

다기능 대기부품을 갖는 다중상태 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 신뢰도 분석

김동현¹ · 이석훈¹ · 임재학^{2*}

¹충남대 정보통계학과, ²한밭대 경영회계학과

Reliability Analysis of Multi-State UH-60 Helicopter Hydraulic Pump System with a Multi-Functional Standby Component

Dong-hyeon Kim¹ · Suk-hoon Lee¹ · Jae-Hak Lim^{2*}

¹Department of Information & Statistics, Chungnam National University, Korea

²Department of Business & Accounting, Hanbat National University, Korea

We analyse reliability of multi-state UH-60 helicopter hydraulic pump system with a multi-functional standby component using Markov analysis method. The system consists of seven components: 2 main pumps, 1 standby pump, 2 primary servos, and 2 tail rotor servos. The standby pump can take over when one more than components fail. Therefore the standby pump is multi-functional standby component. The system has four states: good, deteriorated, dangerous, and failed. The components have 2 states: working and failed. We assume the system is unrepairable when the components fail. We estimate failure distributions and rates using collected failure time data in field. And we classify multi-state of the system according to emergency procedure of UH-60A student handout. We obtain the reliabilities of multi-state system using Visual Basic program because the differential equations is extremely complicated and tedious to solve.

Keywords: Multi-Functional Standby Component, Multi-State, Markov Analysis

1. 서론

오늘날 시스템들은 과거와는 달리 공학기술이 발전됨에 따라 새로운 구조의 시스템이 등장하고 있고 시스템의 구조는 점점 더 복잡해지고 있다. 이에 따라 시스템들의 신뢰도를 평가하는 업무도 점점 더 복잡하고 어려워지고 있다. 이러한 시스템의 신뢰도에 대한 연구는 다양한 중복구조를 대상으로 이루어졌다. 가장 기본적인 중복구조를 갖는 시스템의 신뢰도에 대한 연구논문 중에 Kraš and Sviličić(2006)이 연구한 수리가 불가능한 2개의 부품을 갖는 대기중복 선박항해레이더 시스템의 신뢰도 분석이 있다. 이들은 부품들의 고장이 상호 독립적으로 발생한다는 가정을 두고 마코브(Markov) 분석 방법을 이용하여 모델링하였다. 좀 더 복잡한 중복구조를 갖는 실제 시스템의 신뢰도에 대한 연구논문 중의 하나는 Azaron *et al.*(2006)의 연구논문이다. 이들은 10개의 상이한

부품이 3개의 서브시스템으로 구성된 우주정거장 통제 시스템의 신뢰도에 대한 연구를 수행하였다. 주 서브시스템은 2개의 부품이 직렬로 연결되어 있고, 2개의 대기 서브시스템은 4개의 부품이 직렬과 병렬로 연결되어 있다. 각 부품들은 독립적으로 고장이 발생하며 부품들의 고장시간은 Erlang 분포를 따른다고 가정하였고 마코프 분석방법으로 신뢰도를 분석하였다. Yoon *et al.*(2012)은 다기능 복합체계에 대한 신뢰도와 정비도의 시뮬레이션 기반 설계 연구에서 논리적 방법이 아닌 시뮬레이션으로 문제를 해결하였다. 이 시스템은 총 43개의 구성품들로 구성되어 있고 서브시스템 간에는 대기구조로, 서브시스템 내의 구성품 간에는 n중 k구조로 되어 있다. 이 시스템도 결국 2개의 부품들을 갖는 대기중복시스템이 여러 개 결합된 시스템이다. 따라서 기존의 연구논문들은 대기부품이 하나의 주요부품 기능을 대신하는 역할에 초점을 맞춘 것이었다.

* 교신저자 jlim@hanbat.ac.kr

2015년 9월 10일 접수; 2015년 10월 1일 수정본 접수; 2015년 10월 8일 게재 확정.

공중에서 운용되는 장비의 시스템들 중에는 시스템 개발 과정에서 일정수준의 신뢰도와 중량이라는 두 가지 목표를 만족시켜야 하기 때문에 대기부품이 하나 이상의 기능을 대신하도록 설계하는 경우가 발생하며 그 예가 UH-60 헬기 유압펌프시스템이다. UH-60 헬기 유압펌프시스템은 조종사로 하여금 큰 힘을 들이지 않고 항공기를 쉽게 다룰 수 있도록 해주는 역할을 한다. 그 시스템은 2개의 주요 유압펌프와 1개의 대기펌프가 비행조종압력을 완전하게 제공할 수 있도록 설계되어 있다. 대기펌프는 2개의 주요 유압펌프 중 1개 또는 2개가 고장 날 때 작동되어 주요 유압펌프의 기능을 대신하고 또한 작동 중인 다른 부품이 고장 날 때에도 그 부품의 기능을 대신한다. 따라서 이러한 대기펌프를 다기능 대기부품이라 할 수 있다. UH-60 헬기와 같이 공중에서 운용되는 항공기는 지상에서 운용되는 장비와는 달리 중량을 무한정 증가시킬 수 없으므로 규정된 중량을 유지하면서 신뢰도를 높이는 방법으로 다기능 대기부품을 설계해야 한다. 다기능 대기부품에 관한 연구는 김동현 외(2015)이 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도 분석을 수행한 이론적 논문에 대하여 수치예제 논문으로 판단한다.

UH-60 헬기는 공중에서 운용되는 특성상 시스템의 상태에 따라 조종사의 비상조치가 요구되며, 이것은 UH-60 헬기 유압펌프시스템이 완전작동상태와 완전고장상태 사이에 다른 성능수준을 가지고 있다는 것을 의미한다. 이러한 성능수준을 다중상태라고 말할 수 있고 Lisnianski *et al.*(2010)과 김동현 외(2015) 등은 다중상태 시스템의 신뢰도를 연구하였다.

본 연구의 목적은 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 UH-60 헬기 유압펌프시스템에 대한 다중상태 신뢰도를 분석하는 것이다. 먼저 UH-60 헬기 유압펌프시스템을 모델링하고 김동현 외(2015)의 논문을 이용하여 다중상태 시스템의 신뢰도를 정의한다. 그리고 수집된 각 부품들의 고장시간에 대한 고장분포함수와 고장률을 추정한다. UH-60A Student Handout(2008)에 나와 있는 비상조치절차 기준을 적용하여

부품들의 고장에 따라 시스템의 상태를 분류한 후에 마코브(Markov) 분석방법을 적용하여 유압펌프시스템의 신뢰도를 분석한다.

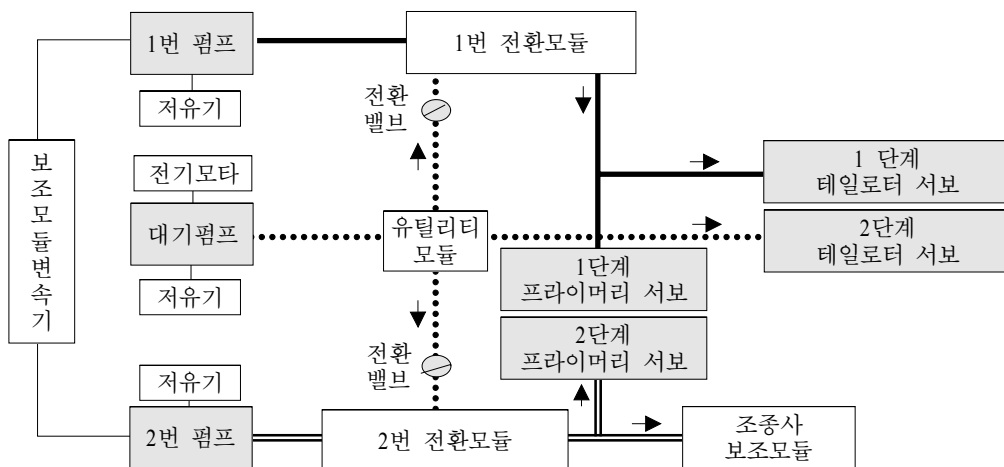
본 논문에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

- m : 부품의 수;
- k : 성능수준의 수;
- X_i : 부품 i ($i = 1, 2, \dots, m$);
- $F_i(t)$: 부품 i 의 고장분포함수 ($i = 1, 2, \dots, m$);
- λ_i : 부품 i 의 고장률 ($i = 1, 2, \dots, m$);
- g_j : 시스템의 성능수준 ($j = 1, 2, \dots, k$), $g_k > g_{k-1} > \dots > g_2 > g_1$;
- $p_j(t)$: t 시점에서 시스템의 성능수준이 g_j 일 확률 ($j = 1, 2, \dots, k$);
- $P(t)$: 상태확률벡터;
- $P^T(t)$: 상태확률 전치벡터;
- A : 상태전이행렬;
- $R_j(t)$: 시스템의 요구성능수준(w)이 g_j 인 경우 신뢰도 ($j = 1, 2, \dots, k$);
- RBD : 신뢰성블럭도 (reliability block diagram).

2. UH-60 헬기 유압펌프시스템의 신뢰도 모델링

2.1 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 작동원리

Nelson(2004)이 작성한 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 계통도를 간략하게 나타내면 <그림 1>과 같다. <그림 1>에서 프라이머리 서보는 유압력에 의해 조종간을 쉽게 움직여서 UH-60 헬기의 전·후·측방이동이 가능하도록 해주며 테일로터 서보는 유압력에 의해 페달을 쉽게 움직여서 꼬리날개의 각을 변화시킴으로써 좌·우 및 직진방향을 통제하는 기능을 한다.



<그림 1> UH-60 헬기 유압펌프시스템의 계통도

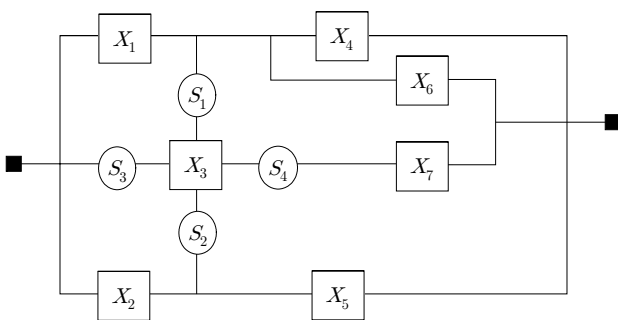
1, 2번 및 대기펌프 1단계와 2단계 프라이머리 서보, 그리고 1단계와 2단계 테일로터 서보는 각각 동일한 성능을 가진 부품이다. 여기에서 2단계 테일로터 서보는 1단계 테일로터 서보가 작동되고 있으면 대기상태에 있다.

최초에 주 전동장치(main transmission) 좌·우측의 보조모듈변속기(accessory module gear box)에 장착되어 주 날개회전할 때 1번과 2번 펌프가 작동된다. 이 때 각 펌프의 작동압력은 3,050(±50) psi이다. 전기모터에 의해 작동되는 대기펌프는 비작동대기(cold)상태에 있다. 1번 펌프는 1번 전환모듈을 통해 1단계 프라이머리 서보와 1단계 테일로터 서보에 유압을 공급하고, 2번 펌프는 2번 전환모듈을 통해 2단계 프라이머리 서보와 조종사 보조모듈에 유압을 공급하여 시스템이 정상적으로 작동되도록 한다.

대기펌프의 역할은 다음과 같다. 1번 펌프가 고장 나면 즉시 작동되어 유틸리티모듈, 전환밸브 및 1번 전환모듈을 통해 1번 펌프의 기능을 수행하게 된다. 또한 2번 펌프가 고장 나면 즉시 작동되어 유틸리티모듈, 전환밸브 및 2번 전환모듈을 통해 2번 펌프의 기능을 수행하게 된다. 1번과 2번 펌프가 모두 고장 나더라도 즉시 작동되어 1번과 2번 펌프의 기능을 수행하게 된다. 이 밖에도 대기펌프는 1단계 테일로터 서보가 고장 나면 즉시 작동되어 유틸리티모듈을 통해 2단계 테일로터 서보에 유압을 공급한다.

2.2 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 신뢰도 모델링

연구하고자 하는 UH-60 헬기 유압펌프시스템은 <그림 1>에서 음영으로 표시된 7개의 부품으로 한정한다. <그림 1>을 RBD로 표현하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> UH-60 헬기 유압펌프시스템의 RBD

<그림 2>에서 X_1 과 X_2 는 각각 1번과 2번 펌프이고 X_3 는 대기펌프이다. X_4 와 X_5 는 각각 1단계와 2단계 프라이머리 서보이고 X_6 와 X_7 은 각각 1단계와 2단계 테일로터 서보이다. 여기에서 X_1 , X_2 및 X_3 을 그룹 I이라 하고 X_4 와 X_5 를 그룹 II라 하며 X_6 과 X_7 을 그룹 III이라 하자.

그룹 I은 다기능 대기부품을 가진 병렬시스템이며 X_3 는 다기능 비작동대기부품이므로 대기상태에서는 고장 나지 않

는다. X_1 이 고장 나면 스위치 S_3 가 연결되어 X_3 가 작동되고 동시에 스위치 S_1 이 연결되어 X_4 와 X_6 가 작동된다. X_2 가 고장 나면 스위치 S_3 가 연결되어 X_3 가 작동되고 동시에 스위치 S_2 가 연결되어 X_5 가 작동된다. X_1 과 X_2 둘 다 고장 나면 스위치 S_3 가 연결되어 X_3 가 작동되고 동시에 스위치 S_1 과 S_2 가 연결되어 X_4 , X_5 및 X_6 가 작동된다. 그러나 X_1 과 X_2 가 둘 다 고장 나면 시스템은 작동되나 출력이 약해져서 정상적인 기능발휘가 제한된다. X_3 가 작동될 때에는 X_1 또는 X_2 보다 먼저 고장 날 수 있다.

그룹 II는 2개의 부품으로 구성된 시스템이다. X_4 와 X_5 가 둘 다 정상적으로 작동될 때에만 시스템은 정상상태이다 이 중 1개의 부품이 고장 나면 시스템은 작동되나 출력이 약해 정상적인 기능발휘가 제한된다. X_4 와 X_5 둘 다 고장 나면 시스템은 고장 난다.

그룹 III은 비작동대기부품 X_7 을 갖는 대기중복시스템이다. X_6 가 고장 나면 스위치 S_3 가 연결되어 X_3 가 작동되고 동시에 스위치 S_4 가 연결되어 X_7 이 작동된다. X_6 가 작동되고 있을 때에는 X_7 은 고장 나지 않는다. X_6 와 X_7 둘 다 고장 나면 시스템은 고장 난다.

본 모형을 해결하기 위한 가정사항과 조건은 다음과 같다.

첫째, 각 부품들의 고장은 상호 독립적으로 발생되고 동시에 2개 이상 고장 나지 않는다. 둘째, 대기펌프와 2단계 테일로터 서보는 비작동대기부품이므로 대기상태에서 고장률은 0이다. 셋째, 대상부품이외의 모든 부품들은 완전하다 넷째, 고장 난 부품과 시스템은 수리되지 않는다.

2.3 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 다중상태 신뢰도 정의

UH-60A Student Handout(2008)에서 규정한 조종사의 비상 조치 절차에는 7개의 부품들 중에 어떤 부품이 고장 나느냐에 따라 조종사가 취해야 하는 상황과 조치가 마련되어 있다. 그 상황과 조치는 다음과 같다. “LAND AS SOON AS PRACTICABLE(LASAPr)” 상황이 발생할 경우에는 조종사가 적절한 착륙지역을 찾아 착륙해야 한다. 즉 주변에서 가장 가까운 착륙 가능한 평지를 찾아 빠른 시간 내에 착륙해야 한다는 것을 의미한다. “LAND AS SOON AS POSSIBLE(LASAPo)” 상황이 발생할 경우에는 즉시 가장 가까운 착륙지역을 찾아 착륙해야 한다.

김동현 외(2015)이 정의한 다중상태시스템의 신뢰도는 다음과 같다. $j=2, 3, 4$ 에 대하여 요구성능수준(w)이 j 번째 성능수준과 일치한다면, 즉, $w=g_j$ 이라면 t 시점에서의 신뢰도는 다음의 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$R_j(t) = 1 - \sum_{i=1}^{j-1} p_i(t) = \sum_{i=j}^4 p_i(t), j=2, 3, 4. \quad (1)$$

식(1)에 따라 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 성능수준 g_i 를

분류하면 다음과 같다. 시스템의 성능수준 g_4 는 유압펌프시스템의 부품들이 고장 없이 잘 작동되는 양호한 상태이다. 시스템의 성능수준 g_3 는 LASAPr 상황이 발생하는 저하된 상태이다. 시스템의 성능수준 g_2 는 LASAPo 상황이 발생하는 위험한 상태이다. 시스템의 성능수준 g_1 은 시스템 고장상태이다.

따라서 7개 부품들의 고장여부에 따라 시스템의 성능수준 g_j 를 분류하면 다음과 같다.

- (1) g_4 : $X_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 가 모두 고장 나지 않은 양호한 상태이다.
- (2) g_3 : $X_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 중 1개가 고장 나는 저하된 상태이나, X_4 와 X_5 둘 중 하나라도 고장 나는 상태와 비작동대기부품인 X_3 와 X_7 이 고장 나는 상태는 제외된다.
- (3) g_2 : $X_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 중에서 2개가 고장 나는 위험한 상태이나, X_4 또는 X_5 중 1개가 고장 나는 상태가 포함된다. X_3 와 X_6 , X_3 와 X_7 , X_4 와 X_5 및 X_6 와 X_7 가 각각 모두 고장 나는 상태는 제외된다.
- (4) g_1 : $X_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 중 3개 이상이 고장 나는 시스템 고장상태이고, X_4 와 X_5 , X_6 와 X_7 , 그리고 X_3 와 X_6 가 각각 고장 나는 상태가 포함된다.

3. UH-60 헬기 유압펌프시스템 부품들의 고장률 추정

각 부품들의 고장시간 자료는 UH-60 항공부대에서 수집되었으며, 펌프의 고장시간 자료는 1997년부터 2004년까지, 프라이어머리 서보의 고장시간 자료는 2000년부터 2004년까지, 그리고 테일로터 서보의 고장시간 자료는 1992년부터 2004년까지의 자료이다. 최초 배치년도부터 기록된 모든 자료를 수집하여 검증하였고 완전고장시간 자료를 대상으로 추출하였다. 펌프의 고장시간 자료는 19개, 프라이어머리 서보의 고장시간 자료는 13개, 그리고 테일로터 서보의 고장시간 자료는 11개가 수집되었다. 각 부품들의 고장시간 자료는 <표 1>과 같고 작은 값부터 큰 값 순으로 나열하였다.

<표 1> UH-60 헬기 유압펌프시스템의 부품 고장시간

부품명	고장시간(hour)
펌프	523, 549, 571, 574, 639, 667, 707, 748, 951, 1,007, 1,088, 1,167, 1,290, 1,342, 1,572, 1,706, 1,745, 2,040, 2,484
프라이어머리 서보	313, 321, 391, 656, 781, 826, 858, 1,272, 1,513, 1,612, 2,019, 2,252, 2,313
테일로터 서보	1,957, 2,064, 2,183, 2,371, 2,619, 2,783, 2,880, 3,025, 3,359, 3,427, 3,986

<표 1>에서 각 부품들의 가장 작은 고장시간이 0에서 상당

히 떨어진 값이므로 각 부품들이 어느 정도 시간까지는 고장 나지 않는 최소수명을 가진다고 가정하고 통계 프로그램인 EasyFit 5.6버전을 이용하여 2모수 지수분포와 3모수 와이블 분포에 대한 적합성 검정을 수행한다. 분포에 대한 적합성 검정 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> 분포에 대한 적합성 검정 결과

분포	Anderson-Darling(adj) 통계량, α (유의수준) = 0.05			임계치
	펌프	프라이어머리 서보	테일로터 서보	
2모수 지수분포	2.0953	2.3814	1.8120	2.5018
3모수 와이블분포	4.1604	4.5409	0.3202	

$\alpha = 0.05$ 에서 Anderson-Darling(adj) 통계량이 임계치보다 작으면 그 분포를 따르고 그렇지 않으면 따르지 않는다고 말할 수 있다. 따라서 펌프와 프라이어머리 서보의 고장시간은 2모수 지수분포를 따른다고 할 수 있으며, 테일로터 서보의 고장시간은 2모수 지수분포와 3모수 와이블분포를 모두 따른다고 할 수 있다. 여기에서 테일로터 서보의 고장시간은 2모수 지수분포보다 3모수 와이블분포에 더 적합하지만 마코브(Markov) 분석방법을 적용하기 위해 펌프와 프라이어머리 서보의 고장분포와 같은 2모수 지수분포를 선택한다. 따라서 각 부품의 고장분포함수와 고장률은 <표 3>과 같이 구할 수 있다.

<표 3> 각 부품의 고장분포함수와 고장률

부품	고장분포함수, $F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$	고장률 (회/시간), λ_i
펌프	$F_1(t) = 1 - e^{-0.00166(t-523)}, t \geq 523$	$\lambda_1 = 0.00166$
프라이어머리 서보	$F_2(t) = 1 - e^{-0.00118(t-313)}, t \geq 313$	$\lambda_2 = 0.00118$
테일로터 서보	$F_3(t) = 1 - e^{-0.00121(t-1957)}, t \geq 1,957$	$\lambda_3 = 0.00121$

4. 신뢰도 분석

4.1 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 상태표와 상태천이도

시스템이 7개의 부품으로 구성되어 있고 부품의 상태는 완전작동상태와 완전고장상태만 존재하므로 시스템의 가능한 상태 수는 $128(= 2^7)$ 개이고 시스템의 상태표는 <표 4>와 같다.

여기에서는 시스템의 상태목록 중에서 시스템이 완전고장 상태에 이르는 3개 부품의 고장상태까지만 고려한다. g_j 와 $p_j(t)$ 는 제2.3절에 명시된 시스템의 성능수준 분류에 따라 기록되며, W는 작동상태, F는 고장상태, SB는 대기상태를 의미한다.

<표 4> UH-60 헬기 유압펌프시스템의 상태표

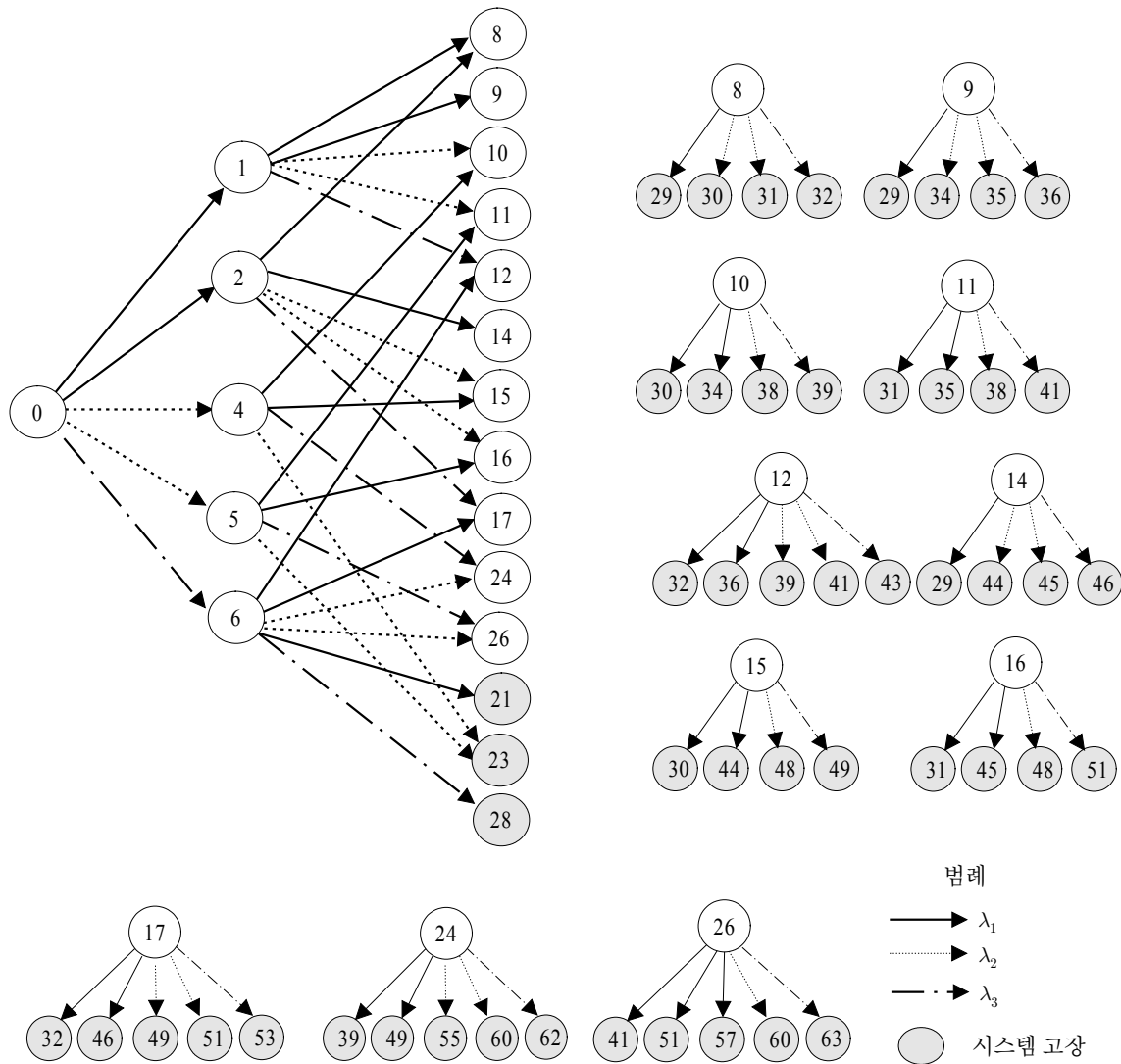
상태 명	부 품							시스템		상태 명	부 품							시스템	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	g_j	$p_j(t)$		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	g_j	$p_j(t)$
0	W	W	SB	W	W	W	SB	g_4	$p_4(t)$	32	F	F	W	W	W	F	W	g_1	$p_1(t)$
1	F	W	W	W	W	W	SB	g_3	$p_3(t)$	33*	F	F	W	W	W	W	F		
2	W	F	W	W	W	W	SB	g_3	$p_3(t)$	34	F	W	F	F	W	W	SB	g_1	$p_1(t)$
3*	W	W	F	W	W	W	SB			35	F	W	F	W	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$
4	W	W	SB	F	W	W	SB	g_2	$p_2(t)$	36	F	W	F	W	W	F	W	g_1	$p_1(t)$
5	W	W	SB	W	F	W	SB	g_2	$p_2(t)$	37*	F	W	F	W	W	W	F		
6	W	W	W	W	W	F	W	g_3	$p_2(t)$	38	F	W	W	F	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$
7*	W	W	SB	W	W	W	F			39	F	W	W	F	W	F	W	g_1	$p_1(t)$
8	F	F	W	W	W	W	SB	g_2	$p_2(t)$	40*	F	W	W	F	W	W	F		
9	F	W	F	W	W	W	SB	g_2	$p_2(t)$	41	F	W	W	W	F	F	W	g_1	$p_1(t)$
10	F	W	W	F	W	W	SB	g_2	$p_2(t)$	42*	F	W	W	W	F	W	F		
11	F	W	W	W	F	W	SB	g_2	$p_2(t)$	43	F	W	W	W	W	F	F	g_1	$p_1(t)$
12	F	W	W	W	W	F	W	g_2	$p_2(t)$	44	W	F	F	F	W	W	SB	g_1	$p_1(t)$
13*	F	W	W	W	W	W	F			45	W	F	F	W	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$
14	W	F	F	W	W	W	SB	g_2	$p_2(t)$	46	W	F	F	W	W	F	W	g_1	$p_1(t)$
15	W	F	W	F	W	W	SB	g_2	$p_2(t)$	47*	W	F	F	W	W	W	F		
16	W	F	W	W	F	W	SB	g_2	$p_2(t)$	48	W	F	W	F	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$
17	W	F	W	W	W	F	W	g_2	$p_2(t)$	49	W	F	W	F	W	F	W	g_1	$p_1(t)$
18*	W	F	W	W	W	W	F			50*	W	F	W	F	W	W	F		
19*	W	W	F	F	W	W	SB			51	W	F	W	W	F	F	W	g_1	$p_1(t)$
20*	W	W	F	W	F	W	SB			52*	W	F	W	W	F	W	F		
21	W	W	F	W	W	F	W	g_1	$p_1(t)$	53	W	F	W	W	W	F	F	g_1	$p_1(t)$
22*	W	W	F	W	W	W	F			54	W	W	F	F	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$
23	W	W	SB	F	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$	55	W	W	F	F	W	F	W	g_1	$p_1(t)$
24	W	W	W	F	W	F	W	g_2	$p_2(t)$	56*	W	W	F	F	W	W	F		
25*	W	W	SB	F	W	W	F			57	W	W	F	W	F	F	W	g_1	$p_1(t)$
26	W	W	W	W	F	F	W	g_2	$p_2(t)$	58*	W	W	F	W	F	W	F		
27*	W	W	SB	W	F	W	F			59	W	W	F	W	W	F	F	g_1	$p_1(t)$
28	W	W	SB	W	W	F	F	g_1	$p_1(t)$	60	W	W	W	F	F	F	W	g_1	$p_1(t)$
29	F	F	F	W	W	W	SB	g_1	$p_1(t)$	61*	W	W	SB	F	F	W	F		
30	F	F	W	F	W	W	SB	g_1	$p_1(t)$	62	W	W	W	F	W	F	F	g_1	$p_1(t)$
31	F	F	W	W	F	W	SB	g_1	$p_1(t)$	63	W	W	W	W	F	F	F	g_1	$p_1(t)$

* 표시의 상태명은 발생할 수 없는 상태임.

<표 4>를 이용하여 시스템의 상태천이도를 도식하면 <그림 3>과 같다.

<그림 3>에서 상태 0은 모든 부품이 고장 나지 않은 상태이고, 상태 1, 2, 4, 5 및 6은 1개의 부품이 고장 난 상태이다. 그리고 상태 8~12, 14~17, 24 및 26은 2개의 부품이 고장난 상

태이며 상태 21과 28은 그룹 III 내에 있는 부품 X_6 와 X_7 이 모두 작동되지 않는 상태 또는 고장상태이므로 시스템 고장상태이다. 상태 23은 그룹 II 내에 있는 부품 X_4 와 X_5 가 모두 고장상태이므로 시스템 고장상태이고 상태 29~63은 부품 3개가 고장상태이므로 시스템 고장상태이다.



<그림 3> UH-60 헬기 유압펌프시스템의 상태전이도

<그림 3>을 이용하여 상태전이행렬 A 를 구성하면 식 (2)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & p_{0,4} & \cdots & p_{0,26} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,4} & \cdots & p_{1,26} \\ p_{2,0} & p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,4} & \cdots & p_{2,26} \\ p_{4,0} & p_{4,1} & p_{4,2} & p_{4,4} & \cdots & p_{4,26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{26,0} & p_{26,1} & p_{26,2} & p_{26,4} & \cdots & p_{26,26} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $p_{i,j}$ 의 $i, j = 0, 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 24, 26$.

$P'(t)^T = P(t)^T \cdot A$ 를 이용하여 미분연립방정식을 전개한다.

$$[P'_0(t), P'_1(t), \dots, P'_{26}(t)] = [P_0(t), P_1(t), \dots, P_{26}(t)].$$

$$\begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & \cdots & p_{0,26} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,26} \\ p_{2,0} & p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{26,0} & p_{26,1} & p_{26,2} & \cdots & p_{26,26} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)을 전개하면 식 (4)와 같은 미분연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P'_0(t) &= -(2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_0(t), \\ P'_1(t) &= -(2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_1(t) + \lambda_1 P_0(t), \\ P'_2(t) &= -(2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_2(t) + \lambda_1 P_0(t), \\ P'_4(t) &= -(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_4(t) + \lambda_2 P_0(t), \\ P'_5(t) &= -(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_5(t) + \lambda_2 P_0(t), \\ P'_6(t) &= -(3\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_6(t) + \lambda_3 P_0(t), \\ P'_8(t) &= -(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_8(t) + \lambda_1 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t), \\ P'_9(t) &= -(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_9(t) + \lambda_1 P_1(t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 P_{10}'(t) &= -(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_{10}(t) + \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_4(t), \\
 P_{11}'(t) &= -(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_{11}(t) + \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_5(t), \\
 P_{12}'(t) &= -(2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_{12}(t) + \lambda_3 P_1(t) + \lambda_1 P_6(t), \\
 P_{14}'(t) &= -(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_{14}(t) + \lambda_1 P_2(t), \\
 P_{15}'(t) &= -(\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_{15}(t) + \lambda_1 P_4(t) + \lambda_2 P_2(t), \\
 P_{16}'(t) &= -(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_{16}(t) + \lambda_1 P_5(t) + \lambda_2 P_2(t), \\
 P_{17}'(t) &= -(2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3)P_{17}(t) + \lambda_1 P_6(t) + \lambda_3 P_2(t), \\
 P_{24}'(t) &= -(3\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_{24}(t) + \lambda_2 P_6(t) + \lambda_3 P_4(t), \\
 P_{26}'(t) &= -(3\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_{26}(t) + \lambda_2 P_6(t) + \lambda_3 P_5(t).
 \end{aligned}$$

<표 4>를 이용하여 $p_j(t)$ 를 정리하면 식(5)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 p_4(t) &= P_0(t), \quad p_3(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_6(t), \\
 p_2(t) &= P_4(t) + P_5(t) + P_8(t) \cdots P_{12}(t) + P_{14}(t) \cdots \\
 &\quad \cdots P_{17}(t) + P_{24}(t) + P_{26}(t)
 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (1)에 식 (5)를 대입하여 시스템의 요구성능수준(w)이 g_j 인 경우의 신뢰도를 구할 수 있다.

$$R_4(t) = p_4(t) = P_0(t). \quad (6)$$

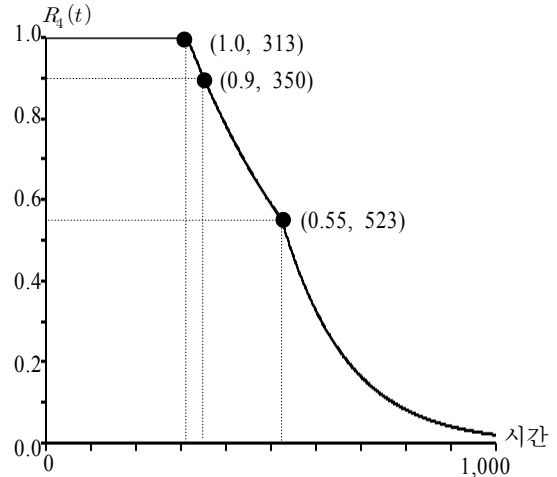
$$\begin{aligned}
 R_3(t) &= p_3(t) + p_4(t) = R_4(t) + p_3(t). \quad (7) \\
 &= P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_6(t)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_2(t) &= p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = R_3(t) + p_2(t), \quad (8) \\
 &= \sum_{i=0}^{26} P_i(t)
 \end{aligned}$$

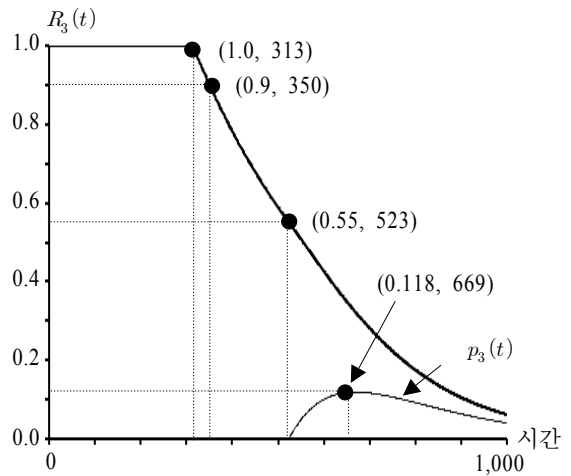
여기서, $i \neq 3, 7, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25$.

이 시스템은 $t=0$ 에서 부품들이 모두 고장 나지 않고 정상 작동 중이면 상태 0에 있으므로 초기조건은 $P_0(0) = 1, P_i(0) = 0 (i = 1, 2, \dots, 26)$ 이다. 이러한 초기조건과 <표 3>에 있는 부품 고장률 λ_i 를 식 (4)의 미분연립방정식에 대입하여 시스템의 신뢰도를 구할 수 있다. 그러나 이 미분연립방정식은 분석적 방법(analytic method)으로 해를 구하기 어려우므로 수치해법(numerical method) 중에서 정밀도가 높은 Runge Kutta Fehlberg 법을 적용하여 근사 해를 구한다.

시스템의 성능수준이 g_4 와 g_3 인 경우 신뢰도 $R_4(t)$ 와 $R_3(t)$ 의 그래프는 <그림 4>와 <그림 5>와 같다.

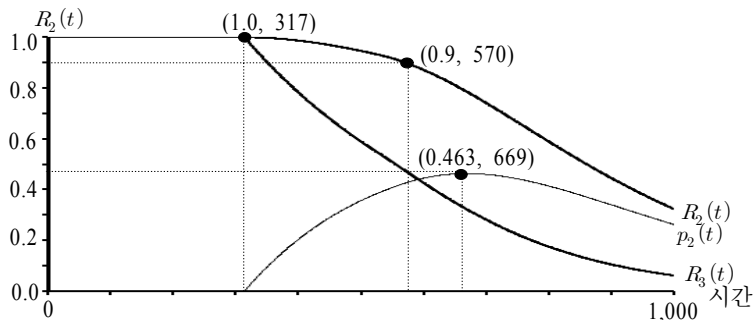


<그림 4> 신뢰도 $R_4(t)$ 의 그래프



<그림 5> 신뢰도 $R_3(t)$ 의 그래프

<그림 4>를 보면 시스템의 성능수준 g_4 에서의 신뢰도 $R_4(t)$ 는 작동시간 313시간까지는 신뢰도가 1.0이 유지되다가 점차 낮아지고, 작동시간 523시간(신뢰도 0.55) 이후에는



<그림 6> 신뢰도 $R_2(t)$ 의 그래프

신뢰도가 급격히 낮아진다. <그림 5>를 보면 시스템의 성능수준 g_3 에서의 신뢰도 $R_3(t)$ 는 작동시간 523시간(신뢰도 0.55)까지는 신뢰도 $R_4(t)$ 만 유지되다가 이후에는 시스템의 성능수준 g_3 가 나타난다. 즉 $p_3(t)$ 가 증가하다가 작동시간 669시간 이후에 감소된다. 따라서 신뢰도 $R_3(t)$ 의 그래프는 $R_4(t)$ 에 비해 완만하게 낮아진다.

<그림 6>을 보면 시스템의 성능수준 g_2 에서의 신뢰도 $R_2(t)$ 는 작동시간 317시간 이후에 감소하나, $R_3(t)$ 보다 완만하게 감소한다. 이는 317시간 이후에 시스템의 성능수준 g_2 일 확률인 $p_2(t)$ 가 더해지기 때문이다. $p_2(t)$ 는 작동시간 669시간(확률 0.463)까지 증가하다가 이후 감소한다.

만일 UH-60 헬기의 일일 운용시간이 15시간이라면 신뢰도 0.9에서 유압펌프시스템의 성능수준별 운용계속일은 <표 5>와 같다.

<표 5> UH-60 헬기 유압펌프시스템의 성능수준별 운용계속일 판단

구분	g_4	g_3	g_2
작동시간(hours)	350	350	570
운용계속일(Day)	23.3	23.3	38

<표 5>를 보면 신뢰도 0.9에서 g_4 와 g_3 에서의 운용계속일이 동일하다. 이는 시스템이 양호한 상태로 23.3일까지 운용되고 이후 38일까지는 저하된 상태와 위험한 상태로 운용됨을 의미한다.

5. 결론

현재까지 2개의 부품을 갖는 대기중복시스템으로부터 여러 개의 부품을 갖는 복합시스템에 이르기 까지 많은 연구가 이루어졌으나 이러한 연구들은 대기부품이 하나의 주요부품 기능만을 대신하는 역할에 관한 것이다. 그러나 공중에서 운용되는 장비는 규정된 신뢰도와 중량을 모두 만족시켜야 한다. 이를 위해서는 하나의 대기부품이 여러 주요부품의 기능을 수행하는 다기능 대기부품을 설계하여 요구되는 중량을 초과하지 않으면서 목표 신뢰도도 달성할 수 있도록 하는 경우가 발생한다. 그러한 시스템 중의 하나가 UH-60 헬기 유압펌프시스템이다. 본 연구에서는 다기능 대기부품을 갖는 다중

상태 병렬시스템인 UH-60 헬기 유압펌프시스템의 신뢰도를 제안하였다. 공중에서 운용되는 특성을 고려하여 시스템의 다중상태를 정의하였고 마코브(Markov) 분석방법을 이용하여 신뢰도를 분석하였다. 본 연구에서 제시된 모형은 UH-60 헬기 유압펌프시스템을 기본으로 군수용 항공기 유형의 신뢰도 분석에 활용할 수 있을 거라 판단된다. 향후 주요부품 외에 일반부품으로 까지 확대하여 연구한다면 실제 시스템의 신뢰도를 좀 더 정확하게 예측할 수 있을 것이다. 또한 부품의 고장률이 지수분포가 아닌 일반적인 분포를 따르는 경우도 고려하여 확대 연구를 수행한다면 좀 더 정확한 예측이 가능할 것이다. 끝으로 수리를 고려한 가용도 모형을 발전시킨다면 예비부품의 적정 재고소요 예측이 가능하여 시스템의 가동률을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 김동현 · 이석훈 · 임재학 (2015), 다기능 대기부품을 갖는 다중상태 병렬시스템의 신뢰도 분석, 한국산업정보학회, 제20권, 제4호, pp. 75-87.
- [2] 110th Aviation Brigade (2008), UH-60A Student Handout (UH-60A Malfunction Analysis), Alabama, *United States Army Aviation Warfighting Center*.
- [3] Azaron, A., Katagiri, H., Kato, K., and Sakawa, M. (2006), Reliability Evaluation of Multi-Component Cold Standby Redundant Systems, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 173, No. 1, pp. 137-149.
- [4] Kraš, A. and Sviličić, B. (2006), Predictive Reliability Analysis of Redundant Ship Navigational Radar System, *Pomorstvo, god*, Vol. 20, No. 2, pp. 119-126.
- [5] Lisnianski, A., Frenkel, I., and Ding, Y. (2010), Multi-State Systems Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers, *Springer*, London.
- [6] Nelson, R. (2004), *UH-60 Hydraulic System*, Alabama, United States Army Aviation Warfighting Center.
- [7] Yoon, W. Y., Park, G. E., and Han, Y. J. (2012), Simulation Based Design of Reliability and Maintainability for a Multi-Functional Complex System, Proceedings of 24th Cyber Conference B10-Special Issue, Defense OR2, *Korean Operations Research and Management Science Society*, pp. 1005-1012.