

RBD와 FTA의 논리구조와 신뢰성 중요도의 고찰에 의한 시스템 비시간가동률 개선방안

최성운*

*경원대학교 산업공학과

Improvement Strategy of System Unavailability by Review of Logical Structure and Reliability Importance of Reliability Block Diagram (RBD) and Fault Tree Analysis (FTA)

Sung-Woon Choi*

*Dept. of Industrial Engineering, Kyungwon University

Abstract

The research proposes seven elimination rules of redundant gates and blocks in Fault Tree Analysis (FTA) and Reliability Block Diagram (RBD). The computational complexity of cut sets and path sets is NP-hard. In order to reduce the complexity of Minimal Cut Set (MCS) and Minimal Path Set (MPS), the paper classifies generation algorithms. Moreover, the study develops six implementation steps which reflect structural importance (SI) and reliability importance (RI) from Reliability Centered Maintenance (RCM) that a priority of using the functional logic among components is to reduce (improve) the system unavailability (or availability).

The proposed steps include efficient generation of state structure function by Rare Event Enumeration (REA). Effective use of importance measures, such as SI and RI measures, is presented based on the number and the size of MCS and MPS which is generated from the reference[5] of this paper. In addition, numerical examples are presented for practitioners to obtain the comprehensive understanding of six steps that is proposed in this research.

Keywords : FTA, RBD, MCS, MPS, REA, RCM, Structural Importance, Reliability Importance, Priority

1. 서론

최근 일본의 지진과 쓰나미로 인한 후쿠시마 원전 발전소의 재해는 우리나라 뿐 아니라 전세계의 방사능 공포로 이어지고 있다. 원전 발전소의 위험성을 방지하고 안전성을 확보하기 위해 오래전부터 사용되어 온 방법이 PSA(Probabilistic Safety Assessment)이다. PSA에서는 FTA(Fault Tree Analysis), RBD(Reliability Block Diagram)등을 이용하여 구조 중요도(Structural Importance)

와 신뢰성 중요도(Reliability Importance)에 의한 RCM(Reliability Centered Maintenance)활동이 중요하다.

FTA는 비시간가동률, 불신뢰도, 고장률, 재해율을 최소화하기 위해 부울 대수(Boolean Algebra)의 논리 연산을 이용하는 네트워크 방법이다. FTA(Fault Tree Analysis)는 Tree의 구성요소인 AND, OR 게이트를 하향식(Top-Down)의 논리구조를 이용하여 시스템 Fault의 원인과 주요 경로를 Analysis하는 방법이다.

* 이 연구는 2011년도 경원대학교 교내연구비 지원에 대한 연구임(KWU 2011-R113)

* 교신저자: 최성운, 경기도 성남시 수정구 북정동산 65 경원대학교 산업공학과

M-P: 011-256-0697, E-mail: swchoi@kyungwon.ac.kr

2011년 7월 8일 접수; 2011년 9월 16일 수정본 접수; 2011년 9월 19일 게재확정

FTA에서는 시스템 고장의 원인이 되는 경로의 집합인 MCS(Minimal Cut Set)에 의한 중요도를 고려하여 우선순위[1]에 의한 RCM 활동을 수행한다. FTA에 대한 기존 연구로는 문헌고찰[12], MCS 생성[4,13,15], FTA 중요도 척도[2,4-7,10], 모듈고려[11,14], 중복사상 제거[3,8,9]등이 있다.

RBD(Reliability Block Diagram)는 FTA와 쌍대기능(Dual Function)의 보완적 검증을 위해 직렬(Series), 병렬(Parallel)의 Block 기능 Diagram을 이용하여 시스템의 Reliability를 향상하는 방법이다. RBD에서는 FTA와 마찬가지로 시스템의 고장을 일으키는 병렬(AND 게이트) 집합의 직렬(OR게이트)구조인 MCS에 의해 중요도를 계산한다. MCS와 쌍대개념(Dual Concept)인 MPS(Minimal Path Set)는 시스템이 작동하게(Functioning)하는 직렬(OR 게이트) 집합의 병렬(Parallel) 구조이다. 이렇듯 RBD와 FTA, MPS와 MCS는 각각 시스템의 작동과 비작동의 쌍대 기능에 의한 역발상에 의한 보완적인 검증방법으로 활용될 수 있다. 그러나 RBD가 사람이 쉽게 블록 다이어그램으로 MPS와 MCS를 구할 수 있는 반면에 FTA는 이진 Tree의 부울 대수를 이용하여 컴퓨터가 MCS와 MPS를 생성한다.

따라서 본 연구에서는 RBD와 FTA의 보완적 기능관계를 고려하여 중복 블록 또는 게이트와 기본사상을 제거하는 7가지 규칙을 제시하고 MCS와 MPS를 생성하는 알고리즘을 유효화한다. 또한 MCS와 MPS에 의한 시스템 상태 구조함수의 생성방법으로 완전열거법(Complete Enumeration Method)과 효율적인 REA(Rare Event Approximation)[10]를 제안한다. 특히 본 연구에서는 MCS와 MPS의 크기(Size)와 개수(Number)에 기초한 최[5]의 구조 중요도와 BI(Birnbaum's Importance), CI(Critically Importance)에 의한 RCM 활동에, 시스템 시간가동률 또는 비시간가동률에 영향을 주는 직렬(OR 게이트), 병렬(AND게이트) 구조를 고려하여 우선순위를 조정하는 6단계 절차를 제안한다. 제안된 6단계의 완전한 이해를 위해 병렬에 기초한 혼합구조와 직렬에 기초한 혼합구조의 적용예를 단계별로 제시한다.

2. RBD와 FTA의 논리구조관계

2.1 RBD와 FTA의 보완적관계

RBD(Reliability Block Diagram)는 시스템(System)의 Reliability 또는 시간가동률(Availability) $a(p)$ 향상을 위해 컴포넌트(Component) i 의 Reliability p_i 를 Block으로 구성한 Diagram으로 분석하는 긍정적(Positive) 사

고방식의 하향식(Top-Down) 방법이다. RBD는 물리적 구조를 직렬(Series), 병렬(Parallel)의 논리구조관계(Logical Structure Relationship)로 나타낸다.

FTA(Fault Tree Analysis)는 시스템의 Fault 또는 비시간가동률(Unavailability) $u(q) (= 1 - a(p))$ 감소를 위해 컴포넌트(Component) i 의 Fault $q_i (= 1 - p_i)$ 게이트(Gate)와 기본사상(Basic Event:BE)으로 구성된 Tree로 분석하는 부정적인(Negative) 사고방식의 하향식(Top-Down) 방법이다. FTA는 물리적 구조를 OR게이트, AND게이트의 논리구조관계로 나타낸다. RBD에서 생존의 직렬, 병렬기능은 FTA에서 고장의 OR게이트 AND게이트의 논리구조 관계로 나타낸다.

RBD에서 생존의 직렬, 병렬기능은 FTA에서 고장의 OR게이트, AND게이트의 기능과 같다. 즉 RBD에서 직렬기능이 '두 컴포넌트가 모두 생존해야 시스템이 생존한다'는 의미이며 이는 FTA에서 OR게이트가 '두 컴포넌트 중 하나만 고장나도 시스템이 고장난다'는 의미와 같다. 또한 RBD에서 병렬기능이 '두 컴포넌트 중 하나만 생존해도 시스템이 생존한다'는 의미이며 이는 FTA에서 '두 컴포넌트가 모두 고장나야 시스템이 고장난다'는 의미와 같다.

결국 RBD는 생존이라는 긍정적 관점에서, FTA는 고장이라는 부정적 관점에서 동일한 시스템을 구성된 컴포넌트를 분석하는 보완적(Dual) 관계의 방법이다.

RBD에서 시스템을 분해하며(Decomposition) 효율적으로 컴포넌트의 기능을 분석하는 방법으로 MPS(Minimal Path Set)와 MCS(Minimal Cut Set)가 있는데, 두 방법도 보완적(Dual)관계를 가지고 있다. 즉 MPS는 긍정적 관점에서 시스템의 시간가동률 $a(p)$ 가 발휘되는 컴포넌트 신뢰도 p_i 의 Path가 중복되지 않는 Minimal Set이다. 반면에 MCS는 부정적 관점에서 시스템의 비시간가동률 $u(q)$ 가 발휘되는 컴포넌트 불신뢰도 q_i 의 Cut이 중복되지 않는 Minimal Set이다. 따라서 MPS는 직렬 Set의 Path가 병렬구조의 형태를 지녀야 시스템의 시간가동률이 발휘되고 MCS는 병렬 Set의 Cut이 직렬구조의 형태를 지녀야 시스템의 비시간가동률이 발휘된다. 그러나 i 컴포넌트 상태 x_i 에 의한 시스템 상태 구조함수(State Structure Function) $\phi(x)$ 는 관점만 다를 뿐 MPS, MCS 모두 동일한 결과를 갖는다. 상태 x 인 $\phi(x)$ 는 기능을 발휘할 경우 1, 발휘하지 않을 경우 0이 되는 이진변수(Binary Variable)이다. $\phi(x)$ 는 직렬인 경우 II로 병렬인 경우 II로 표시한다.

FTA도 RBD와 마찬가지로 MPS, MCS의 분해방법으로 시스템을 분석할 수 있다. RBD에서 부정적 관점

의 MCS 방법은 부정적 관점의 FTA와 동일하게 컴포넌트 불신뢰도를 q_i , 시스템의 비시간가동률을 $u(q)$ 로 이증으로 사용해야 하는 번거움이 있다. 따라서 RBD와 FTA에서는 개념과 기초표현의 일관성을 위해 부정적 관점의 MCS를 사용한다.

2.2 RBD와 FTA에서 중복블럭(게이트, 사상) 제거 규칙

RBD와 FTA에서는 대규모의 복잡한 컴포넌트로 구성된 시스템을 효율적으로 분해하기 위해 MCS를 구해야 하는 데 우선 중복(Repeated)된 블록과 게이트 및 기본사상(BE: Basic Event)을 먼저 제거해 주는 것이 좋다.

RBD와 FTA에서 중복블럭(게이트, 사상)을 제거하기 위한 9가지 규칙은 다음과 같다.

규칙 1 : 중복 직렬블럭(OR게이트)은 제거한다.
(<그림 1>참고)

규칙 2 : 중복 병렬분기(AND게이트)는 제거한다.
(<그림 2>참고)

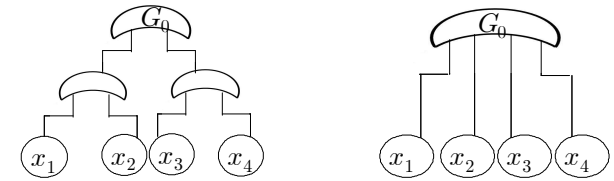
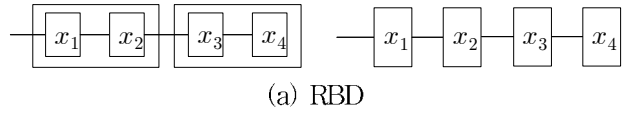
규칙 3 : 병렬분기된(AND게이트) x_i 블록과 병렬분기된(AND Gate) 직렬블럭집합(OR 게이트)중 x_i 블록과 중복될 경우 직교블럭집합(OR게이트)을 제거한다.(<그림 3>참고)

규칙 4 : x_i 블록과 직렬연결된(OR게이트) 병렬분기의(AND게이트) 블록이 x_i 블록과 중복될 경우 병렬분기(AND게이트)를 제거한다.
(<그림 4>참고)

규칙 5 : 병렬분기된(AND게이트) x_i 블록과 병렬분기에서(AND게이트) 다시 병렬 분기된(AND게이트) 블록 중 중복된 x_i 를 제거한다.
(<그림 5>참고)

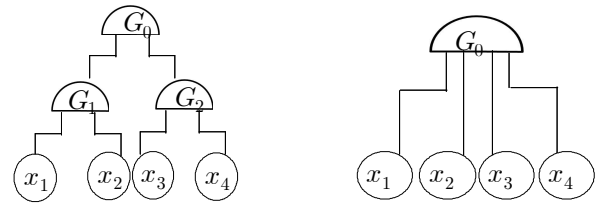
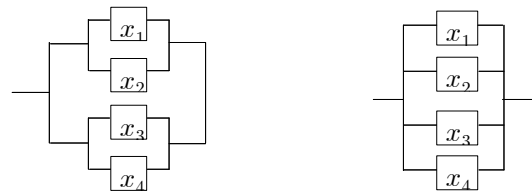
규칙 6 : x_i 블록과 직렬연결된(AND게이트) 2개의 직렬블럭집합(OR게이트)중 중복되는 x_i 블록을 제거한다.(<그림 6>참고)

규칙 7 : 연속 2번 병렬분기된(AND게이트) 2개의 직렬블럭집합(OR게이트)에서 중복블럭 x_i 를 제거한다.(<그림 7>참고)



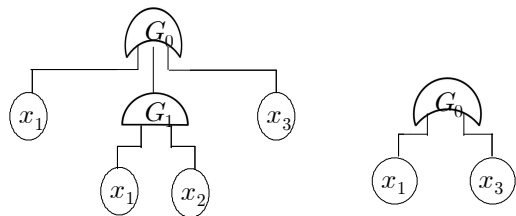
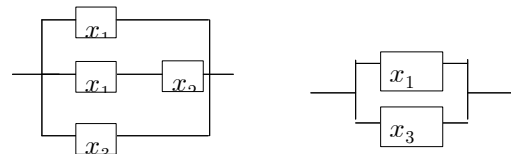
(a) RBD $(x_1 \parallel x_2) \parallel (x_3 \parallel x_4)$ (b) FTA $x_1 \parallel x_2 \parallel x_3 \parallel x_4$

(c) State Structure Function
<그림 1> 규칙 1에 의한 중복제거



(a) RBD $(x_1 \parallel x_2) \parallel (x_1 \parallel x_2)$ (b) FTA $x_1 \parallel x_2 \parallel x_3 \parallel x_4$

(c) State Structure Function
<그림 2> 규칙 2에 의한 중복제거

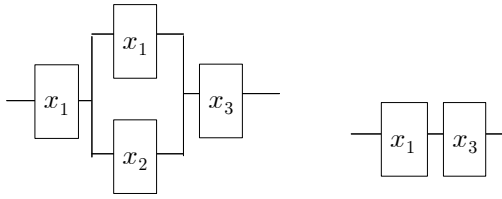


(a) RBD $x_1 G_1 x_3$ (b) FTA $x_1 \parallel x_3$

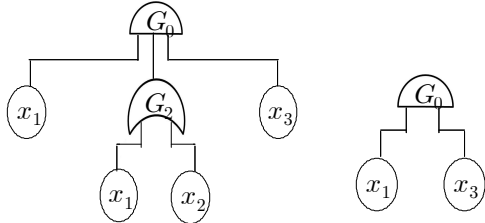
(c) State Structure Function $x_1 G_1 x_3 = x_1(x_1 + x_2)x_3$

(d) Boolean Algebra $x_1 x_3$

(d) Boolean Algebra
<그림 3> 규칙 3에 의한 중복제거



(a) RBD



(b) FTA

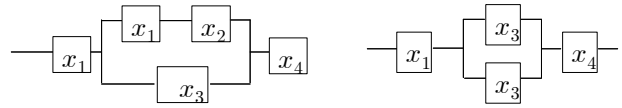
$x_1 \text{ II } (x_1 \text{ II } x_2) \text{ II } x_3$ $x_1 \text{ II } x_3$

(c) State Structure Function

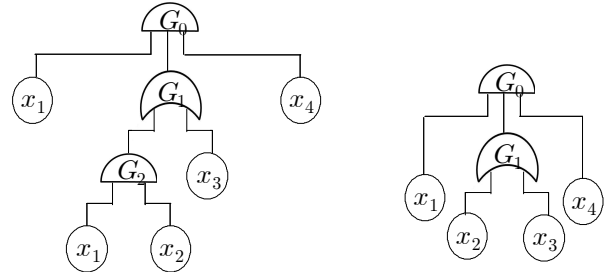
$x_1 + G_1 + x_3$ $x_1 + x_3$
 $x_1 + x_1x_2 + x_3$

(d) Boolean Algebra

<그림 4> 규칙 4에 의한 중복 제거



(a) RBD



(b) FTA

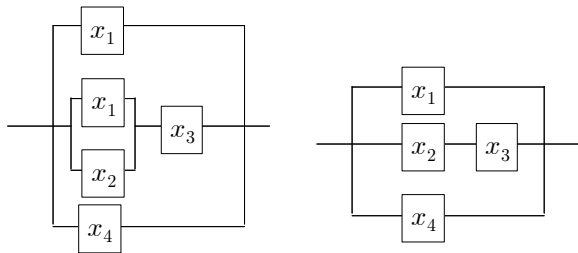
$x_1 \text{ II } ((x_1 \text{ II } x_2) \text{ II } x_3) \text{ II } x_4$ $x_1 \text{ II } (x_2 \text{ II } x_3) \text{ II } x_4$

(c) State Structure Function

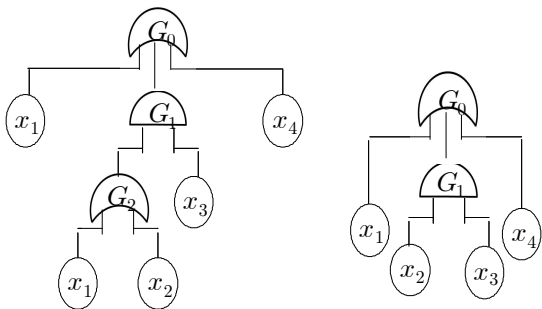
$x_1 + G_1 + x_4$ $x_1 + x_2x_3 + x_4$
 $= x_1 + G_2x_3 + x_4$
 $= x_1 + (x_1 + x_2)x_3 + x_4$
 $= x_1 + x_1x_3 + x_2x_3 + x_4$

(d) Boolean Algebra

<그림 6> 규칙 6에 의한 중복제거



(a) RBD



(b) FTA

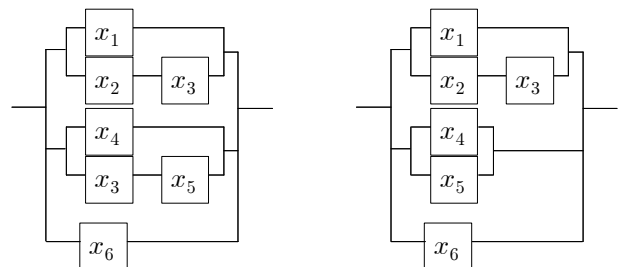
$x_1 \text{ II } ((x_1 \text{ II } x_2) \text{ II } x_3) \text{ II } x_4$ $x_1 \text{ II } (x_2 \text{ II } x_3) \text{ II } x_4$

(c) State Structure Function

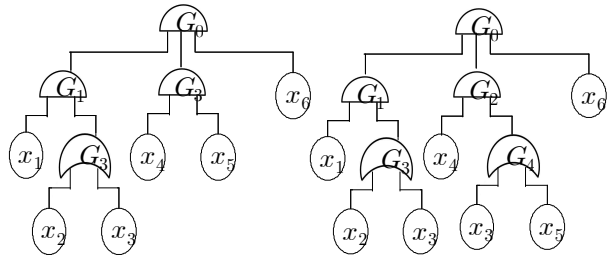
$x_1 G_1 x_4$ $x_1 (x_2 + x_3) x_4$
 $= x_1 (G_2 + x_3) x_4$
 $= x_1 (x_1 x_2 + x_3) x_4$

(d) Boolean Algebra

<그림 5> 규칙 5에 의한 중복제거



(a) RBD



(b) FTA

$x_1 \text{ II } (x_2 \text{ II } x_3) \text{ II } (x_4 (x_3 \text{ II } x_5)) \text{ II } x_6$ $x_1 \text{ II } (x_2 \text{ II } x_3) \text{ II } (x_4 \text{ II } x_5) \text{ II } x_6$

(c) State Structure Function

$G_1 G_2 x_6$ $x_1 (x_2 + x_3) (x_4 x_5) x_6$
 $= (x_1 G_3) (x_4 G_4) x_6$
 $= x_1 (x_2 + x_3) x_4 (x_3 + x_5) x_6$
 $= x_1 (x_2 + x_3) (x_3 x_4 + x_4 x_5) x_6$

(d) Boolean Algebra

<그림 7> 규칙 7에 의한 중복제거

3. RBD와 FTA의 MCS

3.1 MCS 생성 알고리즘

MCS는 시스템의 비시간가동률을 일으키는 고장이 발생하는 경우의 RBD 병렬블럭집합으로, FTA에서는 AND 게이트 집합에 해당한다. RBD가 사람이 이해하기 쉽게 직렬, 병렬된 블록으로 작성된 반면에 FTA는 컴퓨터가 Boolean Logic 연산이 손쉽도록 이진인 AND, OR게이트로 자동생성할 수 있는 특징이 있다. 따라서 MCS 생성알고리즘은 대규모 시스템 분석시 계산의 효율성 관점에서 FTA에 기초한 방법이 연구되고 있다.[4.9]

이를 유형화하면 Fussel and Vesely 알고리즘, Fussel 알고리즘과 같이 나열된 중복 기본사상(Replicated and Repeated Basic Event : RBE)을 제거하는 방법과 Bengiamin 알고리즘, Fatram 알고리즘과 같이 MCS 개수의 부담을 줄이기 위한 OR 게이트의 RBE 처리 방법으로 구별할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2.2절에서 제안한 7가지 중복 게이트(기본사상) 제거 후 MCS 생성등의 방법을 포함한 3가지 유형의 MCS 알고리즘을 FTA에 기초하여 기술한다.

3.1.1 Fussel and Vesely 알고리즘

단계 1 : 정상사상(Top Event : TE)에서 각 게이트로 내려 오면서 각 게이트에 속해 있는 기본사상(Basic Event : BE)을 1개씩 선택해서 절단집합을 생성한다.

단계 2 : 절단된 절단집합중 RBE와 중복절단집합(Replicated and Repeated Cut Set : RCS)을 제거한후 MCS를 선정한다. FTA에서는 대규모의 복잡한 컴포넌트로 구성된 시스템을 효율적으로 분해하기 위해 MCS를 구해야 하는 데 우선 중복(Repeated)된 블록과 게이트 및 기본사상(BE)을 먼저 제거해 주는 것이 좋다.

3.1.2 Fussel 알고리즘

3.1.1절의 알고리즘이 단계 1에서 각 게이트에서 BE를 1개씩 선택해서 절단집합을 생성하는 반면에 이 알고리즘은 모든 BE를 나열한다. 나열된 AND게이트(병렬블럭집합)는 MCS의 크기(Size)이기 때문에 가로로 쓰고, OR게이트(직렬블럭집합)는 MCS의 개수(Number)이기 때문에 세로로 써서 절단집합을 생성 후 3.1.1절의 단계 2를 적용한다.

3.1.3 Bengiamin 알고리즘

단계 1 : OR게이트(직렬블럭집합)의 RBE를 제거한 후 3.1.1절의 단계 1을 적용한다.

단계 2 : 생성된 절단 집합에서, RBE가 속해 있는 OR게이트(직교블럭집합)의 나머지 BE를 RBE로 대체하여 절단집합을 생성한다.

단계 3 : 단계 1에서 생성된 절단집합에서, 단계 2와 같이 대체하되 모든 OR게이트에 동시에 적용하여 절단집합을 생성한다.

단계 4 : 단계 2와 3에서 생성된 절단집합에서 RBE와 RCS를 제거한 후 MCS를 선정한다.

3.1.4 Fatram 알고리즘

단계 1 : MCS 크기(Size)에 영향이 있는 AND게이트(병렬블럭집합)는 BE로 MCS 개수(Number)에 영향이 있는 OR게이트(직렬블럭집합)는 Gate로 대체한 후 RBE와 중복게이트(Replicated and Repeated Gate : RG)를 제거한 후 절단집합을 생성한다.

단계 2 : 생성된 절단집합에서 RRE가 있는 게이트를 RBE로 대체하면서 RBE와 RG를 제거한 후 절단집합을 생성한다.

단계 3 : 단계1과 2의 생성된 절단집합에서 3.1.3절의 단계 2,3,4를 적용하며 MCS를 선정한다. 단 BE가 적은 OR 게이트에서 이 게이트가 미리 제거될 수 있다

3.1.5 MCS 제안 알고리즘

단계 1 : 2.2절에서 제안한 RBE와 RG의 제거 규칙 7가지를 적용하여 새로운 FTA(RBD)를 생성한다.

단계 2 : 3.1.2절의 Fussel 알고리즘을 적용한다.

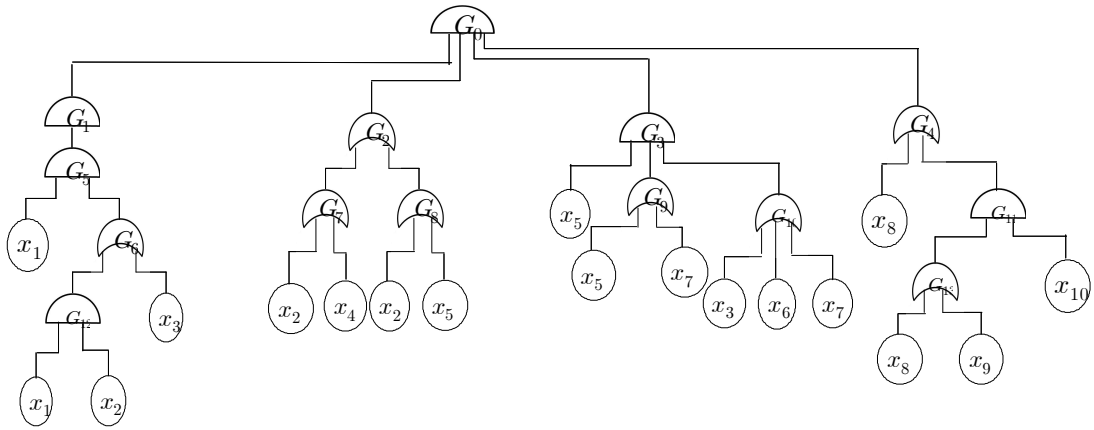
3.1.6 MPS 알고리즘

MPS는 MCS와 역의 관계(Inverse Relation)로 AND 게이트는 OR게이트로, OR게이트는 AND게이트로 바꾸어 MCS 알고리즘을 적용하면 된다.

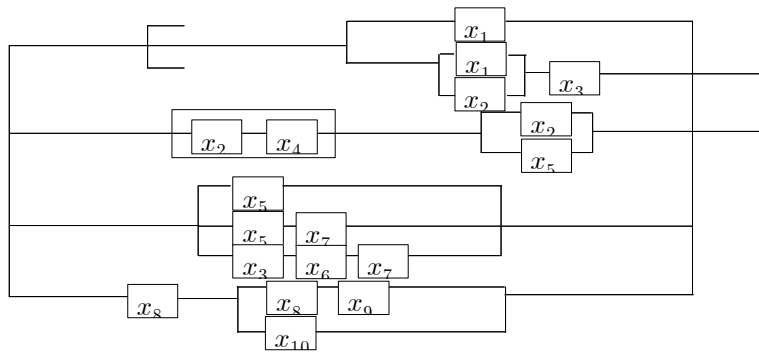
3.2 중복제거와 생성알고리즘 예

<그림 8>에서 G_5, G_7 게이트의 제거는 규칙1, 2에 따르며, G_8, G_9 게이트의 제거는 규칙 3, 4에 따른다. 규칙 6,7에 의해 G_{12}, G_{13} 는 기본사상 x_1, x_8 의 제거로 같이 없어서 <그림 9>와 같은 FTA로 변환된다.

3.1.5절에서 제안한 알고리즘에 의한 MCS의 집합은 $\{ x_1x_2x_4x_5x_6x_8, x_1x_2x_4x_5x_6x_9x_{10}, x_1x_2x_4x_5x_7x_8, x_1x_2x_4x_5x_7x_9x_{10}, x_1x_3x_4x_5x_6x_8, x_1x_3x_4x_5x_6x_9x_{10}, x_1x_3x_4x_5x_7x_8, x_1x_3x_4x_5x_7x_9x_{10} \}$ 이다.

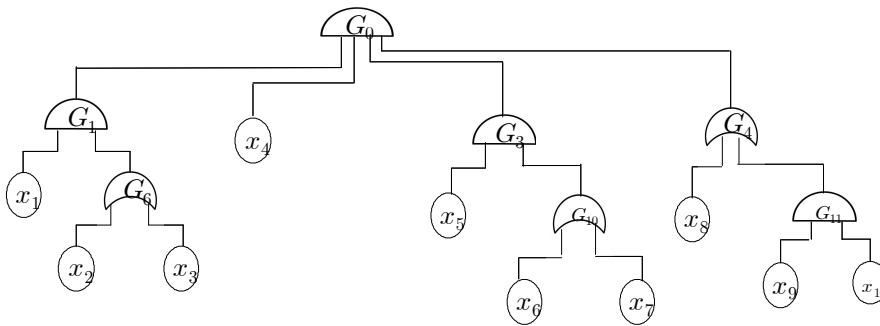


(a) FTA

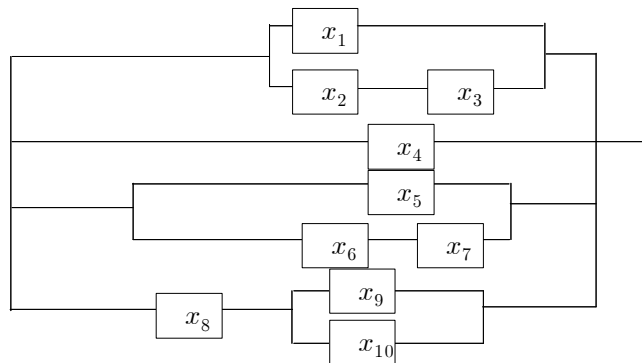


(b) RBD

<그림 8> 제거 규칙 전 FTA와 RBD



(a) FTA



(b) RBD

<그림 9> 제거 규칙 후 FTA와 RBD

4. 신뢰성 및 구조 중요도와 논리관계를 고려한 비가동률 개선

4.1 신뢰성 및 구조 중요도 척도

시스템 비가동률에 대한 컴포넌트 i 의 신뢰성 중요도와 (Reliability Importance : RI)와 구조 중요도(Structural Importance : SI)의 MCS(Minimum Cut Set)와 MPS(Minimum Path Set)에 의한 척도(Measure)와 관계는 <표 1>과 같다

<표 1> 신뢰성 중요도 척도와 구조 중요도 척도

(a) MCS에 의한 시스템 비가동률 중요도

종류	MCS에 의한 척도
Birbaum Importance	$BI(i) = u(q_i = 1) - u(q_i = 0) = \partial u(q) / \partial q_i$
Risk Reduction	$RR(i) = u(q) - u(q_i = 0)$
Risk Reduction Worth	$RRW(i) = u(q) / u(q_i = 0)$
Risk Achievement	$RA(i) = u(q_i = 1) - u(q)$
Risk Achievement Worth	$RAW(i) = u(q_i = 1) / u(q)$
Fussel-Vesely Importance	$FV(i) = (u(q) - u(q_i = 0)) / u(q)$
Critically Importance	$CI(i) = BI(i) \times q_i / u(q)$

(b) MPS에 의한 시스템 가동률 중요도

종류	MCS에 의한 척도
Birbaum Importance	$BI(i) = a(p_i = 1) - a(p_i = 0) = \partial a(p) / \partial p_i$
Risk Reduction	$RR(i) = a(p) - a(p_i = 0)$
Risk Reduction Worth	$RRW(i) = a(p) / a(p_i = 0)$
Risk Achievement	$RA(i) = a(p_i = 1) - a(p)$
Risk Achievement Worth	$RAW(i) = a(p_i = 1) / a(p)$
Fussel-Vesely Importance	$FV(i) = (a(p) - a(p_i = 0)) / a(p)$
Critically Importance	$CI(i) = BI(i) \times p_i / a(p)$

(c) 신뢰성 중요도 척도간의 관계

척도	관계
$BI(i)$	$BI(i) = RA(i) + RR(i)$
$RRW(i)$	$RRW(i) = 1 / (1 - FV(i))$
$RAW(i)$	$RAW(i) = RA(i) / u(q) + 1$
$FV(i)$	$FV(i) = RR(i) / u(q)$
$CI(i)$	$CI(i) = FV(i)$

(d) 구조 중요도 척도

방법	척도	기호
MCS	$Iu(q_i) = \sum \frac{1}{n(i)} \times k$	$n(i)$: W(Within)MCS의 Size k : B(Between)MCS의 Number $n_i(i)$: WMPS의 Size k : BMPS의 Number
MPS	$Ia(q_i) = \sum \frac{1}{n_i(i)} \times k$	
RI	RI 척도의	
척도 이용	$q_i = p_i = \frac{1}{2}$ 로 대입	

4.2 적용 단계

시스템의 비시간가동률 감소 또는 시간가동률의 증대를 위해 구조 중요도(SI), 신뢰성 중요도(RI) 및 OR게이트(직렬) 기능구조의 우선순위를 고려한 RCM(Reliability Centered Maintenance)의 적용단계는 다음과 같다.

단계 1 : RBD와 FTA에서 중복블럭(게이트, 사상)을 2.2절에서 제시한 7가지 규칙을 이용하여 제거한다.

단계 2 : RBD와 FTA에서 3.1절에서 제시한 알고리즘으로 MCS를 생성한다.

단계 3 : MCS에 의한 상태구조함수(State Structure Function) $\phi(x)$ 를 2.1절과 같이 생성한다. 모든 MCS의 완전열거법(Complete Enumeration Method)의 계산량이 많은 경우 MCS의 합으로 $\phi(x)$ 를 구하는 REA(Rare Event Approximation)방법을[10] 사용한다.

단계 4 : 시스템 비가동률 $u(q)$ 에 대한 컴포넌트 불신뢰도 q_i 의 신뢰성 중요도(RI)는 MCS에 의한 $\phi(x)$ 의 구조함수에 x_i 대신 q_i 를, $\phi(x)$ 대신 $u(q)$ 를 치환하여 4.1절의 <표 1.b>와 같이 구한다. 최[5]가 개발한 구조 중요도(SI) 척도는 MCS, MPS의 크기와 개수에 의한 방법으로 $\phi(x)$ 를 <표 1. d>와 같이 그대로 사용한다. <표 1.a>, <표 1.b>의 신뢰성 중요도(RI)를 이용하여 구조 신뢰도(SI)를 구하려고 할 경우 모든 q_i 와 p_i 에 $\frac{1}{2}$ 을 대입하여 구한다.

즉 신뢰성 중요도(RI)는 컴포넌트 q_i, p_i 를 알고 있는 경우 시스템의 중요도를 구하는 것이고, 구조 중요도(SI)는 컴포넌트 q_i, p_i 를 모르는 경우 시스템의 중요도를 구하는 방법이다.

단계 5 : 단계 4에서 구한 신뢰성 중요도(RI), 구조 중요도(SI)에 의한 RCM을 실시할 경우 RBD와 FTA의 직렬(OR게이트), 병렬(AND게이트)의 기능 논리구조 관계를 고려하여 보전활동을 실시한다. MCS는 시스템 비시간가동률을 발생하는 병렬(AND 게이트)집합이고, MPS는 시스템 시간가동률을 발생하는 직렬(OR게이트)집합이다. 따라서 고장발생시 시스템의 비시간 가동률을 감소하고 시간가동률을 증대시키려면 직렬(OR게이트)기능의 RCM 보전활동에 우선순위를 주어야 한다.

단계 6 : 시스템의 비시간가동률 $u(q)$ 또는 시간가동률 $a(q)$ 를 계산한다.

4.3 적용 예

4.3.1 AND게이트(병렬)를 기본 구조로 한 모형

3.2절에서 사용한 예를 4.2절의 단계1부터 단계3까지 적용하면 REA에 의한 $\phi(x) = x_1x_2x_4x_5x_6x_8 + x_1x_2x_4x_5x_6x_9x_{10} + x_1x_2x_4x_5x_7x_8 + x_1x_2x_4x_5x_7x_9x_{10} + x_1x_3$

$x_4x_5x_6x_9x_{10} + x_1x_3x_4x_5x_6x_9x_{10} + x_1x_3x_4x_5x_7x_8$
 $+ x_1x_3x_4x_5x_7x_9x_{10}$ 이다.

각 컴포넌트의 불신뢰도 $q_1 = q_4 = q_5 = q_7 = 0.3$,
 $q_9 = q_{10} = 0.2$, $q_2 = 0.8$, $q_3 = 0.7$, $q_6 = 0.5$, $q_8 = 0.4$
 이고, 고장이 발생하여 RCM 활동이 요구되는 컴포넌
 트는 $\{x_1, x_2, x_3, x_6, x_7, x_8\}$ 이라고 가정한다.

RCM 대상의 컴포넌트 i 에 대한 구조 신뢰도(SI)와 신뢰
 성 중요도(RI)를 단계4와 같이 산출한다. 우선 최5가 개발
 한 $Iu(q_i)$ 와 구조 중요도 $BI(i)$ 를 비교하면 <표 2>와 같
 이 $\{x_1, x_8, x_6, x_7, x_2, x_3\}$ 의 중요도 순서로 성능이 일치한다.

<표 2> $Iu(q_i)$ 와 구조 $BI(i)$ 의 성능비교

컴포 넌트	$Iu(q_i)$	구조 $BI(i)$
x_1	$(\frac{1}{6} \times 4 + \frac{1}{7} \times 4) \times 8 = 9.9$	$4 \times (\frac{1}{2})^5 + 4 \times (\frac{1}{2})^6 = 6$
x_8	$(\frac{1}{6} \times 4) \times 4 = 5.4$	$4 \times (\frac{1}{2})^5 = 4$
x_6	$(\frac{1}{6} \times 2 + \frac{1}{7} \times 2) \times 8 = 5.0$	$2 \times (\frac{1}{2})^5 + 2 \times (\frac{1}{2})^6 = 3$
x_7	$(\frac{1}{6} \times 2 + \frac{1}{7} \times 2) \times 8 = 5.0$	$2 \times (\frac{1}{2})^5 + 2 \times (\frac{1}{2})^6 = 3$
x_2	$(\frac{1}{6} \times 2 + \frac{1}{7} \times 2) \times 8 = 5.0$	$2 \times (\frac{1}{2})^5 + 2 \times (\frac{1}{2})^6 = 3$
x_3	$(\frac{1}{6} \times 2 + \frac{1}{7} \times 2) \times 8 = 5.0$	$2 \times (\frac{1}{2})^5 + 2 \times (\frac{1}{2})^6 = 3$

신뢰성 중요도 $BI(i)$ 를 구하면 $BI(1) = 1782$,
 $\times 10^{-5}$ $BI(8) = 3240 \times 10^{-5}$ $BI(6) = 1782 \times 10^{-5}$,
 $BI(7) = 1782 \times 10^{-5}$, $BI(2) = 950 \times 10^{-5}$, $BI(3) =$
 950×10^{-5} 로 중요도 순서는 $\{x_1, x_8, x_6, x_7, x_2, x_3\}$ 이다.
 $CI(i)$ 를 구하면 $CI(1) = 1426 \times 10^{-5}/q(u)$,
 $CI(8) = 1296 \times 10^{-5}/q(u)$, $CI(6) = 891 \times 10^{-5}/q(u)$
 $CI(2) = 760 \times 10^{-5}/q(u)$, $CI(3) = 665 \times 10^{-5}/q(u)$,
 로 중요도 순서는 $\{x_1, x_8, x_6, x_2, x_3, x_7\}$ 이다. $CI(i)$
 에서 $q(u)$ 는 공통으로 들어가는 성분으로 계산의 간편
 성을 위해 생략한다.

직렬(OR게이트)의 기능구조를 가지는 $\{x_2, x_3\}$ 과
 $\{x_6, x_7\}$ 의 우선순위를 고려한 RCM 활동은 단계4를
 적용한다. 단계3에서 구한 구조 중요도 $Iu(q_i)$ 와 $BI(i)$
 와 신뢰성 중요도 $BI(i)$ 중요도에 의한 순서
 $\{x_1, x_8, x_6, x_7, x_2, x_3\}$ 은 수정없이 그대로 적용이 가능
 하다. 그러나 신뢰성 중요도 $CI(i)$ 인 경우 $\{x_1, x_8, x_6,$
 $x_2, x_3, x_7\}$ 로 x_6 과 x_7 의 직렬(OR게이트)기능의 회복이
 시스템 비시간가동률을 감소하고 시간가동률을 증대시
 키므로 우선순위를 $\{x_1, x_8, x_6, x_7, x_2, x_3\}$ 로 조정한다.

본 적용에는 AND게이트(병렬)구조를 기본으로 한

모형으로 단계6의 시스템의 비가동률 감소결과가 크게
 나오지 않으므로 다음 절에서 OR게이트(AND)구조를
 기본으로 한 모형을 적용해 본다.

4.3.2 OR 게이트(직렬)를 기본 구조로 한 모형

<그림 10>과 같은 모형에 4.2절의 단계1에서 단계3
 을 적용하면 MCS에 의한 $\phi(x) = (x_1 \amalg x_2) \amalg (x_1 \amalg x_3)$
 $\amalg (x_4 \amalg x_5) = x_1x_4 + x_2x_3x_4 - x_1x_2x_3x_4 + x_1x_5 +$
 $x_2x_3x_5 - x_1x_2x_3x_5 - x_1x_4x_5 - x_2x_3x_4x_5$
 $+ x_1x_2x_3x_4x_5$ 이다. 단계4의 구조 중요도

$$Iu(q_2) = Iu(q_3) = Iu(q_4) = Iu(q_5) = \frac{1}{2} \times 3 = 1.5 \text{ 이고,}$$

$$BI(1) = \frac{9}{16}, \quad BI(2) = BI(3) = BI(4) = BI(5) = \frac{3}{16}$$

으로 중요도 순서는 $\{x_1, x_5, x_3, x_2, x_4\}$ 이다. 컴포넌트 i
 의 불신뢰도 $q_1 = 0.1, q_2 = 0.2, q_3 = 0.3, q_4 = 0.4, q_5 = 0.5$
 이다. 신뢰성 중요도 $BI(1) = q_4 + q_5 - q_4q_5 -$
 $q_2q_3q_4 - q_2q_3q_5 + q_2q_3q_4q_5 = 0.6472$, $CI(1) = q_2 \times$
 $BI(1)/q(u) = 0.161/q(u)$, $BI(2) = q_3q_4 + q_3q_5 -$
 $q_3q_4q_5 - q_1q_3q_4 - q_1q_3q_5 + q_1q_3q_4q_5 = 0.177$, $CI(2) = q_2$
 $\times BI(1)/q(u) = 0.0354/q(u)$, $BI(3) = q_2q_4 + q_2q_5 -$
 $q_2q_4q_5 - q_1q_2q_4 - q_1q_2q_5 + q_1q_2q_4q_5 = 0.236$, $CI(3) =$
 $q_3 \times BI(3)/q(u) = 0.0708/q(u)$, $BI(4) = q_1 + q_2q_3$
 $- q_1q_2q_3 - q_1q_5 - q_2q_3q_5 + q_1q_2q_3q_5 = 0.077$, $CI(4) =,$
 $q_4 \times BI(4)/q(u) = 0.0308/q(u)$, $BI(5) = q_1 + q_2q_3$
 $- q_1q_2q_3 - q_1q_4 - q_2q_3q_4 + q_1q_2q_3q_4 = 0.092/q(u)$,
 $CI(5) = q_5 \times BI(5)/q(u) = 0.0462$ 이다. $BI(i)$ 에 의
 한 중요도 순서는 $\{x_1, x_3, x_2, x_5, x_4\}$ 이고 $CI(i)$ 에 의
 한 중요도 순서는 $\{x_1, x_3, x_5, x_2, x_4\}$ 이다.

만약 고장이 발생하여 RCM대상이 되는 컴포넌트를
 $\{x_1, x_3, x_5\}$ 로 가정할 경우 단계 5와 같이 OR게이트(직
 렬)기능 $\{x_1, x_5\}$ 의 우선순위를 고려해 주어야 한다. 구
 조 중요도 $Iu(q_i)$ 와 구조 중요도 $BI(i)$ 에 의한 중요도
 순서 $\{x_1, x_5, x_3\}$ 은 조정 없이 그대로 사용이 가능하고
 신뢰도 중요도 순서 $\{x_1, x_3, x_5\}$ 는 $\{x_1, x_5, x_3\}$ 으로의
 RCM활동의 우선순위 조정이 요구된다.

단계 6에서 구조 중요도 2가지 척도에 의한 RCM 활
 동 순서와 신뢰성 중요도 2가지 척도와 OR게이트(직
 렬) 기능의 우선순위를 고려한 시스템의 비시간가동률
 은 동일하며, 조정되지 않은 순위에 의한 값을 비교하
 면 <표 3>과 같다. <표 3>에서 조정하지 않는 경우
 x_5 의 OR게이트(직렬)가 작동되지 않아 비시간가동률
 이 1.0의 최대로 된다.

<표 3> RCM 순서별 시스템 비시간가동률

OR 게이트(직렬) 우선순위 고려			OR 게이트(직렬) 우선순위 비교려		
순서	컴포넌트	시스템 비시간가동률	순서	컴포넌트	시스템 비시간가동률
1	x_1	0.100	1	x_1	0.100
2	x_5	0.500	2	x_3	1.000
3	x_3	0.235	3	x_5	0.235

5. 결론

본 연구에서는 RBD와 FTA, MCS와 MPS의 보완적 쌍대 기능(Dual Function)을 이용한 시스템의 비시간가동률(시간가동률)의 감소(향상)를 위한 RCM 적용방안을 제시하였다. 또한 MCS와 MPS 계산의 복잡성을 줄이기 위해 중복의 (Redundant), 게이트, 기본사상을 제거하는 규칙과 생성 알고리즘을 유형화하여 제안하였다.

특히 최[5]의 MCS와 MPS에 의한 구조 중요도 척도와 BI(Birnbaum's Importance), CI(Critically Importance)에 의한 컴포넌트의 시스템에 대한 중요도 척도와 직렬(OR게이트), 병렬(AND게이트)의 컴포넌트간 기능관계를 통합적으로 고려한 우선순위의 RCM절차 6단계를 개발하였다. 개발된 절차의 실무적 이해를 돕기 위한 수치예에서는 직렬(OR게이트)을 기초로 한 혼합구조가 병렬(AND게이트)구조보다 컴포넌트간의 기능관계가 시스템의 성능에 영향을 크게 주는 것으로 나타났다.

향후 연구로는 원자력발전소 및 자동차 장치플랜트에 본 연구에서 제안한 절차를 응용한 적용사례를 개발한다.

6. 참고 문헌

[1] 구훈영, “결합중요도를 이용한 사후보수 우선순위 결정”, 대한산업공학회지, 33(1) (2007): 61-69.
 [2] 양영순, “Fault Tree 방법을 이용한 시스템의 안전사고 해석”, 한국항공우주학회지, 17(2)(1989): 46-53.
 [3] 이해상외, “고장나무의 비관련 사상들에 대한 축소 방법”, 대한산업공학회지, 22(1)(1996): 129-139.
 [4] 임용택, “Fault Tree 분석기법과 감도분석에 관한 연구”, 전남대학교 석사학위 논문, 1987.
 [5] 최성운, 최소절단집합과 최소경로집합을 이용한 구조 및 신뢰성 중요도 척도의 개발 및 적용, In Press.
 [6] 최현, “고장수목에서 기본사상 중요도 계산을 위한

과학적 접근법”, 숭실대학교 석사논문, 2009.
 [7] Barlow R.E., Proschan F., Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models, Rinehart and Winston, 1975.
 [8] Brown K.S., “Evaluating Fault Trees(And & OR gates only) with Repeated Events”, IEEE Transactions on Reliability, 39(1990): 226-235.
 [9] Hennings W., “FAMOCUTN & CUTQN: Programs for Fast Analysis of Large Fault Trees with Replicated & Negated Gates”, IEEE Transactions on Reliability, 44(3)(1995): 368-376.
 [10] Jerone C., “Some Remarks on Rare-Event Approximation”, IEEE Transactions on Reliability, 45(1)(1996): 106-108.
 [11] Kohda T., Henley E.J, Inoue K, “Finding Modules in Fault Trees”, IEEE Transactions on Reliability, 38(1989): 165-176.
 [12] Lee W.S., Grosh DL, Tillman F.A, Lie C.M, “Fault Tree Analysis, Methods and Application: A Review”, IEEE Transactions on Reliability, 34(1985): 194-203.
 [13] McComick N.J., Reliability and Risk Analysis: Methods and Nuclear Power Applications, Academic Press, 1981.
 [14] Wilson, J.M, “Modularizing and Minimizing Fault Trees”, IEEE Transactions on Reliability, 34(1985): 320-322.
 [15] Yang J., Han S., Park J., Jin Y., “Analytic Method to Break Logical Loops Automatically in PSA”, Reliability Engineering and System Safety, 56(1997): 101-105.

저 자 소개

최 성 운



현 경원대학교 산업공학과 교수. 한양 대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행했으며, 2002년부터 1년반동안 University of Washington에서 Visiting Professor를 역임하였음. 주요 관심분야는 자동차 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 통신, 정보시스템의 보안, 신뢰성 설계 및 분석, 서비스 사이언스, RFID시스템, Wavelet에도 관심을 가지고 있음.
 주소: 경기도 성남시 수정구 복정동 산65번지 경원대학교 산업공학과