F_4 \cdot F_5$	$F_1 \cdot F_4 \cdot F_5$
	$F_1 \cdot F_4 \cdot F_5 \cdot F_6$	
	$F_1 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5$	

3.2 FFTA 프로그램

본 논문에서 다루는 시스템의 경우 n 개의 서

로 독립인 부품으로 이루어져 있으며, 부품 상태 및 시스템 상태는 두 가지 상태-즉, 정상과 고장-만을 가지는 이진상태시스템(Binary-State System)을 가정한다. 이 경우에 부품 i 의 상태변수는

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{ 만일 부품 } i \text{가 작동} \\ 0, \text{ 만일 부품 } i \text{가 고장} \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,n$$

으로, 시스템 상태함수 Φ 는

$$\Phi = \begin{cases} 1, \text{ 만일 시스템이 작동} \\ 0, \text{ 만일 시스템이 고장} \end{cases}$$

으로 표현된다.

시스템의 상태는 부품들의 상태에 의해서만 결정된다고 가정하면,

$\Phi = \Phi(X)$ 이 되고, 여기서 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 이다.

시스템신뢰도, $R_S = E[\Phi(X)]$ 이고, 부품 신뢰도, $R_i = P[x_i=1]$ 이면, $R_S = f(R_1, R_2, \dots, R_n)$ 이 된다.

시스템의 부품신뢰도인 R_i 들이 퍼지수이므로 시스템신뢰도 역시 퍼지수로서 표현 가능할 것이다. 따라서 기존의 FTA와 다르게 본 논문에서 작성하고자 하는 FTA 분석 절차는 그림 1과 같다. 시스템의 구조가 결함수(Fault Tree, FT)이고, 이 FT의 각 기본사상의 발생확률이 퍼지수로 주어진 경우에 기존의 신뢰도 계산공식을 이용하여 정상사상에 대한 신뢰도함수를 구하고 이에 기본사상들의 자격함수를 대입하여 시스템신뢰도의 자격함수 산출, 기본사상의 중요도 평가 및 결정, 그리고 주요 기본사상의 개선에 따른 시스템신뢰도에서의 효과과약을 한다.

본 FFTA(Fuzzy Fault Tree Analysis) 프로그램은 MCS(Minimal Cut Sets)와 MPS(Minimal Path Sets)의 탐색을 위해 Fussell이 개발한 프로그램 MOCUS에서 제안한 알고리즘을 사용하

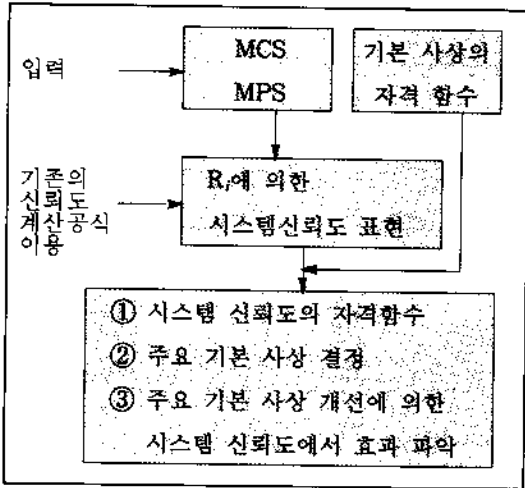


그림 1. 제안된 FTA 절차

었는데, 이 알고리즘은 탑 다운(Top-Down) 방식을 채택하고 있다. 그리고, 이 알고리즘은 AND 게이트는 항상 컷 세트(Cut Set)의 크기를 증가시키고, OR 게이트는 항상 컷 세트의 수를 증가시킨다는 것을 기초로 한다. 그리고 컷 세트와 패스 세트(Path Set)는 서로 쌍대성을 가지고 있기 때문에 MCS를 알고 있다면 간단한 조작-OR 게이트는 AND 게이트로, 반대로 AND 게이트는 OR 게이트로 치환-만으로도 손쉽게 MPS를 계산할 수 있다.

구해진 MCS와 MPS를 이용하여 시스템신뢰도를 구하기 위해 필요한 기본사상에 대한 퍼지수 연산은 Zadeh가 제안한 삼각꼴 퍼지수와 사다리꼴 퍼지수 연산(Zadeh [11])을 사용하였다. 신뢰도함수의 기본사상 연산을 통해 시스템신뢰도를 계산한다.

그리고 퍼지 중요도 산출에서는 하나의 휴리스틱 방법인 “적분을 이용한 가중합” 측도를 사용하여 정상사상에 대한 기본사상들의 퍼지 중요도를 계산하였다. 적분을 이용한 가중합 측도를 사용한 식 2.4를 이용하여 삼각꼴 퍼지수와 사다리꼴 퍼지수에 대한 기본사상의 가중합 퍼지중요도를 계산해 보면, 어떤 기본사상 A의 TFI가 삼각

꼴퍼지수 (a, b, c)일 때, 이것에 대한 가중합 퍼지중요도는 식 3.5와 같은 적분식에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned}
 I_{ws}^{f(i)} &= \int_a^b \frac{(x-a)}{(b-a)} x \, dx \\
 &+ \int_b^c \frac{(c-x)}{(c-b)} x \, dx \\
 &= \frac{1}{(b-a)} \int_a^b (x^2 - ax) \, dx \\
 &+ \frac{1}{(d-c)} \int_b^c (cx - x^2) \, dx \\
 &= \frac{1}{(b-a)} \left(\frac{b^3}{3} - \frac{ab^2}{2} + \frac{a^3}{6} \right) \\
 &+ \frac{1}{(c-b)} \left(\frac{c^3}{6} - \frac{cb^2}{2} + \frac{b^3}{3} \right) \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

그리고 어떤 기본사상 B의 TFI가 사다리꼴 퍼지수 (a, b, c, d)일 경우에는 이것에 대한 가중합 퍼지중요도도 역시 식 3.6과 같은 적분식에 의해 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{ws}^{f(i)} &= \int_a^b \frac{(x-a)}{(b-a)} x \, dx + \int_b^c x \, dx \\
 &+ \int_c^d \frac{(d-x)}{(d-c)} x \, dx \\
 &= \frac{1}{(b-a)} \left(\frac{b^3}{3} - \frac{ab^2}{2} + \frac{a^3}{6} \right) + \frac{c^2 - b^2}{2} \\
 &+ \frac{1}{(d-c)} \left(\frac{d^3}{6} - \frac{dc^2}{2} + \frac{c^3}{3} \right) \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

이렇게 구해진 기본사상들의 퍼지 중요도로 주요 기본사상들을 결정하고, 이 주요 기본사상들의 개선에 따른 시스템신뢰도의 개선효과를 파악한다.

3.3 FFTA프로그램 입출력 절차

본 논문에서 개발한 FFTA프로그램의 데이터 입력은 결함수(Fault Tree)와 퍼지수에 관련된 데이터들은 데이터 화일로 입력을 받을 수 있게 되어 있으며, 결함수와 퍼지수를 제외한 데이터

- 기본사상의 수, 출력방향 등-에 대한 입력은 대화형 입력방식(Interactive Method)으로 처리되게 지원한다. 그리고 본 FFTA 프로그램에서의 출력은 MCS와 MPS, 정상사상에 대한 시스템 신뢰도, 그리고 각 기본사상들의 퍼지 중요도 계산에 대한 것을 화면상으로 뿐만 아니라 화일로도 출력할 수 있게 지원한다. 그리고 본 연구에서 개발된 FFTA 프로그램의 개략적인 입력과 출력의 흐름은 그림 2에 나타나 있다.

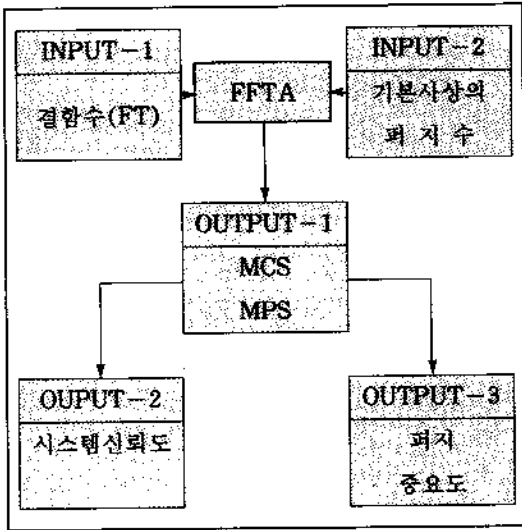


그림 2. FFTA시스템의 전체흐름도

3.4 적용예

본 연구에서 개발한 프로그램의 입력과 내부계산 절차 및 출력을 알아보기 위하여 다음의 예제를 이용하여 다루어 본다. 그림 3과 같이 5개의 부품으로 구성된 시스템의 결함수(Fault Tree)와 표 3과 같은 기본사상에 대한 퍼지수가 주어졌다고 가정하면, 본 프로그램에서는 결함수와 퍼지수에 대해서 먼저 결함수는 표 4의 형식으로 작성한 뒤 Gate Type을 AND 게이트는 "1"로, OR 게이트는 "0"으로 바꾸어 데이터화일을 만들고, 퍼지수는 표 3의 형식으로 데이터화일을 작성하여야 한다.

그러면 MCS와 MPS, MPS를 이용한 시스템

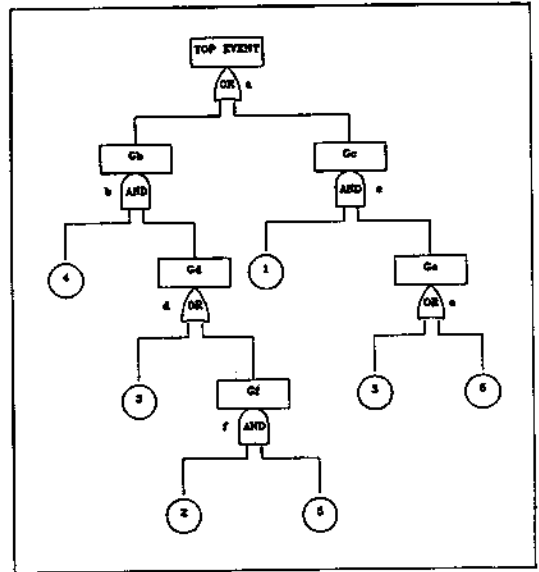


그림 3. 결함수(Fault Tree)

표 3. 기본사상에 대한 삼각꼴 퍼지수

퍼지수	a	b	c
기본사상 1	0.00	0.02	0.04
2	0.02	0.04	0.08
3	0.005	0.05	0.1
4	0.03	0.06	0.09
5	0.01	0.04	0.07

표 4. 결함수의 데이터 화일 형식

Gate Name	Gate Type	Subevent 의 수	Subevent		
			1	2	...
A	OR	2	B	C	
B	AND	2	4	D	
C	AND	2	1	E	
D	OR	2	3	F	
E	OR	2	3	5	
F	AND	2	2	5	

신뢰도 계산, 그리고 기본사상들의 퍼지 중요도를 구해 보면 다음과 같다.

우선 MCS를 구하기 전에 BICS를 먼저 구해 보면, BICS의 크기는 4×3으로 결정이 되고, 이 행렬에 기호를 기입해감으로써 BICS를 구할 수 있다. BICS의 기입 수순 과정은 표 5에 나타나

있다. 그리고 MPS의 BIPS 역시 크기가 6×4인 행렬임을 알 수 있고, 최종 BIPS행렬은 표 6과 같다. 이렇게 구해진 BICS와 BIPS는 누승등률의 법칙과 최소 상승항 우선의 법칙에 의해 각각 표 7의 MCS와 표 8의 MPS가 된다.

기본사상들에 대한 퍼지수(표 3)와 MPS(표

표 5. BICS의 탐색과정

<p>I.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>A</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	A												<p>II.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>B</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	B			C									<p>III.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>4</td><td>D</td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	4	D		C																					
A																																																			
B																																																			
C																																																			
4	D																																																		
C																																																			
<p>VI.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>4</td><td>D</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>E</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	4	D		1	E								<p>V.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>4</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>F</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>E</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	4	3		4	F		1	E					<p>VI.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>4</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>F</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td></tr> </table>	4	3		4	F		1	3		1	5		<p>VII.</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>4</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td></tr> </table>	4	3		4	2	5	1	3		1	5	
4	D																																																		
1	E																																																		
4	3																																																		
4	F																																																		
1	E																																																		
4	3																																																		
4	F																																																		
1	3																																																		
1	5																																																		
4	3																																																		
4	2	5																																																	
1	3																																																		
1	5																																																		
<p>표 6. BIPS</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>4</td><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td>5</td></tr> </table>	4	1			4	3	5		3	2	1		3	5	1		3	2	3	5	3	5	3	5	<p>표 7. MCS</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>3</td><td>4</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td></tr> </table>	3	4		2	4	5	1	3		1	5		<p>표 8. MPS</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px;"> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> </table>	1	4		3	5		1	2	3				
4	1																																																		
4	3	5																																																	
3	2	1																																																	
3	5	1																																																	
3	2	3	5																																																
3	5	3	5																																																
3	4																																																		
2	4	5																																																	
1	3																																																		
1	5																																																		
1	4																																																		
3	5																																																		
1	2	3																																																	

8)를 기초로 하여 정상사상 발생에 대한 시스템 신뢰도를 구해보면, 삼각꼴 퍼지수 연산에 의해서 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Phi(X) &= (1 - (1 - x_1x_4))(1 - x_3x_5)(1 - x_2x_3) \\
 &= x_1x_4 + x_3x_5 + x_2x_3 - x_1x_4x_3x_5 - x_1x_4x_2x_3 \\
 &\quad - x_3x_5x_2x_3 + x_1x_4x_3x_5x_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_5 &= E[\Phi(X)] \\
 &= F_1 F_4 + F_3 F_5 + F_2 F_2 F_3 \\
 &- [F_1 F_4 F_3 F_5 + F_1 F_4 F_2 F_3 + F_3 F_3 F_2 F_2] \\
 &+ F_1 F_4 F_3 F_2 \\
 F_5 &= (0.000, 0.00323, 0.01092)
 \end{aligned}$$

따라서 퍼지수로 표현된 정상사상에 대한 신뢰도는 그림 4와 같이 보여진다.

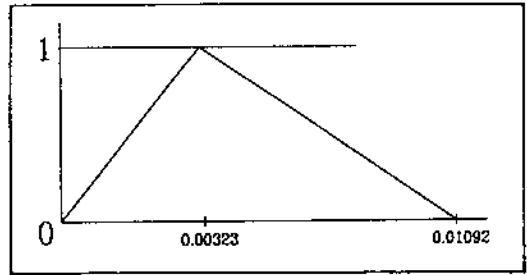


그림 4. 퍼지수로 나타난 정상사상의 신뢰도

표 9. 기본사상에 대한 임시퍼지중요도

기본사상	R _S (i부품 작동)	R _S (i부품 고장)	T _r ⁽ⁱ⁾
1	(0.028, 0.064, 0.105)	(0.00005, 0.002, 0.007)	(0.021, 0.062, 0.105)
2	(0.00, 0.004, 0.015)	(0.00003, 0.003, 0.011)	(0.00, 0.0009, 0.015)
3	(0.009, 0.042, 0.077)	(0.00, 0.001, 0.004)	(0.006, 0.041, 0.077)
4	(0.00, 0.022, 0.047)	(0.00003, 0.002, 0.007)	(0.00, 0.02, 0.047)
5	(0.004, 0.051, 0.104)	(0.00, 0.001, 0.004)	(0.0004, 0.05, 0.104)

마지막으로 기본사상들에 대한 퍼지중요도를 계산해 보면, 우선 각 기본사상들에 대해서 식 2.3을 이용하여 계산한 TFI들이 표 9에 나와있다.

그리고, 적분을 이용한 가중합 측도, 식 3.5와 식 3.6을 사용하여 각각의 기본사상에 대한 TFI, I_r⁽ⁱ⁾들을 이용하여 가중합 퍼지중요도를 표 10에 구하였다.

따라서 기본사상들의 중요도는 “4-5-2-1-3” 순이다.

표 10. 기본사상에 대한 가중합

기본 사상	가중합 퍼지수
1	0.00262
2	0.00004
3	0.00146
4	0.00053
5	0.00266

4. 결 론

본 연구는 시스템의 구조에 대해서는 결합수 정보가 있고, 부품의 신뢰도에 대해서는 퍼지수가 주어진 경우에서 시스템신뢰도의 퍼지수를 구하고 각 부품의 퍼지중요도를 구하는 기본적인 절차를 제안하고, 이것을 수행하는 프로그램인 “FFTA프로그램”을 개발하였다. 그러므로 이 결과는 고신뢰도부품으로 이루어진 시스템의 신뢰도를 예측하는 데 매우 유용하리라 판단된다. 이 개발된 프로그램의 제약은 PC에서 프로그램하드로서 부품의 수에 대한 다소의 제약이 존재하며, 앞으로 Workstation급의 개발이 필요하리라 판단된다. 앞으로 추후 연구되어야 할 분야로는 시스템 구조가 불확실성을 가질 때의 모형화와 이것의 기존 연구와의 결합이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Bortolan, G. and R. Degani, "A Review of some Methods for Ranking Fuzzy Subsets," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 37, pp 1-19, 1985
2. Cai, K.Y., C.Y. Wen, and M.L. Zhang, "Fuzzy Variables as a Basis for a Theory of Fuzzy Reliability in the Possibility Context," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 42, pp 145-172, 1991
3. Chen, S.H., "Ranking Fuzzy Numbers with Maximizing Set and Minimizing Set," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 17, pp 113-129, 1985
4. Furuta, H. and N. Shiraishi, "Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 12, pp 205-213, 1984
5. Gertsbakh, I.B., "Statistical Reliability Theory," Marcel Dekker, New York, 1990
6. Grazdik, I., "Fault Diagonosis and Prevention by Fuzzy Sets," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 34, pp 382-388, 1985
7. Misra, K.B. and G.G. Weber, "Use of Fuzzy Set Theory for Level-I Studies in Probabilistic Risk Assessment," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 37, pp 139-160, 1990
8. McCahon, C.S. and E.S. Lee, "Comparing Fuzzy Numbers : The Proportion of the Optimum Method," *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 4, pp 159-181, 1990
9. Singer, D., "A Fuzzy Set Approach to Fault Tree and Reliability Analysis," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 34, pp 145-155, 1990
10. Tanaka, H., L.T. Fan, and K. Taguchi, "Fault Tree Analysis by Fuzzy Probability," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 32, pp 453-457, 1983
11. Zadeh, L.A., "Fuzzy Set," *Information and Control*, Vol. 8, pp 338-353, 1965
12. Zadeh, L.A., "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Appoximate Reasoning - I," *Information Science*, Vol. 8, pp 199-249, 1975

저 자 소 개



윤원영(尹原永)

1959년 1월 6일생,

1982년 서울대 공대 산업공학과 졸업,

1984년 한국과학기술원 산업

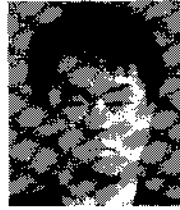
공학과 졸업(석사),

1988년 한국과학기술원 산업공학과 졸업(공학박),

현재 부산대 산업공학과 부교수.

관심분야는 통계적 품질관리, 신뢰도 공학이며,

최근 품질보증문제에 대한 연구를 수행 중.



허길환(許吉煥)

1969년 1월 22일생,

1992년 동의대 공대 산업공학과 졸업,

현재 부산대 대학원 산업공학

과 석사과정,

관심분야는 신뢰도 공학이다.