

# 최소절단집합과 최소경로집합을 이용한 구조 및 신뢰성 중요도 척도의 개발 및 적용

최성운\*

\*가천대학교 산업공학과

## Development and Implementation of Measures for Structural and Reliability Importance by Using Minimal Cut Sets and Minimal Path Sets

Sung-woon Choi\*

\*Dept. of Industrial Engineering, Gachon University

### Abstract

The research discusses interrelationship of structural and reliability importance measures which used in the probabilistic safety assessment. The most frequently used component importance measures, such as Birnbaum's Importance (BI), Risk Reduction (RR), Risk Reduction Worth (RRW), RA (Risk Achievement), Risk Achievement Worth (RAW), Fussel Vesely (FV) and Critically Importance (CI) can be derived from two structure importance measures that are developed based on the size and the number of Minimal Path Set (MPS) and Minimal Cut Set (MCS).

In order to show an effectiveness of importance measures which is developed in this paper, the three representative functional structures, such as series-parallel, k out of n and bridge are used to compare with Birnbaum's Importance measure. In addition, the study presents the implementation examples of Total Productive Maintenance (TPM) metrics and alternating renewal process models with exponential distribution to calculate the availability and unavailability of component facility for improving system performances.

System state structure functions in terms of component states can be converted into the system availability (unavailability) functions by substituting the component reliabilities (unavailabilities) for the component states. The applicable examples are presented in order to help the understanding of practitioners.

**Keywords:** Structural and Reliability Importance, MCS, MPS, Series-Parallel, k Out of n, Bridge, State Structure Function, Component States, TPM Metrics.

### 1. 서론

제품이 고기능화, 첨단화 될수록 고도의 복잡하고 정교한 플랜트의 의존도가 높아진다. 이런 정밀한 플랜트 시스템(System)은 물리적 구조(Physical Structure)가 아닌 기능(Function)의 관점에서 다양한 형태의 설비 컴포넌트(Component)로 구성되어 있다. 기능 형태로는

직렬병렬 혼합구조(Series Parallel Structure), 브릿지구조(Bridge Structure), n중 k 구조(k Out of n Structure)가 있으며 이는 플랜트 시스템이 관련되어 있는(Relevant) 독립(Independent) 설비 컴포넌트로 구성된 응집논리(Coherent Logic)를 만족할 경우 적용된다.

TPM(Total Productive Maintenance)[1,2]은 오퍼레이터, 보전부문, 생산기술부문, 개발설계부문, 고객사,

† 이 논문은 2012년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임.(GCU-2011-R112)

† 교신저자: 최성운, 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342

MP: 011-256-0697, E-mail: swchoi@gachon.ac.kr

2011년 7월 8일 접수; 2011년 9월 27일 수정본 접수; 2012년 3월 8일 게재확정

협력업체가 모여 시간가동률(Availability), 성능가동률(Performance Efficiency), 양품률(Quality Rate)등의 설비중합효율 향상을 위해 8대 주요 기능(Eight Major Functions)의 중복소집단 활동(Overlapping Small Group Activities)을 스텝별(Step-by-Step)로 추진하는 협업적(Collaborative) 방법이다. 설비중합효율은 장치산업(Process Industry)인 경우는 OPE(Overall Plant Effectiveness), 가공조립산업(Machining and Assembly Industry)인 경우는 OEE(Overall Equipment Effectiveness)라 하고, 3가지로 구성된 지표로 분해하여 제로고장(Zero Breakdown), 제로결점(Zero Defect), 제로사고(Zero Accidents)의 개선활동을 추구한다.

시간가동률은 TPM 초기 개선활동의 대상이 되는 지표로 플랜트의 구성요소인 설비컴포넌트의 구조와 신뢰성 중요도를 고려한 보전활동인 RCM(Reliability Centered Maintenance)에 의해 수행된다. 즉 RCM에서는 컴포넌트 설비의 신뢰도(Reliability)의 구조 중요도(Structural Importance : SI)와 신뢰성 중요도(Reliability Importance : RI)를 고려하여 플랜트 시스템의 시간가동률(Availability)을 향상하거나 역으로 설비의 불신뢰도(Unreliability)의 SI와 RI를 고려하여 플랜트 시스템의 비시간가동률(UnAvailability)을 감소한다.

구조 및 신뢰성 중요도 척도의 기존연구는 PSA(Probability Safety Assessment)의 적용[3-4, 7-9], 결합 중요도[5,14], 분산 중요도[12,13], 가용도 중요도[6,10,11]등이 있다. 그러나 컴포넌트 설비의 플랜트 시스템에 대한 기능논리의 상태구조함수를 체계적으로 분석하기 위해서는 가동, 비가동의 보완적(Dual) 관계를 통한 척도개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 보완적 관계인 MPS(Minimal Path Set)와 MCS(Minimal Cut Set)의 크기(Size)와 개수(Number)를 고려한 구조 중요도를 개발한다. 개발된 알고리즘의 우수성을 평가하기 위해 직병렬구조, 브릿지구조, 2중 3구조 등에 적용하여 기존의 Birnbaum 중요도 척도와 비교한다. 또한 본 연구에서는 TPM지표와 지수분포 마코프(Markov)모형을 이용한 설비의 시간가동률과 비시간가동률의 적용방안을 제시하였다.

## 2. 시스템 중요도 척도

### 2.1 시스템 구조함수의 중요도

컴포넌트 상태벡터(State Vector)  $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$ 에 대한 시스템 상태의 구조함수(Structure Function)는  $\varnothing(x)$ 이다. 시스템 구조함수의 중요도는 신뢰도

(Reliability), 비시간가동률(Unavailability)관점과 불신뢰도(Unreliability), 시간가동률(Availability)관점 두가지로 표현할 수 있는데, 컴포넌트와 시스템 상태함수는 중요도의 목적에 따라 기능(Function)을 발휘할 경우는 1, 기능을 발휘하지 않을 경우는 0이 되는 이진함수(Binary Function)이다. 이러한 구조 중요도(Structural Importance : SI) 함수는 컴포넌트의 신뢰도  $p_i$  또는 비신뢰도  $q_i (= 1 - p_i)$ 가 시스템의 시간가동률  $a(p)$ , 비시간가동률  $u(q) (= 1 - a(p))$ 가 주어지는 신뢰성 중요도(Reliability Importance : RI)와 다르다. 즉 SI는 컴포넌트의 값이 주어지지 않을 경우 상태벡터  $x$ 에 의한 시스템상태의 중요도를 구조함수  $\varnothing(x)$ 로 구하는 반면, RI는 컴포넌트의 값이 주어질 경우  $a(p), u(q)$ 로 시스템의 중요도를 평가한다. 그러나 신뢰성 중요도 RI에서 모든 컴포넌트의  $q_i = 1/2$ 로 놓을 경우 이는 컴포넌트의 값을 모른다는 구조 중요도(SI)의 개념과 같기 때문에 본 연구에서는 신뢰성 중요도에 의한 척도로만 표현한다.

Birnbaum 중요도(Birnbaum Importance)는  $BI(i) = u(q_i = 1) - u(q_i = 0) = \partial u(q) / \partial q_i$ 이다. 이는 편미분에 의한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)으로 시스템의 중요도를 평가하나  $i$  컴포넌트와 무관하다는 단점을 지니고 있다. 즉  $BI(i)$ 는  $i$  컴포넌트에 의한 시스템 비가동률의 증가를 중요도 척도로 나타낸 것이다.

위험감소(Risk Reduction)  $RR(i) = u(q) - u(q_i = 0)$ 이고 위험감소가치(Risk Reduction Worth)  $RRW(i) = u(q) / u(q_i = 0)$ 으로 컴포넌트  $i$ 의 불신뢰도가 0일 경우의 시스템의 비가동률의 감소분의 기여도를 중요도로 평가하기 위해 분모에  $u(q_i = 0)$ 을 놓는 척도이다.  $RR(i)$ 는 동일단위로 비교를 할 경우,  $RRW(i)$ 는 무단위(Dimensionless)로 비교를 할 경우 각각 사용된다.

위험성취(Risk Achievement)  $RA(i) = u(q_i = 1) - u(q)$ 이고 위험성취가치(Risk Achievement Worth)  $RAW(i) = u(q_i = 1) / u(q)$ 로 컴포넌트  $i$ 의 불신뢰도가 1일 경우의 시스템의 비가동률의 기여도를 중요도로 평가하기 위해 분자에  $u(q_i = 1)$ 를 놓은 척도이다.  $RA(i)$ 는 동일단위,  $RAW(i)$ 는 무단위로 비교할 경우 사용된다.

$BI(i)$ 가 컴포넌트  $i$ 와 무관한 시스템의 중요도를 평가하는 단점을 보완하기 위해  $BI(i)$ 에 자신의  $q_i$  값을 다시 곱하는 임계적 중요도(Critically Importance)는  $CI(i) = BI(i) \times q_i / u(q)$ 로 분모의  $u(q)$ 는 무단위의 정규화(Normalizing)를 목적으로 한다.

Fussell-Vesely 중요도(Fussell Vesely Importance)  $FV(i) = (u(q) - u(q_i = 0)) / u(q)$ 로, 이는  $CI(i)$ 와 같은 의미의 척도이다.

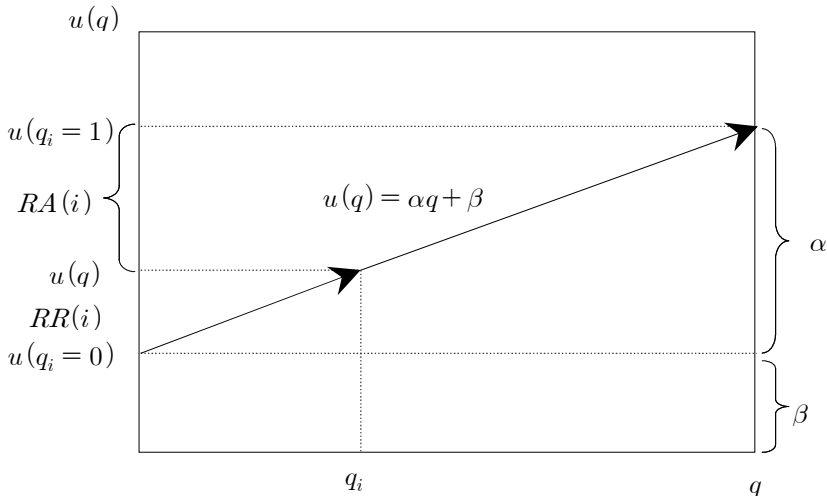
2.2 중요도 척도의 관계

$BI(i) = RR(i) + RA(i)$ ,  $RRW(i) = 1/(1 - FV(i))$ ,  $RAW(i) = RA(i)/u(q) + 1$ ,  $FV(i) = RR(i)/u(q)$ ,  $CI(i) = FV(i)$ 로 기하학적인 그래프로 표시하면[9] <그림1>과 같다.

<그림1>에서  $RR(i) = u(q) - u(q_i = 0)$ 이고  $RRW(i)$ 는  $u(q)$ 함수의 기울기  $\alpha$ 에서  $u(q)/u(q_i = 0)$ 에 해당한다. 비가동률이 클수록 중요한 척도를 구하기 위해서는 증가하는 화살표의 방향으로 값을 구해야 하며 이를 위해  $u(q_i = 0)$ 를 분모에 놓는다.

이와 반면에  $RA(i) = u(q_i = 1) - u(q)$ 이고  $RAW(i)$ 는

$u(q)$ 함수의 기울기  $\alpha$ 에서  $u(q_i = 1)/u(q)$ 에 해당한다.  $RAW(i)$ 와 같이 비가동률이 클수록 중요한 척도를 구하기 위해서는 증가하는 화살표의 값을 구해야 하며 이를 위해  $u(q_i = 1)$ 를 분자에 놓는다. 따라서  $u(q) = \alpha q + \beta$ 에서 기울기  $\alpha = RR(i) + RA(i)$ 가 되며 이는  $BI(i) = u(q_i = 1) - u(q_i = 0)$ 로 역시 기울기  $\alpha$ 와 같게 된다. 팀워크(Team Work)를 비유하면  $BI(i)$ 는  $i$ 사람과 관계되는 팀원 중  $i$ 사람이 빠졌을 경우의 영향이고  $RRW(i)$ 는 전체 팀에서  $i$ 사람의 존재가 있을 때의 영향이고  $FV(i)$ ,  $CI(i)$ 는 전체 팀에서  $i$ 사람과 관계되는 팀원의 영향이다.



<그림 1> 신뢰성 중요도 척도

3. 구조 및 신뢰성 중요도 척도의 개발

컴포넌트와 시스템의 논리관계(Logical Relationship)를 하향식(Top-Down)으로 분석하는 RBD(Reliability Block Diagram)와 FTA(Fault Tree Analysis)는 상호

보완적인 관점에서 쌍대(Dual)검증을 한다. MCS는 시스템의 비시간동률을 발생하는 병렬(Parallel)블럭 또는 AND게이트이고 MPS는 시스템의 시간가동률을 발생하는 직렬(Series)블럭 또는 OR게이트이다.

<표 1> MCS와 MPS에 의한 중요도 척도

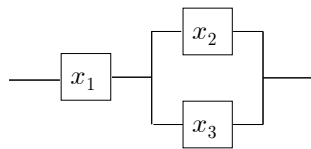
MCS에 의한 중요도 척도			
시스템상태	논리구조	컴포넌트상태	
비시간가동률 불신뢰도 고장		WMCS의 크기: $n(i)$	BMCS의 개수: $k$
	RBD	병렬블럭	직렬블럭
	FTA	AND게이트	OR게이트
MPS에 의한 중요도 척도			
시스템상태	논리구조	컴포넌트상태	
시간가동률 신뢰도 정상		WMPS의 크기: $n'(i)$	BMPS의 개수: $k'$
	RBD	직렬블럭	병렬블럭
	FTA	OR게이트	AND게이트

<표1>에서 시스템 비시간가동률은 병렬블럭(AND게이트)으로 구성된 MCS의 직렬구조(OR게이트)로 상태함수가 표현되며 MCS내(Within MCS: WMCS) 컴포넌트 크기 (Size)  $n(i)$ 가 작거나 MCS간 (Between MCS: BMCS) 컴포넌트 개수(Number)  $k$ 가 많으면 시스템 비시간가동률은 커진다. 따라서  $n(i)$ 와  $k$ 에 의한 시스템의 비시간가동률의 중요도는 (1)식과 같다.

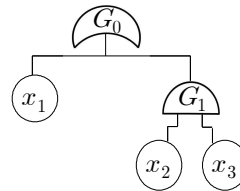
$$Iu(q_i) = \sum^k \frac{1}{n(i)} \times k \quad (1)$$

<표1>에서 시스템 시간가동률은 직렬블럭(OR게이트)으로 구성된 MCS의 병렬구조(AND 게이트)로 상태함수가 표현되며 MPS내 (Within MPS: WMPS) 컴포넌트 크기  $n'(i)$ 가 작거나 MPS간(Between MPS: BMPS) 컴포넌트 개수( $k'$ )가 많으면 시스템 시간가동률은 커진다. 따라서  $n'(i)$ 와  $k'$ 에 의한 시스템의 시간가동률의 중요도는 (2)식과 같다.

$$Ia(p_i) = \sum^{k'} \frac{1}{n'(i)} \times k' \quad (2)$$

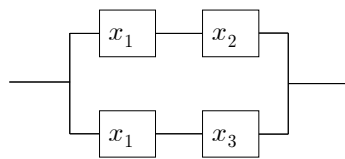


(a) RBD

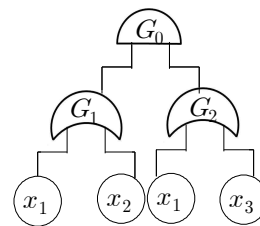


(b) FTA

<그림2> MCS에 의한 직병렬구조



(a) RBD



(b) FTA

<그림 3> MPS에 의한 직병렬구조

<그림 2>에서 MCS에 의한  $u(q) = q_1q_2 + q_1q_3 - q_1q_2q_3$ 로 2.1절의  $BI(i) = \partial u(q)/\partial q_i$ 에 의해  $BI(1) = q_2 + q_3 - q_2q_3$ ,  $BI(2) = q_1 - q_1q_3$ ,  $BI(3) = q_1 - q_1q_2$ 이다.  $RRW(i) = u(q)/u(q_i = 0)$ 에 의해  $RRW(1) = u(q)/0 = \infty$ ,  $RRW(2) = u(q)/q_1q_3$ ,  $RRW(3) = u(q)/q_1q_2$ 이다.

#### 4. 시스템 기능구조별 개발된 중요도 척도의 성능평가

##### 4.1 직병렬구조

직병렬 혼합구조(Series-Parell Structure)의  $MCS = \{x_1, x_2, x_3\}$ 에 의한  $\emptyset_{MCS}(x) = x_1 \Pi (x_2 \Pi x_3) = x_1x_2 + x_1x_3 - x_1x_2x_3$  이고 FTA는 <그림 2>와 같다. 또한  $MPS = \{x_1x_2, x_1x_3\}$ 에 의한 RBD와 FTA는 <그림 3>과 같고  $\emptyset_{MPS}(x) = (x_1 \Pi x_2) \Pi (x_1 \Pi x_3) = (x_1x_2) \Pi (x_1x_3) = x_1x_2 + x_1x_3 - x_1x_2x_3$ 이고 FTA와 RBD는 <그림3>과 같다.  $\emptyset_{MCS}(x)$ 와  $\emptyset_{MPS}(x)$ 의 상태 구조함수는 같아지며 이를 이용해 SI를 구한다. 그러나 컴포넌트 값이 주어질 경우  $\emptyset_{MCS}(x)$ 는  $u(q)$ ,  $\emptyset_{MPS}(x)$ 는  $a(p)$ 의 형태로 대입하여 RI를 구한다.

$RAW(i) = u(q_i = 1)/u(q)$ 에 의해  $RAW(1) = (q_2 + q_3 - q_2q_3)/u(q)$ ,  $RAW(2) = q_1/u(q)$ ,  $RAW(3) = (q_1q_2 + q_1 - q_1q_2)/u(q)$ 이고,  $FV(i) = (u(q) - u(q_i = 0))/u(q)$ ,  $CI(i) = BI(i) \times q_i/u(q)$ 로  $FV(i) = CI(i)$ 이므로  $FV(1) = CI(1) = q_1(q_2 + q_3 - q_2q_3)/u(q)$ ,  $FV(2) = CI(2) = q_2(q_1 - q_1q_3)/u(q)$ ,

$FV(3) = CI(3) = q_3(q_1 - q_1q_2)/u(q)$ 이다. <그림 3>에서 MPS에 의한  $a(p) = p_1p_2 + p_1p_3 - p_1p_2p_3$ 로 3.1절의 중요도 척도 공식에서  $p_i = 1 - q_i$ 로 치환해 주면 된다.

본 연구에서 개발한 3.2절의 중요도  $I_{u(q_i)}$ ,  $I_{a(p_i)}$ 와 MCS, MPS에 의한  $BI(i)$ 를 비교하면 <표 2>와 같으며  $BI(i)$ 와 같이 직렬구조(OR게이트)의 컴포넌트 1의 중요도가 가장 크게 나타난다.

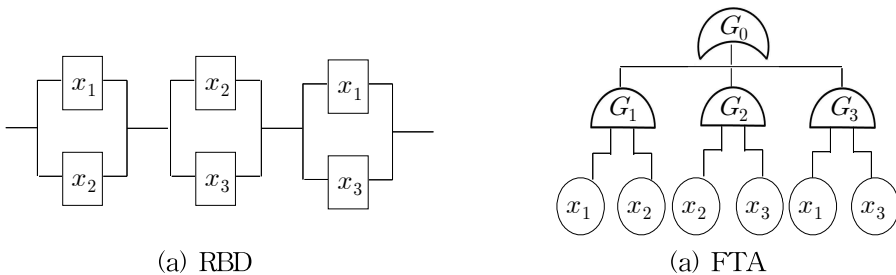
<표 2> 직병렬 구조의 중요도 성능 비교

컴포넌트 $i$	MCS		MPS	
	$BI(i)$	$I_{u(q_i)}$	$BI(i)$	$I_{a(p_i)}$
컴포넌트 1	$\frac{q_2 + q_3 - q_2q_3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4}} = \frac{3}{4}$	$\frac{1}{1} \times 2 = 2$	$\frac{p_2 + p_3 - p_2p_3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4}} = \frac{3}{4}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 2 = 2$
컴포넌트 2	$\frac{q_1 - q_1q_3}{\frac{1}{2} - \frac{1}{4}} = \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} \times 2 = 1$	$\frac{p_1 - p_1p_3}{\frac{1}{2} - \frac{1}{4}} = \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} \times 2 = 1$
컴포넌트 3	$\frac{q_1 - q_1q_2}{\frac{1}{2} - \frac{1}{4}} = \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} \times 2 = 1$	$\frac{p_1 - p_1p_2}{\frac{1}{2} - \frac{1}{4}} = \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} \times 2 = 1$

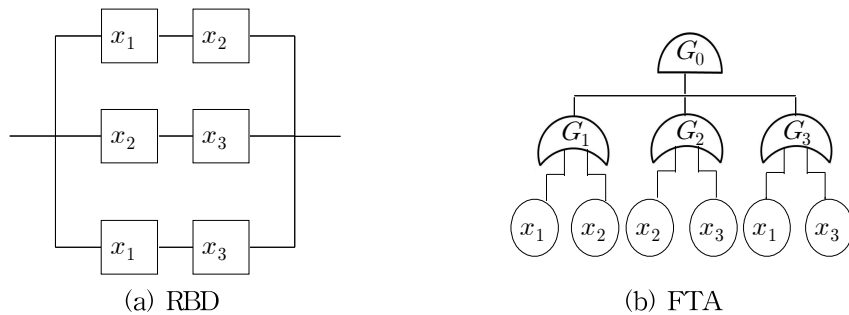
4.2 2중 3구조

2중 3구조(2 Out of 3 Structure)의  $MCS = MPS = \{x_1x_2, x_2x_3, x_1x_3\}$ 이고  $\phi_{MCS}(x) = (x_1 \amalg x_2) \amalg (x_2 \amalg x_3)$

$\amalg (x_1 \amalg x_3) = x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3 - 2x_1x_2x_3$ 이고,  $\phi_{MPS}(x) = (x_1 \amalg x_2) \amalg (x_2 \amalg x_3) \amalg (x_1 \amalg x_3)$ 로  $\phi_{MCS}(x)$ 와 같다. MCS와 MPS에 의한 RBD와 FTA는 <그림 4>, <그림 5>와 같다.



<그림 4> MCS에 의한 2중 3구조



<그림 5> MPS에 의한 2중 3구조

<그림 4>에서 MCS에 의한  $u(q) = q_1q_2 + q_2q_3 + q_1q_3 - 2q_1q_2q_3$  로 2.1절의  $BI(1) = q_2 + q_3 - 2q_2q_3$ ,  $BI(2) = q_1 + q_3 - 2q_1q_3$ ,  $BI(3) = q_2 + q_1 - 2q_1q_2$  이다.  $RRW(1) = u(q)/q_2q_3$ ,  $RRW(2) = u(q)/q_1q_3$ ,  $RRW(3) = u(q)/q_1q_2$  이고,  $RAW(1) = (q_2 + q_3 - 2q_2q_3)/u(q)$ ,  $RAW(2) = (q_1 + q_3 - 2q_1q_3)/u(q)$ ,  $RAW(3) = (q_1 + q_2 - 2q_1q_2)/u(q)$  이다.  
 $FV(1) = CI(1) = q_1(q_2 + q_3 - 2q_2q_3)/u(q)$ ,  $FV(2) = CI(2) = q_2(q_1 + q_3 - 2q_1q_3)/u(q)$ ,  $FV(3) = CI(3) = q_3(q_2 + q_1 - 2q_1q_2)/u(q)$  이다. <그림 5>에서 MPS에 의한  $a(p) = p_1p_2$

$+ p_2p_3 + p_1p_3 - 2p_1p_2p_3$  로 2.1절의 중요도 공식에서  $p_i = 1 - q_i$ 로 치환해 주면 된다.

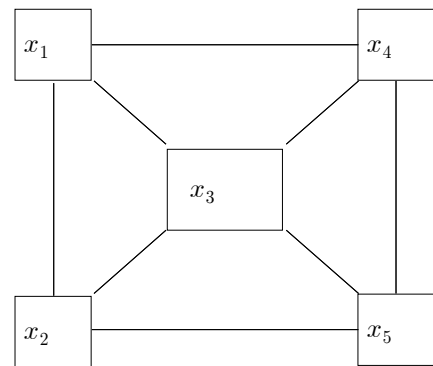
MCS와 MPS에 의한  $BI(i)$ 는 모든  $p_i = q_i = \frac{1}{2}$ 로 같아지며 본 연구에서 개발한 3절의 중요도 척도와 비교하면  $BI(i)$ 와 같이 모든 컴포넌트가 동일한 성능을 나타낸다.

<표 3> 2중 3구조의 중요도 성능 비교

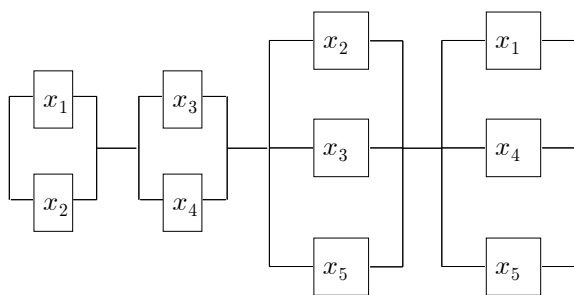
컴포넌트 $i$	MCS		MPS	
	$BI(i)$	$I_{u(q_i)}$	$BI(i)$	$I_{a(p_i)}$
컴포넌트 1	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 3 = 3$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 3 = 3$
컴포넌트 2	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 3 = 3$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 3 = 3$
컴포넌트 3	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 3 = 3$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \times 3 = 3$

### 4.3 브릿지구조

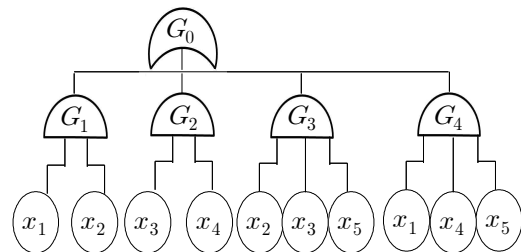
<그림 6>과 같은 브릿지구조(Bridge Structure)의  $MCS = \{x_1x_2, x_3x_4, x_2x_3x_5, x_1x_4x_5\}$  이고  $\phi_{MCS}(x) = (x_1 \parallel x_2) \parallel (x_3 \parallel x_4) \parallel (x_2 \parallel x_3 \parallel x_5) \parallel (x_1 \parallel x_4 \parallel x_5) = x_1x_3 + x_2x_4 + x_2x_3x_5 + x_1x_4x_5 - x_1x_2x_3x_4 - x_1x_2x_3x_5 - x_1x_2x_3x_4 - x_1x_2x_3x_5 - x_1x_3x_4x_5 - x_2x_3x_4x_5$  이고  $MPS = \{x_1x_3, x_2x_4\}$  의  $\phi_{MPS}(x) = (x_1 \parallel x_3) \parallel (x_2 \parallel x_4) \parallel (x_2 \parallel x_3 \parallel x_5) \parallel (x_1 \parallel x_3 \parallel x_4)$  로  $\phi_{MPS}(x)$ 와 같다. MCS와 MPS에 의한 RBD와 FTA는 <그림 7>, <그림 8>과 같다.



<그림 6> 브릿지구조

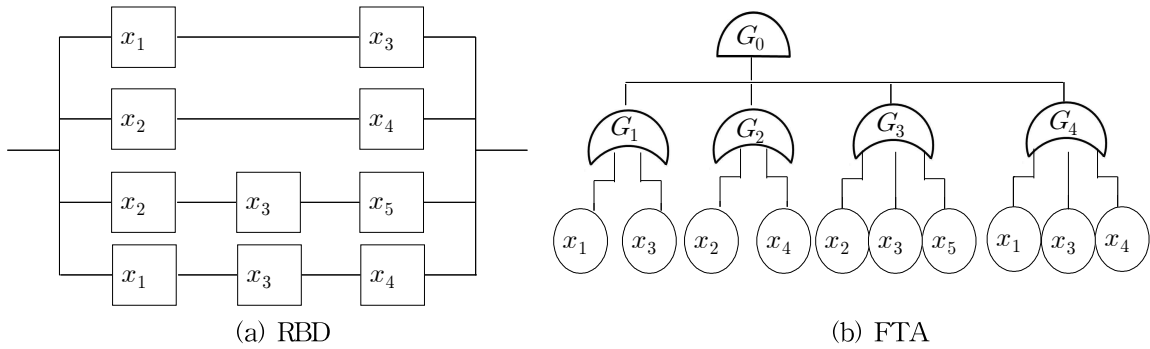


(a) RBD



(b) FTA

<그림 7> MCS에 의한 브릿지구조



<그림 8> MPS에 의한 브릿지구조

<그림 7>에서 MCS에 의한  $u(q) = q_1q_3 + q_2q_4 + q_2q_3q_5 + q_1q_4q_5 - q_1q_2q_3q_4 - q_1q_2q_3q_5 - q_1q_3q_4q_5 - q_2q_3q_4q_5$  로 21절의

$BI(1) = q_3 + q_4q_5 - q_2q_3q_4 - q_2q_3q_5 - q_3q_4q_5,$   
 $BI(2) = q_4 + q_3q_5 - q_1q_2q_4 - q_1q_3q_5 - q_3q_4q_5,$   
 $BI(3) = q_1 + q_2q_5 - q_1q_2q_4 - q_1q_2q_5 - q_1q_4q_5 - q_2q_4q_5,$   
 $BI(4) = q_2 + q_1q_5 - q_1q_2q_3 - q_1q_3q_5 - q_2q_3q_5,$   
 $BI(5) = q_2q_3 + q_1q_4 - q_1q_2q_3 - q_1q_3q_4 - q_2q_3q_4$  이다.

$RRW(1) = u(q)/(q_2q_4 + q_2q_3q_5 - q_2q_3q_4q_5),$   
 $RRW(2) = u(q)/(q_1q_3 + q_1q_4q_5 - q_1q_3q_4q_5),$   
 $RRW(3) = u(q)/(q_2q_4 + q_1q_4q_5),$   
 $RRW(4) = u(q)/(q_1q_3 + q_2q_3q_5 - q_1q_2q_3q_4),$   
 $RRW(5) = u(q)/(q_1q_3 + q_2q_4 + q_1q_2q_3q_4)$  이고,

$RAW(1) = (q_3 + q_2q_4 + q_2q_3q_5 + q_4q_5 - q_2q_3q_4 - q_2q_3q_5 - q_3q_4q_5 - q_2q_3q_4q_5)/u(q),$   
 $RAW(2) = (q_1 + q_4 + q_2q_3q_5 + q_1q_4q_5 - q_1q_3q_4 - q_1q_3q_5 - q_1q_3q_4q_5 - q_3q_4q_5)/u(q),$   
 $RAW(3) = (q_1 + q_2q_4 + q_2q_5 + q_1q_4q_5 - q_1q_2q_4 - q_1q_2q_5 - q_1q_4q_5 - q_2q_4q_5)/u(q),$

$RAW(4) = (q_1q_2 + q_2 + q_2q_3q_5 + q_1q_5 - q_1q_2q_3 - q_1q_2q_3q_5 - q_1q_2q_5 - q_2q_3q_5)/u(q)$   
 $RAW(5) = q_1q_2 + q_2q_4 + q_2q_3 + q_1q_4 - q_1q_2q_3q_4 - q_1q_2q_3 - q_1q_3q_5 - q_2q_3q_4)/u(q)$  이다.

$FV(1) = CI(1) = q_1(q_3 + q_4q_5 - q_2q_3q_4 - q_2q_3q_5 - q_3q_4q_5)/u(q),$   
 $FV(2) = CI(2) = q_2(q_4 + q_3q_5 - q_1q_3q_4 - q_1q_3q_5 - q_3q_4q_5)/u(q),$   
 $FV(3) = CI(3) = q_3(q_1 + q_2q_5 - q_1q_2q_4 - q_1q_2q_5 - q_1q_4q_5 - q_2q_4q_5)/u(q),$   
 $FV(4) = CI(4) = q_4(q_2 + q_1q_5 - q_1q_2q_3 - q_1q_3q_5)/u(q),$   
 $FV(5) = CI(5) = q_5(q_2q_3 + q_1q_4 - q_1q_2q_3 - q_1q_3q_4 - q_2q_3q_4)/u(q)$  이다.

<그림 8>에서 MPS에 의한  $a(p) = p_1p_3 + p_2p_4 + p_2p_3p_5 + p_1p_4p_5 - p_1p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_5 - p_1p_3p_4p_5 - p_2p_3p_4p_5$  로 2.1절의 중요도 공식에  $p_i = 1 - q_i$ 로 치환해 주면 된다.

MCS와 MPS에 의한  $BI(i)$ 는 모든  $p_i = q_i = \frac{1}{2}$ 로 같아지며 본 연구에서 개발한 3절의 중요도 척도와 비교하면  $BI(i)$ 와 같이 컴포넌트 5가 제일 작은 성능을 유지한다.

<표 4> 브릿지구조의 중요도 성능 비교

컴포넌트 $i$	MCS		MPS	
	$BI(i)$	$Iu(q_i)$	$BI(i)$	$Ia(p_i)$
컴포넌트 1	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$
컴포넌트 2	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$
컴포넌트 3	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$
컴포넌트 4	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{3}{8}$	$(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{10}{3}$
컴포넌트 5	$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{1}{8}$	$(\frac{1}{3} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{8}{3}$	$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} - \frac{1}{8} = \frac{1}{8}$	$(\frac{1}{3} + \frac{1}{3}) \times 4 = \frac{8}{3}$

## 5. TPM지표 적용

가공조립산업의 TPM(Total Productive Maintenance)에서 3대의 설비가 4.1절과 같이 직병렬 기능구조로 운영되고 있을 때 개별 설비의 시간가동률(Individual Equipment Availability : IEA)  $p_i$ 와 개별 설비의 비시간가동률(Individual Equipment Nonavailability : IEN)  $q_i (= 1 - p_i)$ 에 대한 전체 설비의 시간가동률(Overall Equipment Availability : OEA)

$a(p) = p_1p_2 + p_1p_3 - p_1p_2p_3$ 이고 전체 설비의 비시간가동률(Overall Equipment Nonavailability: OEN)  $a(q) = q_1q_2 + q_1q_3 - q_1q_2q_3$ 이다.

여기서 IEA  $p_i$ 와 IEN  $q_i$ 가 결정되면 OEA  $a(p)$ 와 OEN  $u(q)$ 는 함수관계로 계산된다. 설비중합효율=시간가동률×성능가동률×양품률의 TPM 지표에서  $p_i$ 는 시간가동률에 해당하며 (3)식과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \text{시간가동률} &= \frac{\text{부하시간} - \text{정지로스시간}}{\text{부하시간}} \\ &= \frac{\text{가동시간} + \text{정지로스시간}}{\text{가동시간} + \text{정지로스시간}} \\ &= \frac{\text{가동시간/정지로스횟수}}{\text{가동시간/정지로스횟수} + \text{정지로스시간/정지로스횟수}} \\ &= \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \\ &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서  $p_i = \mu_i / (\lambda_i + \mu_i)$ 이고  $q_i = 1 - p_i = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i)$ 이 되어 각 설비에 대한  $\lambda_i, \mu_i$ 의 기초자료에 의해 전체 설비의 시간가동률과 비시간가동률이 계산된다. 계산된  $a(p)$ 와  $u(q)$ 에 의해 설비별 구조 중요도와 신뢰성 중요도의 척도가 유도되며 이는 정지로스시간의 항목인 고장로스, 준비작업조정로스, 절삭로스, 초기로스 등의 개선이 요구되는 설비의 우선순위를 지정할 수 있다.

(3)식은 지수분포의 Markov 수리모형에 의해 유도될 수 있으며 Short-Run(Transient)상태인 경우  $p_i(t) = \mu_i / (\lambda_i + \mu_i) / (\lambda_i + \mu_i) e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}$ ,  $q_i(t) = 1 - p_i(t) = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i) - \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i) e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}$ 가 된다. Long-Run(Steady-State, Asymptotic, Limiting) 상태인 경우  $t \rightarrow \infty$ 가 되어  $p_i$ 는 (3)식과 같고  $q_i = 1 - p_i$ 에 의해 구한다.

## 6. 결론

본 연구에서는 플랜트 시스템의 가동(Uptime) 과 비가동(Downtime)의 보완적(Dual) 관계인 MPS와 MCS

를 이용한 컴포넌트 설비의 구조 중요도 척도를 제안하였다. 제안된 척도는 MPS와 MCS를 구성하는 컴포넌트 집합내(Within)의 크기(Size)와 집합간(Between)의 개수(Number)를 고려하여 개발하였다. 개발된 척도를 직병렬구조, 브릿지구조, 2중 3 기능구조에 적용한 결과 Birnbaum 중요도와 일치하는 우수한 성능을 보여 주었다. 또한 TPM 지표와 지수분포 교번재생모형(Alternating Renewal Model)을 이용한 설비의 시간가동률과 비시간가동률의 적용방안을 제시하였다.

## 7. 참고 문헌

- [1] 일본 플랜트 메이티너스 협회, 생산혁신을 위한 신 TPM 전개 프로그램 : 가공조립, 한국표준협회, 2009.
- [2] 일본 플랜트 메이티너스 협회, 생산혁신을 위한 신 TPM 전개 프로그램 : 장치공업, 한국표준협회, 2009.
- [3] 임태진, 시스템 신뢰도 공학, 숭실대학교 출판부, 2004.
- [4] 최성운, RBD와 FTA의 논리구조와 신뢰성 중요도에 의한 시스템 비시간가동률 개선방안, 대한안전경영과학회지, 13(3)(2011) : 45-53.
- [5] Armstrong M.J., "Joint Reliability-Importance of Components", IEEE Transactions on Reliability, 44(3)(1995) : 408-412.
- [6] Aven T., "Reliability/Availability Evaluations of Coherent Systems Based on Minimal Cut Sets", Reliability Engineering, 13(1985) : 93-104.
- [7] Barlow R.E., Proschan F., Statistical Theory of Reliability and Life Testing : Probability Models, Rinehart and Winston, 1975.
- [8] Boland P.J., Neweigh E., "Measures of Component Importance in Reliability Theory", Computer and Operations Research, 22(1995) : 455-463.
- [9] Borst M., Schoonakker, "An Overview of PSA Importance Measures", Reliability Engineering and System Safety, 72(2001) : 241-245.
- [10] Cassidy C.R., Pohl E.A., Jin S., "Managing Availability Improvement Efforts with Importance Measures and Optimization", IMA Journal of Management Mathematics, 15(2004) : 161-174.
- [11] Miman M., Pohl E.A., "Uncertainty Assessment for Availability : Importance Measures", Reliability and Maintaintability Symposium(RAMS), (2006): 222-227.
- [12] Nakashima K., Yamato K., "Variance-Importance of System Components", IEEE Transactions on Reliability, 31(1)(1982) : 99-100.



- [13] Pan Z., Tai Y., "Variance Importance of System Components by Monte Carlo", IEEE Transactions on Reliability, 37(4)(1998) : 421-423.
- [14] Vesely Wo, Belhadj M, Rezos J.T., "PRA Importance Measures for Maintenance Prioritization Applications", Reliability Engineering and System Safety, 43(1994) : 307-318.

## 저 자 소 개

### 최 성 운



현 가천대학교 산업공학과 교수.  
 한양대학교 산업공학과에서 공학  
 사, 공학석사, 공학박사 학위를 취  
 득하고, 1994년 한국과학재단 지  
 원으로 University of Minnesota  
 에서 1년간 Post-Doc을 수행했으  
 며, 2002년부터 1년 반 동안  
 University of Washington에서

Visiting Professor를 역임하였음. 주요 관심분야는 자동화  
 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 통신, 정보시스템  
 의 보안, 신뢰성 설계 및 분석, 서비스 사이언스, RFID시  
 스템, Wavelet에도 관심을 가지고 있음.

주소: 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342 가천대학교 산업  
 공학과