



신뢰도 경로를 이용한 k-out-of-n 시스템 신뢰도 분석

이헌석 · 양재모 · 유병태^{*} · 박철환 · 김대흠 · [†]고재욱

광운대학교 화학공학과, *국립방재연구원

(2012년 10월 11일 접수, 2012년 10월 26일 수정, 2013년 2월 22일 채택)

Reliability Analysis of k-out-of-n System Using Reliability Path

Heon Seok Lee · Jae Mo Yang · Byungtae Yoo^{*} · Chulhwan Park

Deaheum Kim · [†]Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

^{*}National Disaster Management Institute

(Received October 11, 2012; Revised October 26, 2012; Accepted February 22, 2013)

요약

최근 발전, 가스 설비, 화학공장 등의 대형 시스템들은 매우 복잡한 구조를 지니고 있다. 대부분의 공정들은 효율성을 위하여 높은 신뢰성을 요구하고 있으나, 복잡한 과정으로 인하여 신뢰도 분석이 상대적으로 어려운 실정이다. 복잡한 화학공정에서의 신뢰성 분석을 위하여 이 논문에서는 k-out-of-n로 구성된 화학공정을 RBD를 이용하여 신뢰성 경로를 파악하고, 고장관정행렬을 적용하여 신뢰도를 계산하였다. 이 기법이 k-out-of-n 시스템의 신뢰성 분석에 유용하게 사용될 수 있다는 것을 제시하였다.

Abstract - Large scale systems, the facilities for the production of power, gas and chemical, have the complex structures. Most systems require the high reliability for the improvement of process efficiency, but it is difficult to analyze the reliability of processes with complex structures. In this study, we investigated reliability path of chemical process with k-out-of-n system by reliability block diagram(RBD) and calculated the reliability of process through the failure enumeration method of reliability path. This method should help in analyzing the reliability of k-out-of-n system.

Key words : reliability, k-out-of-n system, RBD, reliability path

1. 서론

최근에는 원자력발전, off-shore 플랜트, 화학공장과 같은 에너지시설에서 발생하는 사고는 직접적인 피해 뿐만 아니라 운전 중단으로 인한 간접적인 피해가 많이 발생하였다. 국내에서도 화학공장 및 가스시설 등에서 발생한 사고로 인하여 정성적 위험성 평가 방법에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 그 결과 위험요인에 대한 안전설비의 강화로 사고가 많이 감소하였다. 최근에는 그동안 축적된 운전 데이터를 기반으로 정량적 위험성평가도 적용하여 체계적인

안전운전에 도움이 되고 있다. 하지만 대부분 위험성평가 방법은 사고를 기반으로 하여 진행되어서 공정의 안정성(Stability)을 분석하기에는 다소 어려움이 있다. 공정의 안정성(Stability)을 분석하기 위해서는 공정시스템의 신뢰성을 정량적으로 예측하는 것은 매우 중요한 문제이다. 각각의 설비의 신뢰성 데이터를 바탕으로 공정시스템이 정상 작동을 유지할 수 있도록 함으로써 공정의 안정성(Stability)을 확보할 수 있기 때문이다. 신뢰성의 확보는 공정내 설비의 이상으로 인한 공정중단을 예방하여, 공정내 안전성(Safety)을 향상시킬 수 있다.

현대 화학공장의 경우 규모가 크고, 시스템이 복잡하고 유해·위험물질들이 고온·고압상태로 다량으로 반응·운송·저장되어 화재·폭발·유독물질

[†]Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

누출과 같은 사고가 발생할 잠재 위험성이 매우 높아 설계단계에서부터 안전성(Safety)을 최우선으로 고려하고 있다. 최근에는 공정설계과정에서부터 설비의 연계관계와 그에 따른 영향분석을 통하여 안정성(Safety)을 확보하고, 공정의 이상운전을 방지, 공정의 신뢰도를 높일 수 있도록 많은 연구가 진행 중에 있다. 이렇게 공정내 높은 신뢰성을 확보할 경우에는, 가용성이 높아지게 되고 공정의 생산성도 향상된다.

따라서 공정의 설계 과정에서 공정의 신뢰성을 정량적으로 예측하는 것은 매우 중요한 문제이다. 각각의 설비의 신뢰성 데이터를 바탕으로 공정이 정상 작동을 유지할 수 있도록 함으로써 공정의 안정성(Stability) 향상을 시킬 수 있다. 또한 공정내 설비의 이상으로 인한 공정중단을 예방하여, 공정내 안정성(Safety)을 향상시킬 수 있다.

신뢰성 연구는 1950년대 AGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)에 의해 시작되었다[1]. 1960년대에 접어들어 어느 정도 체계가 확립된 신뢰도 이론은 1967년 Barlow 등에 의해 신뢰성의 수학적 이론(Mathematical Theory of Reliability)으로 집대성되었다[2]. 신뢰도를 계산하는 기존의 방법으로는 신뢰도를 등가로 유지하면서 그래프의 전체 가치를 소거하여 신뢰도를 구하는 방법, 그래프의 전체 연결경로를 열거하여 부울(Boole)연산에 의해서 처리하는 방법 등이 있다[3,4].

이 연구에서는 먼저 복잡한 공정을 서브시스템간의 연결구조를 RBD(Reliability Block Diagram)으로 표현하였다. RBD에서 파악된 연결경로를 전개하여 블록간의 연결 경로를 신뢰성 경로 행렬로 표현하였다. 이 방법을 k out-of-n 시스템에 적용하여 신뢰성을 계산할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

II. 신뢰도 함수

2.1. 신뢰도 함수

신뢰도는 “시스템이 서브시스템이나 설비 등으로 이루어져 주어진 조건 하에서, 의도하는 기간 동안, 규정된 기능을 고장 없이 발휘할 확률”이라고 정의할 수 있다. 여기서 시스템은 시스템을 구성하는 부품, 설비, 서브시스템에 이르는 하드웨어를 뜻한다. 대상 시스템이 시공되어 운전을 시작하여 폐기시 까지 고장을 유발할 수 있는 모든 조건을 의미하며, 환경적 조건과 사용조건으로 나눌 수 있다. 환경조건은 설치된 장소의 온도, 습도, 진동과 같은 외부 자연적 조건들이 있으며, 사용조건은 시스템에 연속운전시간, 유지보수시간, 운전조건과 같은 사용자가 조절이 가능한

조건이다. 의도한 기간은 주로 1,000,000 시간을 기준으로 하며, 규정된 기능은 시스템의 의도하는 바와 같이 작동함을 의미한다.[5]

신뢰도는 크게 정적신뢰도와 동적신뢰도로 나타내는데, 정적신뢰도는 사용할 시간의 길이와 관계하지 않는 신뢰도로서, 시스템이 주어진 임무를 달성할 확률을 나타낸다. 이 연구에서는 연속시간 동안 시스템의 작동을 확률로써 표현하는, 즉 확률변수인 시간 t 의 함수로 나타낸 동적신뢰도가 적합하다.

신뢰도 함수인 $R(t)$ 는 사용시간의 함수로 나타낼 수 있으며 그 값은 시간 t 에서의 정상 작동확률을 의미하고 식(1)로 표현된다.

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N(t)} = \frac{N(t) - N_f(t)}{N(t)} = 1 - \frac{N_f(t)}{N(t)} \quad (1)$$

여기서,

t : 운전시간

$N(t)$: 운전시간 동안 설비 및 하부 시스템의 총수

$N_s(t)$: 운전시간 동안 정상적으로 작동하는 횟수

$N_f(t)$: 운전시간 동안 작동에 실패하는 횟수

또한 누적고장확률인 누적고장분포함수, $F(t)$ 는 정상작동 하는 시스템이 시간 t 에서 고장날 확률로 정의 되며 식(2)와 같다.

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N(t)} = \frac{N(t) - N_s(t)}{N(t)} \quad (2)$$

$$= 1 - \frac{N_s(t)}{N(t)} = 1 - R(t)$$

누적고장분포함수는 불신뢰도함수로 표현하기도 하며, 이는 불신뢰도함수와 신뢰도함수의 관계는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (3)$$

어떤 시간, t 에서 단위시간당 고장확률을 나타내는 고장확률밀도함수 $f(t)$ 는 누적분포함수 $F(t)$ 를 미분하여 얻을 수 있다(식(4)).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

식(3)을 미분하고 식(4)를 식(3)에 대입하면 고장확률밀도와 신뢰도함수와의 관계식은 식(5)로 표현되며,

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

신뢰도함수 $R(t)$ 는 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \int_t^\infty f(x) dx \quad (6)$$

2.2. 직렬시스템

직렬시스템이란 어느 한 부품만 고장 나도 전체 시스템이 고장 나는 시스템을 말한다. 즉 시스템의 정상적으로 작동하기 위해서는 모든 서브시스템들이 정상적으로 작동해야 함을 의미한다. 직렬시스템은 가장 흔히 접할 수 있는 유형의 시스템으로 각 부품의 신뢰도가 R_1, R_2, \dots, R_n 인 직렬시스템의 신뢰성 블록도는 Fig. 1과 같다.[5]

이 시스템의 신뢰도는 부품 1이 고장 나지 않아야 되고, 부품 2가 고장이 나지 않고, 부품 n까지 고장이 나지 않을 확률이다. 즉 n개의 부품 전부가 고장이 나지 않아야 시스템이 정상작동 되는 시스템이다. 부품들의 고장이 상호 독립이면 이 직렬시스템 신뢰도는 수학적으로 식(7)과 같이 표현된다.

$$R_s = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (7)$$

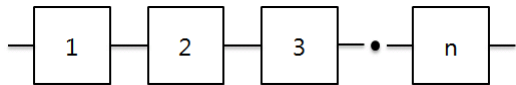


Fig. 1. Series System.

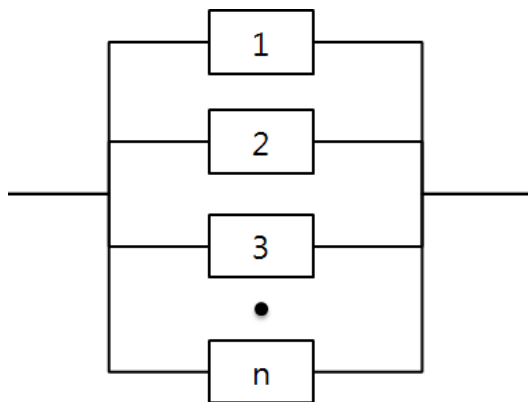


Fig. 2. Parallel system.

2.3. 병렬시스템

하나의 부품만 작동해도 전체가 작동하는 구조의 모델을 병렬시스템이라 한다. 이는 모든 부품이 모두 고장이 났을 때에만 시스템의 고장이 발생하는 시스템이다. 따라서 병렬시스템이 성공하기 위해서는 시스템 내에 있는 부품 n개 중 적어도 한 개가 작동하기만 하면 된다. 병렬시스템의 신뢰성 블록도는 Fig. 2와 같다.

확률적으로 이 시스템의 불신뢰도 Q_p 는 모든 부품들이 고장날 확률, 즉 부품 1이 고장이 발생하고 부품 2도 고장이 발생하여 계속하여 부품 n까지도 고장이 날 확률이므로 신뢰도는 식(8)으로 계산된다.

$$R_p = 1 - Q_p \quad (8)$$

수학적으로 이러한 병렬 시스템의 불신뢰도는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_p = Q_1 \cdot Q_2 \dots Q_n \quad (9)$$

그리고 부품들의 고장이 상호독립이면 시스템 신뢰도 R_s 는 식(10)과 같이 표현된다.

$$R_s = 1 - Q_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (10)$$

2.4. k-out-of-n 시스템

시스템이 동일한 n개의 설비들로 구성되어 있고 그 중에 k개 이상이 작동할 때만 시스템이 정상 작동하는 구조로 n 중 k시스템(k-out-of-n system)이라 부른다. 단, 이 시스템은 동일한 설비들로 각각의 독립적으로 작동하는 경우에만 적용이 가능하다. 모든

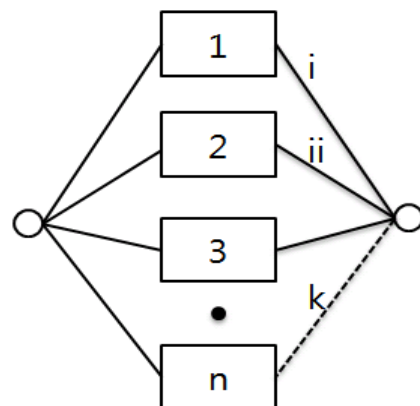


Fig. 3. k-out-of-n system.

설비의 신뢰도가 R_0 로 똑같다면 k-out-of-n 시스템의 블록도는 Fig. 3과 같고, 신뢰도 R_S 는 식(11)이 된다[6].

$$R_S = \sum_{x=k}^n \binom{n}{x} R_0^x (1-R_0)^{n-x} \quad (11)$$

III. RBD 행렬을 이용한 신뢰도 예측

3.1. RBD(Reliability Block Diagram)

RBD는 분석할 에너지시설의 시스템, 설비, 부품 등의 집합까지를 블록으로 표현한다. 블록들은 공정의 흐름에 따라 선으로 연결하여 블록 간의 관계를 표시한다. RBD를 작성할 때는 왼쪽에서 하나의 입력 노드에서 출발하여 여러 블록을 거쳐서 하나의 출력 노드로 도착하게 해야 한다. 각각의 블록들의 관계에 따라 직렬, 병렬, k-out-of-n과 같은 경로로 구성하게 된다. RBD는 복잡한 시스템을 단순화하여 시스템의 구조를 블록다이어그램으로 표현하고, 각 블록의 고유 고장률을 근거로 하여 시스템 경로에 따른 수학적 모델에 적용하여 시스템의 고장률을 계산하는데 사용된다. 여러 구성요소로 이루어져 있는 시스템, 설비 등의 고장률을 평가하는데 사용되며, 해당 시스템의 신뢰도, 가용도를 평가하는데 매우 편리하다. 또한 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis), FTA

Table 1. Example of RBD array

종료노드 \ 시작노드	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0
5	0	1	1	1	0

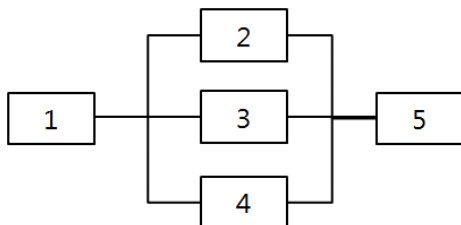


Fig. 4. Example of RBD.

(Fault Tree Analysis)과 같은 정량적 해석 결과를 확인하는데도 사용이 가능하다.

3.2. RBD 행렬

이 연구에서는 공정을 단순화한 RBD를 인접행렬을 이용하여 표현할 것이다. 인접행렬이란 행렬의 성분을 기본적으로 '1'과 '0'의 두 값을 갖는 것이다. 인접행렬 A의 i행 j열의 성분을 a_{ij} 라 한다면, a_{ij} 는 노드 i와 노드 j가 연결되어 있으면 '1', 서로 연결되어 있지 않으면 '0'으로 정의하고, 따라서 인접행렬 A는 n차 사각행렬이 된다[7].

전체 시스템을 구성하는 설비들의 수가 n 개라면 시작과 종료 노드를 포함하여 설비의 인덱스는 1, 2, 3, ..., n+2이며 시작노드를 1로 하고 종료 노드를 n+2으로 표현한다. Fig. 4과 같은 RBD가 존재한다면 각 설비의 연결 상태를 나타내는 행렬은 Table 1와 같이 나타난다.

3.3. 신뢰도 경로행렬

신뢰도 경로행렬이란 어떠한 시스템의 RBD를 인접행렬로 나타내었을 때 시스템이 정상으로 작동할 수 있는 경로를 나타낸 것이다. RBD행렬을 이용하여 각각의 설비의 흐름경로를 행렬로 전개하여 모든 행 성분에 종료 노드로 연결될 때까지 전개해 나가는 방식으로 RBD 대한 신뢰도 경로 행렬을 구한다. 이러한 경로가 하나 이상 존재한다면 시스템을 정상으로 판정하고, 경로가 하나라도 존재하지 않는다면 시스템은 고장으로 판정한다.

초기에 신뢰도 경로 행렬은 시작노드인 1의 인덱

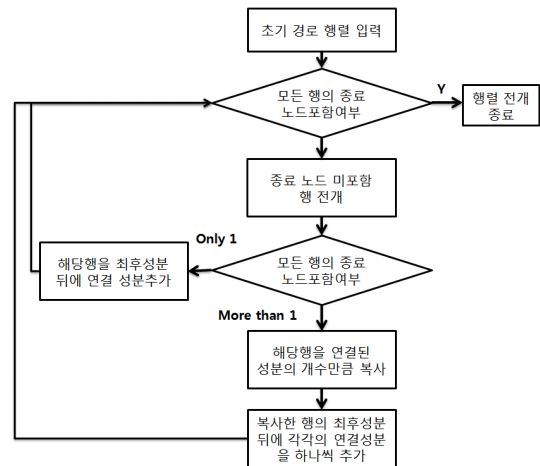


Fig. 5. The flow chart of reliability path array expansion algorithm.

Table 2. Example of failure enumeration array

Sub system					system
1	2	3	4	5	
S	S	S	S	S	S
S	F	S	S	S	S
S	S	F	S	S	S
S	S	S	F	S	S
S	S	F	F	S	S
S	F	F	S	S	S
S	F	S	F	S	S

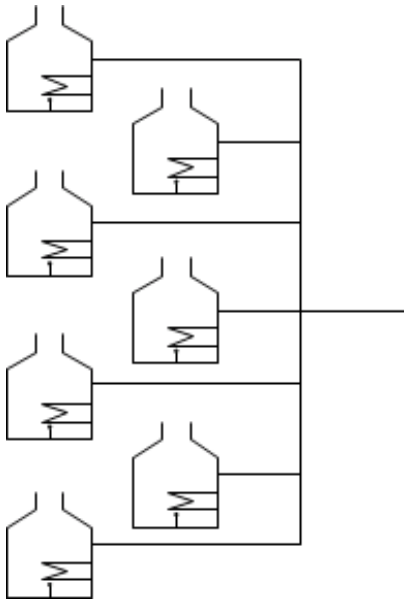


Fig. 6. The heaters of cracking section

스를 갖는 1×1의 행렬로 구성된다. 이 행렬의 경우 종료 노드인 n+2의 성분을 포함하지 않기 때문에 계속 행렬 전개가 이루어진다. 행렬 전개 시 RBD 행렬을 이용하여 각 행의 최후 설비에서의 다음 연결 설비를 탐색한다. 확인한 연결 설비의 수가 1개를 초과할 경우에는 탐색한 연결 설비 중 첫 번째 연결 설비는 해당 행의 최후 설비 다음에 위치하도록 하고, 두 번째 이후 연결된 설비는 행렬의 최후 행에 탐색중인 설비의 행을 복사하고 최후 설비에 탐색한

연결 설비를 위치시킨다. 이러한 방식으로 신뢰도 경로 행렬을 전개하며 모든 경로 행에서 종료 설비가 나타날 때 까지 반복한다[7].

3.4. 고장 판정 행렬

고장 판정 행렬이란 시스템을 구성하는 모든 서브시스템들에 대하여 어떤 상황 하에서 시스템의 고장 여부를 나타내는 행렬로 정의한다. 서브시스템은 정상 또는 고장에 해당되는 상황만 가진다. 시스템을 구성하는 모든 서브시스템들이 서로 다른 경우의 조합으로 가질 수 있는 경우의 수는 서브시스템의 수를 n이라고 할 때 2ⁿ가 된다. 이 경우의 수 조합을 가지고 신뢰도 경로 행렬에 적용하여 시스템이 정상인 경우 S, 고장일 경우 F으로 나타내어 행렬화할 수 있고, 이 행렬을 고장 판정 행렬이라고 정의한다[8]. 시스템의 Fig.4의 고장열거행렬은 Table 2로 표현할 수 있다.

3.5. 신뢰도 계산

RBD를 구성하고 있는 모든 설비에 대하여 서로 다른 경우의 조합으로 가질 수 있는 경우의 수 조합을 구하고, 각각 정상운전상태와 고장상태로 나누어 열거하여 행렬을 완성한다. 모든 설비의 경로에 대하여 고장 경로 행렬을 제외함, 시스템이 성공적으로 작동할 수 있는 경로로 구성된 신뢰도 정상 경로 행렬을 구성한다. 각 행렬의 성분에 “1”일 경우에는 신뢰도를, “0” 일 경우에는 고장도를 기입하여 계산을 한다. 또한 각 행의 신뢰도 합을 통하여 시스템 신뢰도를 계산한다.

IV. Case study

4.1. NCC cracking process

NCC공정은 납사, 경유, 에탄 등을 주원료로 하여 분해로에서 열분해시킨 후 급냉, 압축, 정제 등의 공정을 통해 석유화학의 기초원료인 에틸렌, 프로필렌 등을 생산하는 공정이다. NCC공정은 크게 cracking, quench, compressor, purification 공정으로 나눌수 있다. 이 연구에서는 k-out-of-n 시스템을 적용할 수 있는 cracking 공정을 대상으로 하였다.

Cracking 공정은 원료를 고온에 의한 열분해 반응을 통해 여러 종류의 탄화수소화합물을 생성시키며, heater출구에서 열을 회수하여, 초고압 증기 생산한다. Heater의 경우 7기가 설치되어 있으며 6기 운전을 하고, 1기는 유지보수 등의 이유로 운전하지 않는다. 즉, heater는 6-out-of-7 시스템의 구조로 운전을 한다.

4.2. RBD 행렬

6-out-of-7 시스템은 7개의 설비 중에 6개 이상의 설비가 가동이 되어도 시스템이 정상작동되는 공정이다. 7개의 heater가 모두 작동을 해도 시스템은 "S"로 표현하고 하나의 heater가 고장 또는 정비 등으로 작동을 하지 않아도 시스템은 "S"로 표현한다. 이 시스템의 고장관정 행렬은 Table 3와 같다.

4.3. 시스템 신뢰도 계산

이 설비의 고장률이 0.001054(회/시간)이고 100 시간동안 설비의 신뢰도는 0.9이다. 먼저 식(11)에 6-out-of-7 시스템으로 계산을 하면 이 시스템의 신뢰도는 0.8503으로 예측된다.

$$R_s = \sum_{x=6}^7 \binom{7}{x} (0.9)^x (1-0.9)^{7-x}$$

$$= \binom{7}{6} (0.9)^6 (1-0.9)^1 + \binom{7}{7} (0.9)^7 (1-0.9)^0$$

$$= 0.8503$$

고장관정 행렬을 이용하여 계산할 경우에는 Table 3과 같다. 이 연구에서는 신뢰도 경로행렬을 이용하여 k-out-of-n 시스템의 신뢰도를 분석한 결과와 서로 같음을 확인할 수 있다.

V. 결론

화학공정에서 k-out-of-n의 구조로 이루어진 시스템을 RBD로 표현하여 설비간의 연결구조에 대하여 쉽게 분석할 수 있게 하였다. 시스템의 연결구조를 파악하여 공정의 흐름을 분석하여 신뢰도 경로행렬 구성하였으며, 시스템의 신뢰도를 분석하였다. 이는 기존의 k-out-of-n 시스템을 신뢰도 분석 방법과 같은 결과를 얻음으로써 신뢰도 경로행렬을 이용한 방법이 k-out-of-n 시스템에 적용 가능성을 보여주었다.

기존의 k-out-of-n 시스템을 신뢰도 분석 방법의 경우 각각의 설비가 같은 고장률을 가지고 있을 경우에는 계산의 어려움이 적지만, 만일 각각의 설비별로 고장률이 다를 경우에는 n개 중에 k개를 구성하는 결함을 전부 구한 다음 각각의 고장률을 이용하여 계산을 해야 하는 어려움이 있다. 신뢰도 경로행렬을 이용할 경우에는 각각의 열에 고장률을 변경하여 계산하면 쉽게 신뢰도 분석이 가능하다. 본 연구에서는 신뢰도 경로행렬을 이용하여 각각의 고장

Table 3. Cracking process of failure enumeration array

Sub system							system
1	2	3	4	5	6	7	
S	S	S	S	S	S	S	S
F	S	S	S	S	S	S	S
S	F	S	S	S	S	S	S
S	S	F	S	S	S	S	S
S	S	S	F	S	S	S	S
S	S	S	S	F	S	S	S
S	S	S	S	S	F	S	S
S	S	S	S	S	S	F	S

Table 4. Result of the system reliability calculation

Sub system							system	Probability
1	2	3	4	5	6	7		
S	S	S	S	S	S	S	S	0.9×0.9×0.9×0.9×0.9×0.9×0.9=0.478297
F	S	S	S	S	S	S	S	0.1×0.9×0.9×0.9×0.9×0.9×0.9=0.053144
S	F	S	S	S	S	S	S	0.9×0.1×0.9×0.9×0.9×0.9×0.9=0.053144
S	S	F	S	S	S	S	S	0.9×0.9×0.1×0.9×0.9×0.9×0.9=0.053144
S	S	S	F	S	S	S	S	0.9×0.9×0.9×0.1×0.9×0.9×0.9=0.053144
S	S	S	S	F	S	S	S	0.9×0.9×0.9×0.9×0.1×0.9×0.9=0.053144
S	S	S	S	S	F	S	S	0.9×0.9×0.9×0.9×0.9×0.1×0.9=0.053144
S	S	S	S	S	S	F	S	0.9×0.9×0.9×0.9×0.9×0.9×0.1=0.053144

를이 다른 설비들이 다양한 연결구조의 시스템 신뢰도를 분석하는데 적용이 가능함을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전 연구단”의 연구 결과입니다.

(세부과제번호: 2010201010095C-21-1-000)

참고문헌

- [1] Byeong-Suk Song, Jai-Rip Cho, “Application of Industrial Reliability Technology to Nation Defense Field”, International journal of reliability and applications, Vol. 8, No. 2, pp. 61-73 (2008)
- [2] Epstein, B., and Sobel, M., “Life Testing”, Journal of the American Statistical Association”, Vol. 48, pp. 485-502 (1953)
- [3] Misra, K. B., and Rao, T. S. M., “Reliability Analysis of Redundant Network Using Flow Graphs”, IEEE Trans. on. Reliability, Vol. R-19, No. 1, pp. 19-24 (1970)
- [4] Aggarwal, K. K., Misra, K. B. and Gupta, J. S., “A Fast Algorithm for Reliability Evaluation”, IEEE Trans. on Reliability, Vol. R-24, No. 1, pp. 83-85 (1975)
- [5] Kim Won Kyoung, “Reliability Engineering”, Kyo-woo, (2001)
- [6] The Korean Reliability Society, “A Study on the Unification and Standardization of Military and Commercial Reliability-Related Specifications” (2008)
- [7] Youngtak Son, Hyunjun Kim, Myungwon Suh, “A Study on the Reliability Assessment of Complex System using Monte Carlo Simulation”, The Korean Society of Automotive Engineerings, pp. 1306-1310 (2009)
- [8] K. J. Park, J. D. Chung, Y. T. Son, M. W. Suh, “Study on a Reliability Calculation Method using Simulation for the Urban Transit Vehicle”, Korean Society for Precision Engineering, 2010 Spring Conference, pp. 1485-1486 (2010)