

다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도 분석

(Reliability analysis of multi-state parallel system with a multi-functional standby component)

김 동 현¹⁾, 이 석 훈²⁾, 임 재 학^{3)*}

(Dong-Hyeon Kim, Suk-Hoon Lee, and Jae-Hak Lim)

요 약 중복시스템의 일반적인 구조는 기능을 수행하는 주요부품과 주요부품이 고장 나는 경우에 그 기능을 대신 수행하는 대기부품으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 하나의 대기부품이 여러 개의 주요부품의 기능을 동시에 대신 수행할 수 있는 다기능 대기부품을 갖는 병렬시스템을 고려한다. 이 시스템을 구성하고 있는 모든 부품들은 작동상태와 고장상태만 갖는 반면 시스템은 구성 부품들의 상태에 따라 다중 상태를 갖는 것을 가정한다. 이러한 중복구조는 항공기와 같이 시스템의 중량이 중요한 요소인 시스템에서 많이 채택되고 있는 구조이다. 본 연구에서는 이와 같은 중복시스템의 신뢰도를 평가하기 위한 새로운 신뢰도모델링 기법을 제안하고 부품들이 상수고장률을 갖는 경우 마코프 분석 방법을 적용하여 시스템의 신뢰도를 구한다. 또한 본 연구에서 고려하고 있는 시스템과 기존에 이미 알려진 병렬시스템과 중복구조를 갖는 병렬시스템의 신뢰도를 비교하여 다기능 대기부품의 효과를 분석한다.

핵심주제어 : 신뢰도, 다기능 대기부품, 다중상태 시스템, 마코프분석, 상수 고장률

Abstract A redundant structure typically consists of primary component and standby component taking over the function of the primary component when the primary component fails. In this research, we consider a redundant structure in which a standby component can take over the function of more than one primary component when primary components fail. And we assume that the system has multi-state according to the states of components while all components have two states. This system is called as the multi-state redundant system with a multi-functional standby component. This type of redundant structure is frequently adapted by the system such as an aircraft in which the weight is an important design factor. In this paper, we propose new reliability model for this multi-state redundant system with a multi-functional standby component in order for evaluating the reliability of the system. Under the assumption that all components have constant failure rate, we evaluate the reliability of the system by applying Markov analysis method. And we investigate the effect of the multi-functional standby component by comparing reliabilities of the parallel system with

* Corresponding Author : jlim@hanbat.ac.kr

Manuscript received June 13, 2015 / revised July 30, 2015 /
accepted August 20, 2015

1) 충남대학교 정보통계학과, 제1저자
2) 충남대학교 정보통계학과, 제2저자
3) 한밭대학교 경영회계학과, 교신저자

multi-functional standby component and a simple parallel system and a parallel system with redundant structure.

Key Words : Reliability, Multi-functional standby component, Multi-state system, Markov analysis, Constant failure rate

1. 서 론

신뢰도란 부품이나 시스템이 주어진 작동조건 하에서 규정된 기간 동안 의도된 기능을 수행할 확률을 의미한다.

오늘날 시스템들의 성능 요구서는 일반적으로 신뢰도 목표에 대한 사항을 포함하고 있다. 따라서 시스템의 설계나 개발과정에서 시스템의 신뢰도를 예측하거나 또는 개발 후에 시스템의 신뢰도를 평가하는 업무가 중요한 업무 중의 하나로 부상하고 있다. 그러나 시스템의 개발에 필요한 공학 분야의 기술이 점점 발전됨에 따라 새로운 구조의 시스템이 등장하고 있으며 시스템의 구조가 점점 더 복잡해지고 있다. 이에 따라 시스템들의 신뢰도를 평가하는 업무도 점점 더 복잡하고 어려워지고 있다.

시스템의 신뢰도는 산업체의 생산시스템 뿐만 아니라 발전소, 항공 및 우주산업분야 그리고 군의 무기체계 등에서 중요하게 다루어지고 있다. 시스템의 고장은 지상에서 운용되는 장비보다 공중에서 운용되는 장비에 더 치명적인 영향을 미친다. 따라서 항공기나 우주탐사 위성 등과 같은 시스템들은 아주 높은 신뢰성을 갖추어야 하며 이를 위하여 중복구조를 많이 채택하고 있다. 그러나 항공기나 우주 탐사선과 같은 시스템들은 규정된 중량을 유지하여야 하므로 시스템을 개발하는 과정에서 일정수준의 신뢰도와 중량이라는 두 가지 목표를 만족시켜야 하며 이를 위하여 다양한 중복구조를 채택하고 있다.

가장 기본적인 중복구조를 갖는 시스템의 신뢰도 분석에 대한 연구는 MIL-HDBK-338B[1], Nakagawa and Osaki[2] 및 Naidu and Gopalan[3]이 고려한 2개의 부품들을 갖는 대기중복시스템 모형이다. 이 시스템은 주요부품이

고장 나면 작동되는 대기부품과 주요부품 1개가 쌍을 이루고 있는 시스템이다. Azaron et al[4]은 여러 개의 서로 다른 수리불가능 유니트로 구성된 비작동 대기 중복시스템의 신뢰도 평가방법을 연구하였다. 각 각의 유니트들은 얼랑(Erlang)분포를 갖는 부품들로 구성되어 있다고 가정하였다. El-Damcese and Helmy[5]는 비작동대기(cold standby)부품과 반작동대기(warm standby)부품을 갖는 시스템들에 대한 신뢰도를 연구하였다. 이 연구에서는 대기부품의 유형을 혼합한 시스템을 고려하고 있다. Manglik and Ram[6]은 단일 부품을 갖는 3개의 서브시스템들과 2개의 비작동대기부품들을 갖는 1개의 서브시스템을 설정하여 직렬로 연결된 4개의 서브시스템들을 갖는 시스템의 신뢰도를 연구하였으며 Azaron et al[4]이 고려한 시스템에 직렬구조를 혼합한 시스템에 대한 연구이다. Lim[7]은 제어 모듈이 있는 중복구조를 고려하고 절체확률의 추정에 관한 연구를 하였다. Yang[8]은 개발단계에 있는 소프트웨어 시스템의 신뢰도에 대한 연구를 하였으며 Joe[9]는 결점나무에서 불확실성 중요도 측도를 실험적인 방법을 이용하여 평가하기 위한 방법을 제안하였다. Yoon et al[10]은 다기능 복합시스템에 대한 신뢰도와 정비도의 시뮬레이션 기반 설계 연구에서 이론적인 방법이 아닌 시뮬레이션 기법을 이용하여 대상 시스템의 신뢰도를 평가하였다. 이 시스템은 총 43개의 부품들로 구성되어 있고 서브시스템 간에는 대기구조로, 서브시스템 내의 부품 간에는 n중 k구조로 되어있다. 그러나 이 시스템 또한 2개의 부품들을 갖는 대기중복시스템을 여러 개 결합한 시스템이다.

한편 이러한 중복시스템의 신뢰도를 구하는 방법에 관한 여러 연구들이 있다. Hassett et al[11]

은 시스템의 신뢰도를 구하기 위하여 마코프 체인(Markov chain)을 이용하여 1개의 부품이 2개의 상태들을 갖는 시스템과 2개의 부품들이 4개의 상태들을 갖는 시스템을 예시하였다. Sharifi et al[12]은 대기부품들의 개수가 n 개인 $(n+1)$ 개의 부품들을 갖는 중복시스템에 대한 신뢰도를 연구 하였다. 마코프체인과 상태방정식을 이용하여 시스템의 신뢰도와 평균고장시간(MTTF ; mean time to failure)을 구하였다.

위와 같이 기존의 많은 연구들은 하나의 주요 부품이 고장 날 때 하나의 대기부품이 작동되거나 하나의 주요부품이 고장 날 때 여러 개의 대기부품이 연속적으로 대체되어 작동되는 대기중복시스템의 신뢰도 평가에 관한 것들이다. 그러나 과학기술이 발달함에 따라 중복구조의 형태도 더 복잡하게 되고 있으며 기존에 제시된 방법으로는 이러한 중복구조를 갖는 시스템의 신뢰도를 평가할 수 없는 실정이다.

본 논문에서는 공중에서 운용되는 시스템이 갖고 있는 설계상의 한계를 극복하기 위한 중복구조를 고려하였다. 앞에서도 언급하였듯이 공중에서 운용되는 시스템은 설계과정에서 높은 수준의 신뢰도를 유지하고 중량을 최소화시켜야 한다는 두 가지 목표를 달성하여야 한다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 하나의 대기부품이 필요에 따라 여러 개의 주요부품의 기능을 수행할 수 있는 중복구조가 채택되고 있다. 이러한 대기부품을 다기능 대기부품이라 한다. 다기능 대기부품을 갖는 대표적인 시스템으로서 중형급 이상 항공기의 유압펌프시스템(hydraulic pump system)을 들 수 있다. 이 시스템은 2개의 주 유압펌프, 1개의 backup 펌프 및 기타 부품들로 이루어져 있다. backup 펌프는 대기상태에 있다가 주 유압펌프 중 하나 또는 둘 모두가 고장이 날 때 주 유압펌프가 수행하는 기능을 대신하며, 유압펌프가 아닌 또 다른 기타 부품이 고장 나더라도 그 기능을 대신한다. 따라서 backup 펌프를 다기능 대기부품이라 할 수 있다. 이러한 항공기들은 시스템이 매우 복잡하여 다기능 대기부품을 갖는 중복구조가 아닌 다른 형태의 중복구조로 설계된다면 규정된 중량이 초과될 수 있으므로 다기능 대기부품을 갖는 중복구조로 설계를 함으로써 높은

수준의 신뢰도와 낮은 중량이라는 목표를 달성할 수 있다.

한편 신뢰도의 정의를 보면 ‘주어진 작동조건’과 ‘의도된 기능’이라는 단어가 포함되어 있다. 즉 시스템이나 부품들은 하나 이상의 작동조건과 의도된 기능을 가지고 있다. 따라서 항공기 유압 펌프시스템, 유체흐름밸브, 전자 다이오드, 발전기, 그리고 에어컨 등과 같은 시스템의 신뢰도는 그 시스템과 부품들의 성능에 따라 달라진다. 그 시스템들은 부품들 중 하나 이상이 고장 나면 곧바로 시스템의 고장으로 이어질 수도 있지만, 시스템성능의 저하로 이어지면서 계속사용 가능상태가 될 수도 있다. 따라서 단계적으로 저하되는 시스템의 성능수준에 따라 시스템의 상태가 달라지며 이에 따라 시스템은 완전작동상태와 완전고장상태 사이에 다양한 상태가 있을 수 있다. Lisnianski et al[13]은 이러한 시스템을 다중상태시스템이라고 정의하였다. 가장 단순한 다중상태시스템은 2개의 성능수준 즉 완전한 작동과 완전한 고장을 갖는 이진시스템(binary system)이다. 많은 연구자들은 이러한 다중상태시스템의 신뢰도에 대한 연구를 수행하였다. Navig[14]은 해양전력발전시스템의 신뢰도 연구에서 3개의 상태를 갖는 부품과 2개의 상태를 갖는 시스템을 가정하여 신뢰도 분석을 실시하였다. Ram[15]과 Ali et al[16]은 시스템이 3개의 상태, 즉, 정상, 부분고장 및 완전고장상태를 갖는 시스템의 신뢰도를 연구하였다. El-Dancese and Temraz[17]는 시스템과 그 시스템의 부품들이 완전한 작동으로부터 완전한 고장까지의 사이에 또 다른 성능수준을 갖는다는 가정 하에 시스템의 가용도와 신뢰도를 분석하였다. Lisnianski et al[13]은 시스템이 4개의 상태를 갖는 다중상태시스템의 신뢰도를 마코프 모형을 이용하여 신뢰도를 구하였다.

본 연구에서는 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도를 평가하기 위한 신뢰도 모델링 기법을 제안하고 이를 바탕으로 부품이 상수 고장률을 갖는다고 가정하고 마코브 분석 기법을 이용하여 시스템의 신뢰도를 구하였다. 또한 다기능 대기부품의 효과를 분석하기 위하여 대기부품이 없는 병렬시스템과 주요부품이 모두 대기부품을 갖는 중복구조의 병렬시스템의 신뢰

도와 비교를 실시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 구조와 특징을 알아보고 다중상태시스템의 신뢰도를 정의한다. 3장에서는 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도를 분석하고, 4장에서는 대기부품이 없는 병렬시스템과 주요부품이 모두 대기부품을 갖는 중복구조의 병렬시스템의 신뢰도를 분석한다. 5장에서는 고려하고 있는 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템에서 다기능 대기부품의 효과를 분석한다.

본 논문에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

- m : 부품의 수
- k : 성능수준의 수
- X_i : 부품 i ($i=1,2,\dots,m$)
- λ_i : 부품 i 의 고장률 ($i=1,2,\dots,m$)
- $X(t)$: t 시점에서 시스템의 상태
- g_j : 시스템의 성능수준 ($j=1,2,\dots,k$)
여기서, $g_k > g_{k-1} > \dots > g_2 > g_1$
- $G(t)$: t 시점에서 시스템의 성능수준
 $G(t) \in \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$
- $p_j(t)$: $P[G(t) = g_j]$, t 시점에서 시스템의 성능수준이 g_j 일 확률 ($j=1,2,\dots,k$)
- $P(t)$: 상태확률벡터
- $P^T(t)$: 상태확률 전치벡터
- A : 상태전이행렬
- $R_w(t)$: 시스템의 요구성능수준(w)에 대한 신뢰도
- $R_j(t)$: 시스템의 요구성능수준(w)이 g_j 인 경우 신뢰도 ($j=1,2,\dots,k$)
- RBD : 신뢰성블럭도 (reliability block diagram). 시스템의 기능을 수행하는 부품들의 논리적 연결 그림

2. 다기능 대기부품을 갖는 다중상태시스템

2.1 시스템의 구조와 특징

본 논문에서 고려하고 있는 시스템은 다기능 대기부품을 갖는 병렬시스템으로 병렬로 연결된 2개의 주요부품과 1개의 다기능 대기부품으로 이루어져 있다. 다기능 대기부품을 갖는 병렬시스템의 실제 사례는 항공기의 유압펌프시스템에서 찾아볼 수 있다. Fig. 1은 항공기 유압펌프시스템의 구조를 보여주고 있다.

이 시스템의 펌프들은 동일한 압력을 생성하며 상호 교환이 가능한 부품들이다. 먼저 펌프 1과 2는 연결된 동력원에 의하여 작동되고 펌프 1은 왼쪽 부품(A, B 및 C)에, 펌프 2는 오른쪽 부품(D, E 및 F)에 저유기와 전환밸브를 거쳐 유압을 공급함으로써 시스템이 작동되도록 한다. 이때 대기펌프는 비작동대기상태에 있다. 펌프 1과 2중 하나가 고장 나거나 또는 두 펌프가 모두 고장 나면 대기펌프는 연결된 동력원에 의해 작동되고 대기펌프의 전환밸브 및 펌프 1과 2의 전환밸브를 거쳐 왼쪽 부품(A, B 및 C)과 오른쪽 부품(D, E 및 F)에 유압을 공급함으로써 시스템이 작동되도록 한다. 따라서 대기펌프는 펌프 1과 펌프 2의 기능을 모두 수행할 수 있는 다기능 대기부품의 특징을 갖는다.

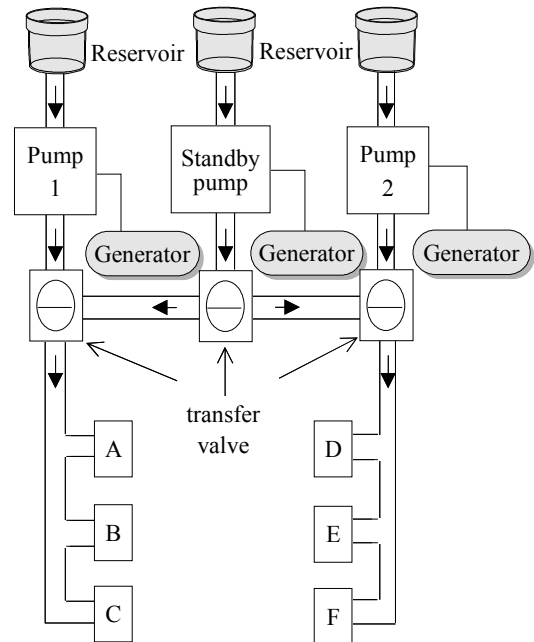


Fig. 1 Structure of general multi-functional standby system

고려하고 있는 시스템은 펌프들이 모두 고장 나지 않으면 최상의 성능수준으로 작동되지만, 펌프들의 고장으로 인해 왼쪽 부품(A, B 및 C)이나 오른쪽 부품(D, E 및 F)에 정상적인 유압이 공급되는지에 따라 시스템의 성능수준은 달라진다. 그러나 모든 펌프가 고장 나면 부품 A로부터 부품 F까지 모두 작동 되지 않으므로 최악의 성능수준 즉 시스템의 고장상태에 이르게 된다. 따라서 이 시스템은 다중상태를 갖는 시스템이 된다.

2.2 다중상태시스템의 신뢰도 정의

Lisnianski et al[13]은 다중상태시스템의 신뢰도를 다음과 같이 정의하였다. 어떤 시스템이 k개의 성능수준을 갖는 경우 어떤 시점 t에서 시스템의 성능수준 $G(t)$ 는 $g = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 로부터 값을 취하며 시간구간 $[0, T]$ 에서의 시스템의 성능은 확률과정이 된다. 또한 t시점에서 시스템의 상태 $X(t)$ 는 그 시점에서의 시스템의 성능수준 $G(t)$ 에 따라 결정되므로 만일 $G(t) = g_j$ 이라면 $X(t) = j (j = 1, 2, \dots, k)$ 가 된다. 따라서 t시점에서 시스템의 성능수준이 g_j 일 확률 $p_j(t)$ 는 그 시점에서 시스템의 상태가 j일 확률과 같다. 즉 $t \geq 0$ 에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_j(t) = P[X(t) = j] = P[G(t) = g_j], \quad (1)$$

단, $j = 1, 2, \dots, k$ 이다. $\sum_{j=1}^k p_j(t) = 1$ 이다.

만일 시스템의 요구성능수준 w 가 $g_{j-1} < w \leq g_j$ 라면 t시점에서의 시스템의 성능 $G(t)$ 이 $\{g_1, g_2, \dots, g_{j-1}\}$ 에 속한다면 시스템이 요구성능수준을 만족시키지 못하는 상태이며 $\{g_j, g_{j+1}, \dots, g_k\}$ 에 속한다면 요구성능수준을 만족시키는 상태가 된다. 따라서 요구성능수준 w 가 $g_{j-1} < w \leq g_j$ 인 경우 t시점에서 시스템의 신뢰도는 시스템이 요구하는 성능수준을 만족시킬 수 있는 확률로 정의되며 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$R_w(t) = P[G(t) > w] = \sum_{j=n}^k p_j(t), \quad (2)$$

단, $n = 2, 3, \dots, k$.

3. 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도

3.1 신뢰도 모델링 및 다중상태 신뢰도

본 절에서는 다기능 대기부품을 갖는 병렬시스템의 신뢰도 모델링 기법을 제안한다. 본 논문에서 고려하고 있는 시스템은 Fig. 1에 있는 유압 펌프 시스템과 같이 2개의 주요부품들이 병렬로 연결되어 있고 1개의 다기능 대기부품을 가지고 있는 구조이다. 이 시스템을 RBD로 표현하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

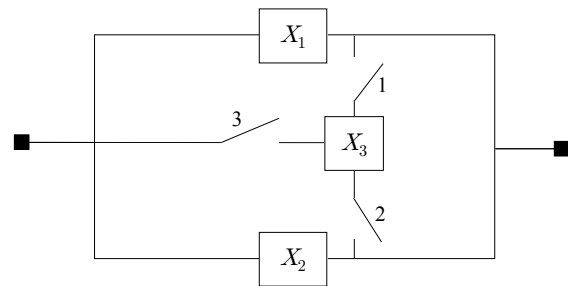


Fig. 2 RBD of the parallel system with multi-functional standby component

Fig. 2에서 X_1 과 X_2 는 주요부품이고 X_3 는 다기능 대기부품이다. X_1 과 X_2 는 동일한 부품이지만 서로 다른 기능을 수행하고 있다.

Fig. 2에서 주요부품 X_1 이 고장 나면, 1번과 3번 스위치가 연결되어 다기능 대기부품 X_3 이 X_1 의 기능을 수행하게 된다. 주요부품 X_2 가 고장 나면, 2번과 3번 스위치가 연결되어 다기능 대기부품 X_3 이 X_2 의 기능을 수행하게 된다. 또한 주요부품 X_1 과 X_2 가 둘 다 고장 나면, 1번, 2번, 3번 스위치가 모두 연결되어 다기능 대기부품 X_3 이 X_1 과 X_2 의 기능을 수행하게 된다. 또한 주요부품 X_1 과 대기부품 X_3 이 고장 나거나

주요부품 X_2 와 대기부품 X_3 이 고장 나는 경우에도 시스템은 부분적으로 기능을 수행하게 된다.

고려하고 있는 시스템의 상태는 Fig. 1에 있는 유압펌프시스템의 성능수준에 따라 다음과 같이 정의된다. 성능수준은 g_4 는 가장 양호한 상태로 2개의 유압펌프가 모두 고장 나지 않고 왼쪽 부품(A, B 및 C)과 오른쪽 부품(D, E 및 F)에 완전한 유압이 공급된 상태에서 작동되는 상태이다. 성능수준 g_3 은 1개의 주 유압펌프가 고장 나서 대기 유압펌프가 주 유압펌프의 기능을 수행하는 상태이다. 이 경우 왼쪽 부품(A, B 및 C)과 오른쪽 부품(D, E 및 F)에 모두 유압이 공급되지만 시스템 전체 차원에서는 성능이 저하된 상태가 된다. 성능수준 g_2 는 주 유압펌프 1개만 작동하여 왼쪽 부품(A, B 및 C)과 오른쪽 부품(D, E 및 F) 중에 어느 한쪽에만 유압이 공급되거나 대기 유압펌프만 동작하고 있어 양쪽 부품에 완전한 유압이 공급되지 않은 상태를 나타낸다. 모든 유압펌프가 고장이라면 시스템이 완전한 고장상태가 되며 이를 성능수준 g_1 로 나타낸다.

따라서 시스템의 요구성능수준 w 가 $g_{j-1} < w \leq g_j$ ($j = 2, 3, 4$)인 경우 시점 t 에서의 신뢰도는 식 (3)과 같이 된다.

$$R_w(t) = 1 - \sum_{i=1}^{j-1} p_i(t) = \sum_{i=j}^4 p_i(t), \quad (3)$$

단, $j = 2, 3, 4$.

또한 $j = 2, 3, 4$ 에 대하여 요구성능이 j 번째 성능수준과 일치한다면, 즉, $w = g_j$ 이라면 시점 t 에서의 신뢰도는 다음의 식 (4)과 같이 표현될 수 있다.

$$R_j(t) = 1 - \sum_{i=1}^{j-1} p_i(t) = \sum_{i=j}^4 p_i(t), \quad (4)$$

단, $j = 2, 3, 4$.

3.2 신뢰도 분석

시스템의 신뢰도를 분석하기 위하여 다음과 같이 가정한다. 주요부품과 대기부품은 동일한 부

품이며 동일한 기능을 수행한다. 부품들의 고장률은 λ 로 일정하고 독립적으로 고장이 발생한다. 동시에 2개 이상의 부품이 고장 나지 않으며 고장 나면 수리가 불가능하다. 부품들은 2개의 상태, 즉 완전한 작동과 완전한 고장상태를 갖는다. 대기부품은 주요부품이 고장 나기 전까지는 작동하지 않는 비작동대기상태로 대기하고 있다. 즉, 대기상태에 있는 대기부품의 고장률은 0이다. 스위치와 선로는 완전하다고 가정한다.

2.2절에 있는 시스템의 고장상태에 대한 정의 및 시스템의 RBD를 바탕으로 부품의 상태에 따른 시스템의 상태를 정리하면 Table 1에 나타난 바와 같다. Table 1에서 W는 작동상태, F는 고장상태, 그리고 SB는 비작동대기상태를 나타낸다.

Table 1 Table of the system states

State No.	Component			System		
	X_1	X_2	X_3	State	g_j	$p_j(t)$
1	W	W	SB	W	g_4	$p_4(t)$
2	F	W	W	W	g_3	$p_3(t)$
3	W	F	W	W	g_3	$p_3(t)$
A	W	W	F	NA		
4	F	W	F	W	g_2	$p_2(t)$
5	F	F	W	W	g_2	$p_2(t)$
6	W	F	F	W	g_2	$p_2(t)$
7	F	F	F	F	g_1	$p_1(t)$

3.1절에서 설명했듯이 3개의 부품 중에 어느 한 부품이라도 동작하면 시스템은 작동상태이지만 시스템의 성능은 저하된다. X_1 과 X_2 가 동작하는 동안 X_3 는 비작동대기상태이므로 X_3 의 고장은 발생할 수 없으며, 따라서 상태 A는 일어날 수 없다. 상태 5는 다기능 대기부품 X_3 가 고장난 부품 X_1 과 X_2 의 기능을 동시에 수행하는 상태이므로 다기능 대기부품 X_3 가 두 부품의 기능을 완전하게 수행할 수 없다. 따라서 2.2절에 있는 다중상태시스템의 신뢰도 정의에 의해 시스템의 성능수준은 g_2 가 된다. Table 1의 시스템 상태를 바탕으로 상태천이도를 작성하면 Fig. 3

과 같이 된다.

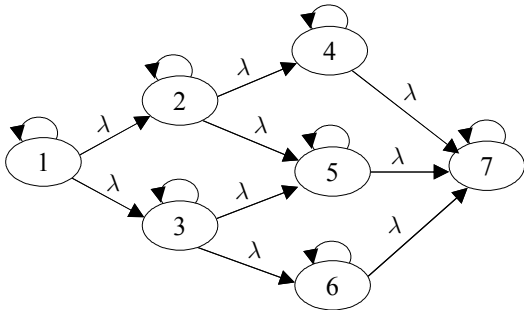


Fig. 3 State transition diagram of the system

Fig. 3의 상태천이도를 바탕으로 마코브 모형 방정식 $P'(t)^T = P(t)^T \cdot A$ 를 작성할 수 있으며 식 (5)과 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 A는 상태천이행렬이다.

$$\begin{aligned}
 & [P_1'(t) \ P_2'(t) \ \dots \ P_7'(t)] \\
 & = [P_1(t) \ P_2(t) \ \dots \ P_7(t)] \cdot \\
 & \begin{bmatrix} -2\lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\lambda & 0 & \lambda & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\lambda & 0 & \lambda & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{5}
 \end{aligned}$$

식 (5)의 행렬식을 전개하면 식 (6)에서 (12)과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$P_1'(t) = -2\lambda P_1(t) \tag{6}$$

$$P_2'(t) = \lambda P_1(t) - 2\lambda P_2(t) \tag{7}$$

$$P_3'(t) = \lambda P_1(t) - 2\lambda P_3(t) \tag{8}$$

$$P_4'(t) = \lambda P_2(t) - \lambda P_4(t) \tag{9}$$

$$P_5'(t) = \lambda P_2(t) + \lambda P_3(t) - \lambda P_5(t) \tag{10}$$

$$P_6'(t) = \lambda P_3(t) - \lambda P_6(t) \tag{11}$$

$$P_7'(t) = \lambda P_4(t) + \lambda P_5(t) + \lambda P_6(t) \tag{12}$$

식 (6)에서 식 (12)까지의 방정식을 풀면 t시점에서 각 상태에 있을 확률을 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= e^{-2\lambda t} \\
 P_2(t) &= \lambda t e^{-2\lambda t}, \\
 P_3(t) &= \lambda t e^{-2\lambda t}, \\
 P_4(t) &= [1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_5(t) &= 2[1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_6(t) &= [1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_7(t) &= 1 - \sum_{i=1}^6 P_i(t). \tag{13}
 \end{aligned}$$

시스템의 요구성능수준(w)이 g_j ($j = 2, 3, 4$)인 경우 시스템의 신뢰도는 식 (4)와 같으며 이를 이용하면 각 요구성능수준에 대한 신뢰도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_4(t) = p_4(t) = P_1(t) = e^{-2\lambda t}. \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 R_3(t) &= p_3(t) + p_4(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) \\
 &= (1 + 2\lambda t)e^{-2\lambda t}. \tag{15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_2(t) &= p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) \\
 &= \sum_{i=1}^6 P_i(t) = [4 - (3 + 2\lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}. \tag{16}
 \end{aligned}$$

4. 비중복구조 및 중복구조 병렬시스템의 신뢰도

다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 효과를 분석하기 위해 대기부품을 갖지 않는 병렬시스템과 주요부품 모두 대기부품을 갖는 중복시스템을 고려하였다. 본 장에서도 3장과 동일한 가정을 적용하였다. 즉, 주요부품과 대기부품은 동일한 부품으로 동일한 기능을 수행하며 부품들의 고장률은 λ 로 일정하고 독립적으로 고장이 발생한다. 동시에 2개 이상의 부품이 고장 나지 않으며 고장 나면 수리가 불가능하다. 부품들은 2개의 상태, 즉 완전한 작동과 완전한 고장상태를 갖는다. 대기부품은 주요부품이 고장 나기 전까지는 동작을 하지 않는 비작동대기상태로 대기하고 있다.

4.1 비중복구조 병렬시스템의 신뢰도 분석

비중복구조 병렬시스템은 대기부품이 없으며 두 부품이 병렬로 연결된 구조이다. 본 연구에서는 비교의 목적으로 병렬시스템도 다중상태를 갖는 시스템으로 가정한다. 시스템의 상태는 3장에서 정의한 것을 따른다.

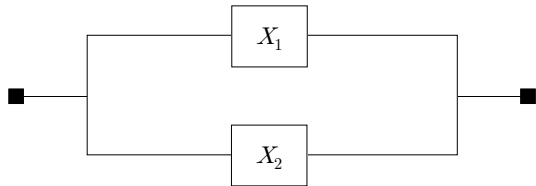


Fig. 4 RBD of parallel system

병렬시스템의 RBD는 Fig. 4와 같으며 부품의 상태에 따른 시스템의 상태는 Table 2에 나타난 바와 같다. 시스템의 RBD와 시스템 상태표를 이용하면 Fig. 5와 같은 상태천이도를 구할 수 있다.

Table 2 State table of parallel system

State No.	Component		System		
	X_1	X_2	State	g_j	$p_j(t)$
1	W	W	W	g_4	$p_4(t)$
2	W	F	W	g_2	$p_2(t)$
3	F	W	W	g_2	$p_2(t)$
4	F	F	F	g_1	$p_2(t)$

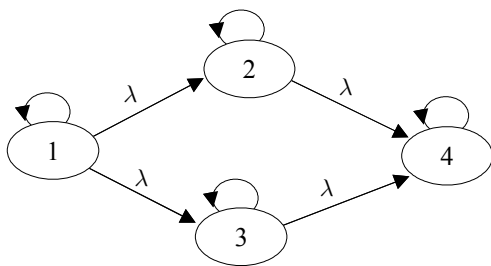


Fig. 5 State transition diagram of parallel system

주어진 요구성능수준에 대한 신뢰도는 3장에서와 같이 마코브 모형 방정식을 이용하여 구할 수 있으며 이를 이용하여 얻은 미분방정식은 식

(17)에서 식 (20)과 같다.

$$P_1'(t) = -2\lambda P_1(t). \tag{17}$$

$$P_2'(t) = \lambda P_1(t) - \lambda P_2(t). \tag{18}$$

$$P_3'(t) = \lambda P_1(t) - \lambda P_3(t). \tag{19}$$

$$P_4'(t) = \lambda P_2(t) + \lambda P_3(t). \tag{20}$$

3장과 동일한 방법으로 위의 미분방정식을 풀면 t시점에서 각 상태에 있을 확률을 구할 수 있으며 그 결과는 식 (21)과 같다.

$$P_1(t) = e^{-2\lambda t},$$

$$P_2(t) = (1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda t},$$

$$P_3(t) = (1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda t},$$

$$P_4(t) = 1 - \sum_{i=1}^3 P_i(t). \tag{21}$$

따라서 각 요구성능수준에 대한 신뢰도는 다음과 같이 된다.

$$R_4(t) = p_4(t) = P_1(t) = e^{-2\lambda t}. \tag{22}$$

$$R_3(t) = p_3(t) + p_4(t) = P_1(t) = e^{-2\lambda t}. \tag{23}$$

$$R_2(t) = p_2(t) + p_3(t) + p_4(t)$$

$$= P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)$$

$$= (2 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda t}. \tag{24}$$

4.2 중복구조 병렬시스템의 신뢰도 분석

중복구조 병렬시스템 (이하, 중복시스템)은 앞에서 고려한 다중상태시스템과 유사한 구조이나 다음과 같은 차이가 있다. 중복시스템에서는 각각의 주요부품에 대하여 대기부품을 배치하여 주요부품 고장 시 해당 대기부품이 그 기능을 수행하도록 하였다. 중복시스템도 다중상태시스템으로 시스템의 상태는 3장에서 정의한 것을 따른다. 중복시스템의 RBD는 Fig. 6과 같다.

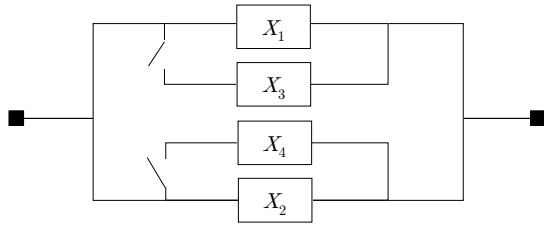


Fig. 6 RBD of redundant system

부품의 상태에 따른 시스템의 상태는 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table 3 State table of redundant system

State No.	Component				System		
	X_1	X_2	X_3	X_4	State	g_j	$p_j(t)$
1	W	W	SB	SB	W	g_4	$p_4(t)$
A	W	W	SB	F	NA		
B	W	W	F	SB	NA		
C	W	W	F	F	NA		
2	W	F	SB	W	W	g_4	$p_4(t)$
3	W	F	SB	F	W	g_2	$p_2(t)$
D	W	F	F	W	NA		
E	W	F	F	F	NA		
4	F	W	W	SB	W	g_4	$p_4(t)$
F	F	W	W	F	NA		
5	F	W	F	SB	W	g_2	$p_2(t)$
G	F	W	F	F	NA		
6	F	F	W	W	W	g_3	$p_3(t)$
7	F	F	W	F	W	g_2	$p_2(t)$
8	F	F	F	W	W	g_2	$p_2(t)$
9	F	F	F	F	F	g_1	$p_1(t)$

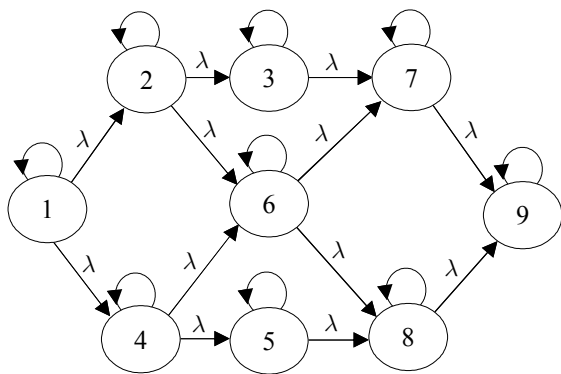


Fig. 7 State transition diagram of redundant system

대기부품 X_3 와 X_4 가 비작동대기상태이므로 Table 3에서 알 수 있듯이 주요부품 X_1 과 X_2 가 작동 중일 때 대기부품인 X_3 과 X_4 는 고장 날수 없다. 따라서 상태 A, B, C, D, E, F 및 G는 발생할 수 없는 상태이다. 시스템의 RBD와 시스템 상태표를 이용하면 Fig. 7과 같은 상태천이도를 구할 수 있다.

요구성능수준에 대한 신뢰도는 3장에서와 같이 마코브 모형 방정식을 이용하여 구할 수 있으며 이를 이용하여 얻은 미분방정식은 식 (25)에서 식 (33)과 같다.

$$P_1'(t) = -2\lambda P_1(t). \tag{25}$$

$$P_2'(t) = \lambda P_1(t) - 2\lambda P_2(t). \tag{26}$$

$$P_4'(t) = \lambda P_1(t) - 2\lambda P_4(t). \tag{27}$$

$$P_3'(t) = \lambda P_2(t) - \lambda P_3(t). \tag{28}$$

$$P_5'(t) = \lambda P_4(t) - \lambda P_5(t). \tag{29}$$

$$P_6'(t) = \lambda P_2(t) + \lambda P_4(t) - 2\lambda P_6(t). \tag{30}$$

$$P_7'(t) = \lambda P_3(t) + \lambda P_6(t) - \lambda P_7(t). \tag{31}$$

$$P_8'(t) = \lambda P_5(t) + \lambda P_6(t) - \lambda P_8(t). \tag{32}$$

$$P_9'(t) = \lambda P_7(t) + \lambda P_8(t). \tag{33}$$

3장과 동일한 방법으로 위의 미분방정식을 풀면 t시점에서 각 상태에 있을 확률을 구할 수 있으며 그 결과는 식 (34)와 같다.

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= e^{-2\lambda t} \\
 P_2(t) &= \lambda t e^{-2\lambda t}, \\
 P_3(t) &= [1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_4(t) &= \lambda t e^{-2\lambda t}, \\
 P_5(t) &= [1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_6(t) &= (\lambda t)^2 e^{-2\lambda t}, \\
 P_7(t) &= \lambda t [1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_8(t) &= \lambda t [1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}, \\
 P_9(t) &= 1 - \sum_{i=1}^8 P_i(t).
 \end{aligned} \tag{34}$$

따라서 각 요구성능수준에 대한 신뢰도는 다음

과 같이 된다.

$$R_4(t) = (1 + 2\lambda t)e^{-2\lambda t}. \quad (35)$$

$$R_3(t) = (1 + \lambda t)^2 e^{-2\lambda t}. \quad (36)$$

$$R_2(t) = (1 + \lambda t)[2 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]e^{-\lambda t}. \quad (37)$$

5. 다기능 대기부품의 효과분석

다기능 대기부품을 갖는 다중상태시스템의 신뢰도를 $R_{M_j}(t)$, 병렬시스템의 신뢰도를 $R_{P_j}(t)$, 중복시스템의 신뢰도를 $R_{D_j}(t)$ 라 하자. 시스템의 요구성능수준(w)이 g_j ($j=2, 3, 4$)인 경우 각 시스템의 신뢰도는 각 각 3장과 4장에서 구하였다.

직관적으로 판단할 때 모든 $j=2, 3, 4$ 에 대하여 $R_{M_j}(t)$ 는 $R_{P_j}(t)$ 와 $R_{D_j}(t)$ 사이에 위치한다는 것을 알 수 있다. 따라서 다기능 대기부품의 효과를 측정하기 위해 $[R_{D_j}(t) - R_{P_j}(t)]$ 에 대한 $[R_{M_j}(t) - R_{P_j}(t)]$ 의 비를 이용하여 다기능 대기부품의 효과 $Effect_{M_j}(t)$ 는 식 (38)과 같이 표현할 수 있다.

$$Effect_{M_j}(t) = \frac{R_{M_j}(t) - R_{P_j}(t)}{R_{D_j}(t) - R_{P_j}(t)}, \quad (38)$$

단, $j=2, 3, 4$.

$Effect_{M_j}(t)$ 의 값이 1이면 다기능 대기부품을 갖는 병렬시스템의 신뢰도가 중복시스템과 같다는 것이며 0이면 다기능 대기부품을 갖는 병렬시스템의 신뢰도가 대기부품이 없는 병렬시스템과 같다는 것을 의미한다. 따라서 $Effect_{M_j}(t)$ 의 값이 1에 가까우면 다기능 대기부품의 효과가 높다고 할 수 있으며 0에 가까우면 효과가 낮다고 해석할 수 있다.

시스템의 요구성능수준이 g_4 인 경우 이 수준에서 $Effect_{M_4}(t)$ 는 식 (39)에서 알 수 있듯이 0이 된다. 다시 말하면 요구성능수준이 g_4 인 경우 다기능 대기부품의 효과는 없다고 할 수 있다. 이러한 결과는 식 (14)와 (22)에서 알 수 있듯이

$R_{M_4}(t)$ 와 $R_{P_4}(t)$ 가 같기 때문이다.

$$\begin{aligned} Effect_{M_4}(t) &= \frac{R_{M_4}(t) - R_{P_4}(t)}{R_{D_4}(t) - R_{P_4}(t)} \\ &= \frac{0}{2\lambda t e^{-2\lambda t}} = 0. \end{aligned} \quad (39)$$

시스템의 요구성능수준이 g_3 인 경우 이 수준에서 $Effect_{M_3}(t)$ 는 식(40)과 같다.

$$\begin{aligned} Effect_{M_3}(t) &= \frac{R_{M_3}(t) - R_{P_3}(t)}{R_{D_3}(t) - R_{P_3}(t)} \\ &= \frac{2}{2 + \lambda t}. \end{aligned} \quad (40)$$

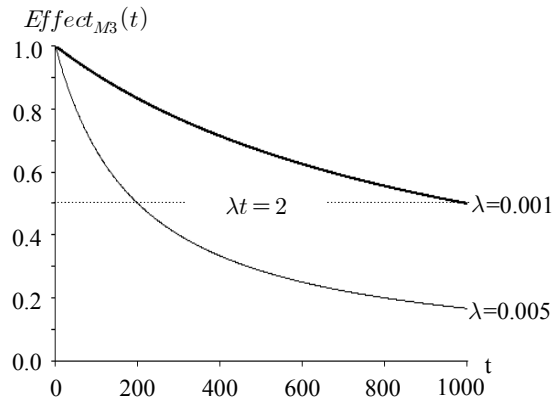


Fig. 8 $Effect_{M_3}(t)$ for the required performance level g_3

임의의 고장률에 대해 시간의 변화에 따른 효과를 알아보기 위하여 두 개의 고장률 값 $\lambda = 0.001$ 과 $\lambda = 0.005$ 를 고려하였으며 그 경우 $Effect_{M_3}(t)$ 의 변화는 Fig. 8과 같다.

$Effect_{M_3}(t)$ 는 모든 t 에서 1보다 작거나 같지만 $\lambda t < 2$ 즉, $t < 2/\lambda$ 이면 $Effect_{M_3}(t)$ 이 0.5보다 크게 되어 다기능 대기부품의 효과가 크게 나타나고 있으나 $\lambda t > 2$ 즉, $t > 2/\lambda$ 이면 $Effect_{M_3}(t)$ 이 0.5보다 작게 되며 다기능 대기부품의 효과가 작은 것을 알 수 있다. 또한 $t \rightarrow \infty$ 가 되면 $Effect_{M_3}(t) = 0$ 이 되어 다기능 대기부품의 효과가 없는 것으로 나타난다. $\lambda t = 2$

일 때, $R_{M3}(t)=0.091$. $R_{P3}(t)=0.018$, $R_{D3}(t)=0.164$ 이다. 현실적으로 요구되는 신뢰도 목표는 이 값보다 훨씬크므로 $\lambda t \ll 2$ 일 때이다. 따라서 대기부품의 효과는 크다고 볼 수 있다.

시스템의 요구성능수준이 g_2 인 경우 이 수준에서 $Effect_{M2}(t)$ 는 식(41)과 같다.

$$Effect_{M2}(t) = \frac{R_{M2}(t) - R_{P2}(t)}{R_{D2}(t) - R_{P2}(t)} = \frac{2[1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}]}{\lambda t[2 - (2 + \lambda t)e^{-\lambda t}]} \quad (41)$$

여기에서도 임의의 고장률에 대해 시간이 변화함에 따른 효과의 변화를 알아보기 위하여 두 개의 고장률 값 $\lambda=0.001$ 과 $\lambda=0.005$ 을 고려하였으며 그 경우 $Effect_{M2}(t)$ 의 변화는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에서 $\lambda=0.001$ 인 경우 시스템의 작동 시간이 1,411시간 이전에는 $Effect_{M2}(t)$ 의 값이 0.5보다 큰 반면 1,411이후에는 0.5보다 작으며 시간이 커짐에 따라 점점 작아짐을 알 수 있다. 따라서 시간이 지남에 따라 대기부품의 효과가 낮아진다고 할 수 있다. $\lambda=0.005$ 인 경우에도 유사한 특성을 나타내고 있다. $\lambda=0.001$ 이고 $t=1,411$ 일 때, $R_{M2}(t)=0.629$, $R_{P2}(t)=0.428$, $R_{D2}(t)=0.830$ 이다. 현실적으로 요구되는 신뢰도 목표는 이 값보다 크므로 $t < 1,411$ 일 때이다. 따라서 대기부품의 효과는 크다고 볼 수 있다.

따라서 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 $Effect_{Mj}(t)$ 는 부품의 고장률이 작을수록 신뢰도가 높을수록 대기부품의 효과는 커진다고 해석할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 하나의 대기부품이 주요부품들의 기능을 모두 수행할 수 있는 대기부품을 갖는 병렬시스템을 고려하였다. 이 시스템의 신뢰도를 분석하기 위하여 새로운 신뢰도 모델링

기법을 제안하였으며 마코브 분석 기법을 이용하여 시스템의 신뢰도를 평가하였다.

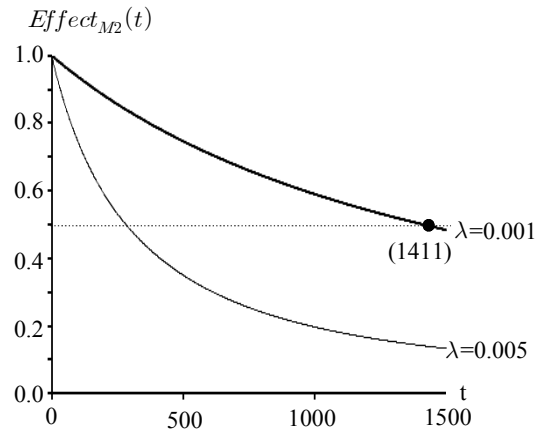


Fig. 9 $Effect_{M2}(t)$ for the required performance level g_2

또한 고려하고 있는 병렬시스템의 대기부품의 효과를 분석하기 위해 대기부품을 갖지 않는 병렬시스템과 모든 주요부품이 대기부품을 갖는 중복시스템을 고려하였으며 대기부품의 효과를 분석하였다.

본 연구에서 제시된 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도 모형은 보잉 737 급 이상 여객기, F-15급 이상의 전투기, UH-60 헬기, 그리고 CH-47헬기의 유압펌프시스템의 신뢰도를 분석하는 데에 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서는 부품들의 수명분포가 상수고장률을 갖는 지수분포를 따른다고 가정하였으나 실제 시스템에서 부품들의 수명분포는 와이블분포와 같은 일반분포를 갖는 경우가 많으며 이에 대한 연구는 향후 연구주제로 남겨놓고자 한다. 또한 본 연구결과는 수리 가능한 시스템의 경우로 확장하여 가용도 분석을 할 수 있으며 얻어진 결과를 이용하여 목표 가용도를 달성하기 위한 예비부품의 수량을 예측할 수 있을 것이다.

References

[1] "MIL-HDBK-338B : Electronic reliability design

- handbook", Fort Belvoir, VA: Defense Quality and Standardization Office, 1998.
- [2] T. Nakagawa and S. Osaki, "Stochastic behavior of a two unit priority standby redundant system with repair", *Microelectronics Reliability*, Vol. 14, Issue 3, pp. 309-313, 1975.
- [3] R. S. Naidu and M. N. Gopalan, "Cost benefit analysis of a one-server two-unit warm standby system subject to different inspection strategies", *Microelectronics Reliability*, Vol. 21, Issue 3, pp. 121-128, 1983.
- [4] A. Azaron, H. Katagiri, K. Kato and M. Sakawa, "Reliability evaluation of multi-component cold standby redundant systems", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 173, Issue 1, pp. 137-149, 2006.
- [5] M. A. El-Damcese and A. N. Helmy, "Study of reliability with mixed standby components", *Application and Applied Mathematics*, Vol. 7, Issue 2, pp. 672-690, 2012.
- [6] M. Manglik and M. Ram, "Reliability analysis of a two unit cold standby system using Markov process", *Journal of Reliability and Statistical Studies*, Vol. 6, Issue 3, pp. 65-80, 2013.
- [7] J. H. Lim, "The estimation of the coverage probability in a redundant system with a control module", *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 80-86, 2007.
- [8] K. T. Yang, "A study on the reliability of S/W during the developing stage", *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 61-73, 2009.
- [9] J. K. Joe, "Evaluation of uncertainty importance measure by experimental method in fault tree analysis", *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 187-195, 2009.
- [10] W. Y. Yoon, G. E. Park and Y. J. Han, "Simulation based design of reliability and maintainability for a multi-functional complex system", *Proceedings of 24th cyber conference B10-special issue, Defense OR2*, November 1, 2012, Seoul, pp. 1005-1012, Korean Operations Research and Management Science Society.
- [11] T. F. Hassett, D. L. Dietrich and F. Szidarovsky, "Time varying failure rates in the availability and reliability analysis of repairable systems", *IEEE Transaction on Reliability*, Vol. 44, No. 1, pp. 155-160, 1995.
- [12] M. Sharifi, S. B. Mishamandani and S. H. Zadeh, "Real time redundancy study of a time dependent failure rates model", *Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Operational Research*, August 25-27, 2010, Turku, Finland, pp. 448-454, IMASR.
- [13] A. Lisnianski, I. Frenkel and Y. Ding, "Multi-state system reliability analysis and optimization for engineers and industrial managers", London: Springer, 2010.
- [14] B. Natvig, "Multi-state coherent systems", New York, NY: John Wiley & Sons, 1985.
- [15] M. Ram, "Reliability measures of a three-state complex system : A Copula approach", *Applications and Applied Mathematics*, Vol. 5, Issue 2, pp. 386-395, 2010.
- [16] U. A. Ali, N. I. Bala and I. Yusuf, "Reliability analysis of a two dissimilar unit cold standby system with three modes using Kolmogorov forward equation method", *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 21, Issue 3, pp. 197-206, 2013.
- [17] M. A. El-Damcese and N. S. Temraz, "Availability and reliability measures for multi-state system by using Markov reward model", *Reliability: Theory & Applications*, Vol. 2, No. 3, pp. 68-85, 2011.



김 동 현 (Dong-Hyeon Kim)

- 정회원
 - 육군사관학교 수학과 이학사
 - 국방대학교 운영분석학과 운영분석학석사
 - 충남대학교 정보통계학과 박사수료
- 관심분야 : 신뢰성공학, 위게임 모델개발, 데이터베이스, 모의분석, 경영분석, 비용원가분석, 작전효과분석



이 석 훈 (Suk-Hoon Lee)

- 서강대 수학과 이학사
 - 오하이오 주립대 통계학 박사
 - Ohio State University 통계학 박사
 - 충남대 정보통계학과 정교수
- 관심분야 : 수명자료분석, 데이터마이닝



임 재 학 (Jae-Hak Lim)

- 종신회원
 - 충남대학교 계산통계학과 이학사
 - 충남대학교대학원 계산통계학과 이학석사
- University of Nebraska-Lincoln Dept. of mathematics & Statistics 통계학박사
- 한밭대학교 경상대학 경영회계학과 정교수
- 관심분야 : 시스템 신뢰성 분석, 시스템 보전보증정책, ERP, 정보시스템 품질