

Markov Process를 활용한 시스템 가용도 분석 연구

김한솔¹⁾ 김보현²⁾ 허장욱^{1)*}

1) 금오공과대학교 기계시스템공학과, 2) 한화시스템

System Availability Analysis using Markov Process

Han Sol Kim¹⁾, Bo Hyeon Kim²⁾, Jang Wook Hur^{1)*}

1) Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

2) Hanwha Systems Co. Ltd.

Abstract : The availability of the weapon system can be analyzed through state modeling and simulation using the Markov process. In this paper, show how to analyze the availability of the weapon system and can use the Markov process to analyze the system's steady state as well as the RAM at a transient state in time. As a result of the availability analysis of tracked vehicles, the inherent availability was 2.6% and the operational availability was 1.2% The validity criterion was defined as the case where the difference was within 3%, and thus it was judged to be valid. We have identified the faulty items through graphs of the number of visits per state among the results obtained through the MPS and can use them to provide design alternatives.

Key Words : Markov process, Reliability, Availability, Maintainability, RAM Analysis, Transient State

Received: March 12, 2018 / **Revised:** July 16, 2018 / **Accepted:** July 20, 2018

* 교신저자 : Jang Wook Hur, hhjw88@kumoh.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

적과의 전쟁에서 승리하기 위해서는 평시 전쟁에 대비한 전투준비태세 유지가 중요함은 너무나 당연하다. 이와 같은 평시 전투준비태세 유지에는 유무형의 많은 요소들이 영향을 미치고 있으나, 운용유지 간 무기체계의 가용도 향상은 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다[1].

기존의 가용도 분석 방법으로는 무기체계 운용 및 정비에 관련된 시간요소를 바탕으로 산술적으로 계산하는 수리적 방법과 체계가 기능을 수행하는데 필요한 구성품들을 논리적인 도해식 네트워크로 구성하여 시스템 다중구조에 대한 수치모델을 블록 내부에 포함함으로써 신뢰도를 확인할 수 있는 신뢰도 블록선도(Reliability Block Diagram)방법 그리고 시스템에서 사고, 재해가 일어날 확률을 수치로 평가하는 안전평가의 한 방법으로 결함수분석법(Fault Tree Analysis) 등이 있으나, 이러한 방법들은 모두 무기체계의 정상상태에 초점을 맞추고 있기 때문에 무기체계 운용 시 발생하는 여러가지 외부적 요인이나 사건들에 대해서 상세하게 표현할 수 없다는 한계가 있다[2].

따라서 RAM 파라미터인 MTBF, MTTR, ALDT 등의 입력을 통해 정상상태 뿐만 아니라 특정시점의 가용도 분석이 가능하고, 체계개발단계에서 다빈도 고장품목 식별과 이에 대한 설계대안 마련을 통해 의사결정을 지원할 수 있는 RAM 분석 도구의 개발 및 보급이 요구되고 있으며, 이러한 필요성에 부합하는 분석기술의 하나로 시스템 가용도 분석이 가능한 마코프 프로세스(Markov process)에 대한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다[3].

본 논문에서는 마코프 프로세스를 기반으로 한 RAM 시뮬레이션 소프트웨어인 MPS(Markov process Simulator)를 이용하여 시스템을 모델링하고, 시간에 따른 가용도 변화를 분석하였으며, 마코프 프로세스 시뮬레이션 S/W의 유효성 검증을 수행하였다.

2. Markov Process Simulation

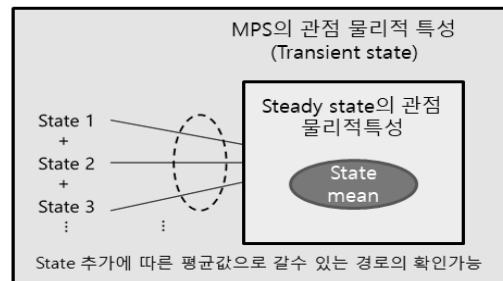
일반적인 확률의 문제에서는 시간적인 개념을 고려하지 않고 있으나, 시간에 따라 나타나는 현상들이 확률적인 성격을 갖는 경우가 많다. 이와 같이 시간을 고려한 확률변수들의 집합을 확률과정이라고 하며, 시간을 고려하지 않은 상태에서의 확률이론은 정적인 반면에, 시간을 고려한 확률이론은 동적이라고 할 수 있다. 이러한 특징을 활용하여 시스템의 시간을 고려한 신뢰성 분석으로 마코프 프로세스 기법이 활용되고 있다.

상태공간이 X이고 시점 t에서의 상태를 X(t)라고 할 때, 마코프 프로세스는 확률과정이 모든 $x(u), 0 \leq u < s$ 에 대해 식 (1)과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$P[X(t+s) = j | X(s) = i, X(u) = x(u), 0 \leq u < s] \quad (1)$$

$$= P(X(t+s) | X(s) = i)$$

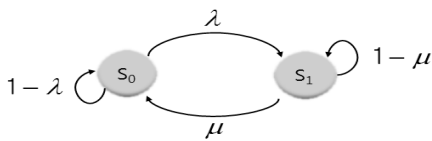
위 성질을 마코프 성질(Markov Property)이라고 하며, 이는 '과거와 현재에 관한 정보가 주어질 때 미래에 관한 조건부 분포는 현재의 정보에만 의존하고 과거의 정보와는 무관하다'라는 의미이다. 마코프 프로세스는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 초기의 다양한 상태(States)를 정의하여 영향성을 분석할 수 있다[4].



[Figure 1] Interest range of the system



[Figure 2] Transient and steady state operational availability of T-50



[Figure 3] Two state Markov model

일반적으로 운용가용도는 Figure 2에 나타낸 T-50 운용가용도 사례와 같이 시간에 따라 변화하기 때문에 정상상태뿐만 아니라 과도상태에 대한 분석이 필요한데, Markov process는 시스템의 가용도 분석에 유용한 수학적 모델 분석 방법이며, 시스템의 상태(운용, 비운용)를 상태전이로 나타내어 과도상태 및 정상상태의 가용도 추정이 가능하다[5].

운용상태와 고장상태만을 고려한 단순 마코프 모델을 Figure 3에 나타내었다. S₀는 운용 중이고 사용이 가능한 상태이며, S₁은 고장으로 수리중인 상태이고, λ는 고장률, 그리고 μ는 수리율이다. 시간이 (t, t+dt)에서 고장의 조건부 확률은 λdt이고, (t, t+dt)에서 수리완료의 조건부 확률은 μdt이기 때문에 전이행렬은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{bmatrix} \quad (2)$$

시간 t에서 시스템이 운용중인 확률 즉, 가용도 A(t)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식에서 첫 번째 항은 정상상태를 나타내며, 두 번째 항은 과도상태를 나타낸다.

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3)$$

전이행렬을 Chapman-Kolmogorov 미분방정식을 통해 확률행렬로 변환하고[6], 이를 시간에 따라 반복하여 수행함으로써 특정 신뢰수준을 만족하는 분석 모델(MPS, Markov Process Simulator)을 C, C++, C# 언어를 사용하여 개발하였다.

3. 대상 시스템 및 모델링

궤도차량을 대상으로 가용도 분석을 수행하였으며, MPS를 활용한 가용도 분석을 위해서는 사전에 체계 수준의 운용개념이 필요하고, 운용개념에 필요한 입력 파라미터로는 OT(운용시간), ST(대기시간), AT(경계시간) 등을 포함한 TUT(총 가동시간)와 ALDT(행정 및 군수지연시간), TCM(고장정비시간) 등을 포함한 TDT(총 불가동시간)가 있다.

MPS에서는 각 상태 전이를 확률적으로 수행하기 위해 입력 파라미터를 시간 단위로 설정할 수 있게 구축하였으며, 운용, 경계, 대기, 고장, 수리 등 각 상태에 머문 시간과 횟수를 도출하고, 이를 바탕으로 가용도를 계산한다.

입력 파라미터 중 TUT 값은 OMS/MP를 통해 Table 1과 같이 나타내었으며 또한, MTBF와 MTTR은 각각 Table 2와 Table 3에 나타낸 바와 같이 RAM 분석보고서[7]에 있는 62개 품목을 대상으로 한 값을 활용하였고, ALDT는 RAM 분석보고서에서 일괄적으로 정의한 값인 156H를 입력값으로 사용하여 하위 레벨 구성품의 고장 및 수리 과정을 상태 모형으로 모델링하고, 구성품 고장에 따른 수리 파라미터는 기술교범 등을 참고로 산출하여, 보다 정교화된 결과를 도출하였다.

<Table 1> Total uptime of system

총 가동시간(TUT)		
운용시간(OT)	경계시간(AT)	대기시간(ST)
321 시간	279 시간	447 시간

<Table 2> Reliability of components

순번	명칭	MTBF(H)	순번	명칭	MTBF(H)	순번	명칭	MTBF(H)
1	동력장치	223.0	22	축압기 접근문	-	43	항법장치	9,692.6
2	연료탱크장치	1,800.0	23	차체마타매트 키트	11,326.2	44	포탑 전기장치	4,710.4
3	가속장치	21,000.6	24	조종수의자 장치	9,420.8	45	슬립링장치	29,647.9
4	배기덕트장치	63,001.7	25	승무원 의자장치	7,522.6	46	큐폴라장치	13,263.5
5	배기하우징장치	28,800.8	26	차체포탄 받침대장치	6,300.2	47	유압발생장치 접근문	-
6	차체전기장치	1,165.4	27	차체장약통 적치대장치	17,684.7	48	유압냉각장치 접근문	-
7	엔진실 전기장치	5,727.4	28	차체 부수장치	2,082.7	49	승무원 출입문	504,013.9
8	축전지실 전기장치	590.5	29	배수펌프장치	11,077.2	50	포탑 좌측문	-
9	전조등장치	1,221.9	30	난방장치	803.8	51	탄 적재문	201,605.6
10	변속장치	29,647.9	31	엔진실 소화장치	201,605.6	52	포반장의자 장착도	26,527.0
11	종감속기 장치	2,839.5	32	포탑 선회베어링장치	504,013.9	53	사수의자 장치	33,600.9
12	상용제동장치	504,013.9	33	곡사포와 포가조립체	192.2	54	포탑구조물 조립체	-
13	주차제동장치	50,401.4	34	포탑 유압발생장치	938.6	55	방향포경 방탄덮개장치	17,684.7
14	현수장치	415.9	35	고저구동/평형장치	2,666.7	56	포탑 부수장치	3,036.2
15	조향장치	42,001.2	36	포탑 선회구동장치	7,049.1	57	탄 적치대 접근문	1,008,027.8
16	동력발생장치 덮개장치	3,488.0	37	구동제어장치	8,765.5	58	가스입자여과기 장착도	4,561.2
17	승무원 환기장치	16,800.5	38	송탄제어장치	4,165.4	59	절연체/벌크 헤드막이장치	-
18	포신잠금장치	2,040.5	39	포탄이송장치	1,853.0	60	조종수 헤치 및 잠망경 덮개장치	11,859.2
19	차체구조물 조립체	3,000.1	40	포탑 탄 적치대 장치	2,181.9	61	차체뒤틀문과 견인핀틀 장치	10,839.0
20	방수덮개장치	17,684.7	41	자동사격통제장치 장착대	1,136.4	62	차체조립체 부수지원품목	-
21	흡반이 장치	1,723.1	42	수동사격 통제장치	91,638.9			

<Table 3> Maintainability of components

순번	명칭	MTTR(H)	순번	명칭	MTTR(H)	순번	명칭	MTTR(H)
1	동력장치	3.10	22	축압기 접근문	-	43	항법장치	6.00
2	연료탱크장치	0.86	23	차체마타매트 키트	2.14	44	포탑 전기장치	3.99
3	가속장치	1.09	24	조종수의자 장치	1.95	45	슬립링장치	2.63
4	배기덕트장치	0.65	25	승무원 의자장치	1.23	46	큐폴라장치	1.68
5	배기하우징장치	0.52	26	차체포탄 받침대장치	1.77	47	유압발생장치 접근문	-
6	차체전기장치	2.16	27	차체장약통 적치대장치	1.50	48	유압냉각장치 접근문	-
7	엔진실 전기장치	5.31	28	차체 부수장치	1.88	49	승무원 출입문	0.81
8	축전지실 전기장치	2.39	29	배수펌프장치	1.03	50	포탑 좌측문	-
9	전조등장치	1.43	30	난방장치	2.34	51	탄 적재문	1.09
10	변속장치	1.08	31	엔진실 소화장치	0.57	52	포반장의자 장착도	1.13
11	종감속기 장치	2.50	32	포탑 선회베어링장치	1.49	53	사수의자 장치	1.47
12	상용제동장치	0.47	33	곡사포와 포가조립체	2.59	54	포탑구조물 조립체	-
13	주차제동장치	0.75	34	포탑 유압발생장치	2.83	55	방향포경 방탄덮개장치	1.33
14	현수장치	4.60	35	고저구동/평형장치	8.76	56	포탑 부수장치	1.86
15	조향장치	0.77	36	포탑 선회구동장치	3.73	57	탄 적치대 접근문	-
16	동력발생장치 덮개장치	2.16	37	구동제어장치	4.56	58	가스입자여과기 장착도	2.61
17	승무원 환기장치	1.67	38	송탄제어장치	5.37	59	절연체/벌크 헤드막이장치	-
18	포신잠금장치	2.03	39	포탄이송장치	6.76	60	조종수 헤치 및 잠망경 덮개장치	1.42
19	차체구조물 조립체	1.95	40	포탑 탄적치대 장치	2.63	61	차체뒤틀문과 견인핀틀 장치	1.08
20	방수덮개장치	1.73	41	자동사격통제장치 장착대	4.23	62	차체조립체 부수지원품목	-
21	흡반이 장치	2.56	42	수동사격 통제장치	6.01			

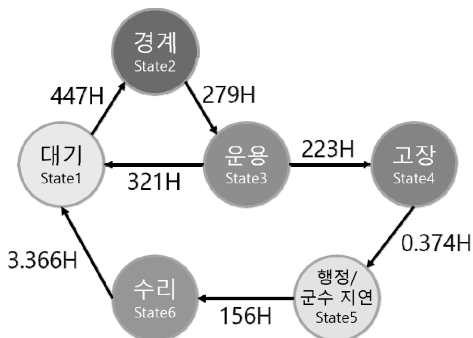
궤도차량이 임무를 수행하기 위해서는 임무가 끝날 때까지 가동상태에 있어야 하고, 만일 불가동 상태라면 고장난 구성품들을 수리한 후 가동 상태로 만들고 임무를 재수행해야 한다.

또한, 본 모델과 같이 상태의 수가 많아 다이어그램을 작성하기 어려운 조건에서는 Figure 4와 같이 엑셀을 이용하여 전이행렬을 작성할 수 있다.

전이행렬 모델에서 각 셀의 숫자들은 시간단위이고, 해당 행의 State번호에서 열의 State번호까지 소요되는 시간을 나타내며, 시뮬레이션을 수행할 때는 이 값들이 고장률, 수리율 등으로 바뀌어 확률로 계산된다. Figure 4와 Figure 5에서 State1은 대기, State2는 경계, State3은 운용 상태를 나타내며 이후의 State들은 Table 2와 Table 3의 순서대로 각 LRU마다 고장, 행정 및 군수 지연시간, 수리의 3가지 불가동 상태를 나타낸다. 첫 번째 LRU인 동력장치를 예시로 Figure 4의 확대된 부분을 Figure

	State1	State2	State3	State4	State5	State6
State1	0	447	0	0	0	0
State2	0	0	279	0	0	0
State3	321	0	0	160	0	0
State4	0	0	0	0	0.374	0
State5	0	0	0	0	0	156
State6	3,366	0	0	0	0	0

[Figure 4] Transient Matrix Modeling



[Figure 5] Transient State Modeling

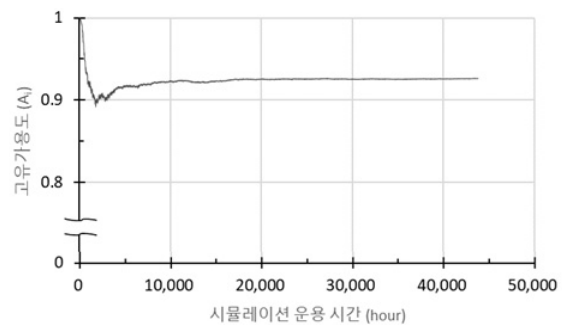
5에 나타냈으며, State1에서 State2로의 이동에 447시간은 이는 대기상태에서 447시간이 소요 된 후 경계상태로 전환됨을 의미하고, State 2에서 State 3으로의 이동에 279시간은 경계상태에서 279시간이 경과된 후 운용상태로 전환됨을 표시하고 있다.

4. 결과 및 고찰

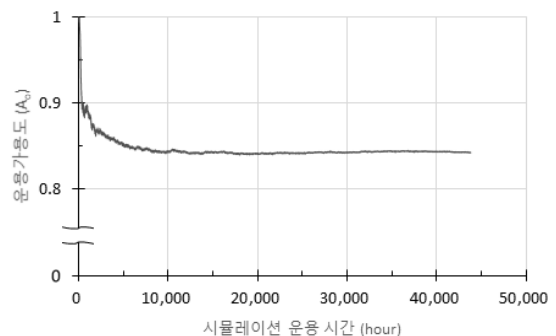
MPS를 활용한 고유가용도와 운용가용도의 분석 결과는 Table 4와 같다. 고유가용도는 체계의 신뢰도(MTBF)와 정비도(MTTR)를 바탕으로 계산된 결과이며, 행정 및 군수 지연시간, 예방정비 등 실제 운용환경에서 소요되는 시간을 고려한 운용가용도보다 높음을 확인할 수 있다. 또한, 시간에 따른 가용도의 변화량은 Figure 6 및 Figure 7과 같으며, 최초 운용시에는 시스템이 100%의 가용도를

<Table 4> Availability Analysis Results

시뮬레이션 시간	고유가용도(%)	운용가용도(%)
5년	92.6	84.3



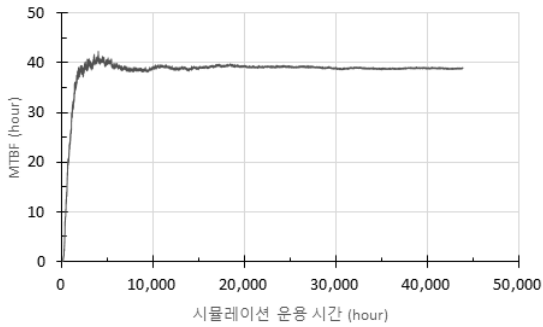
[Figure 6] Estimation Results of A_1 Trend Line



[Figure 7] Estimation Results of A_2 Trend Line

<Table 5> Reliability Analysis Result

시뮬레이션 시간	총 운용시간 (H)	총 고장수 (건)	MTBF (H)
5년	1676.4	43.3	38.8



[Figure 8] Estimation Results of MTBF Trend Line

표시하나, 운용 시간이 증가함에 따라 고장 발생의 영향으로 가용도가 감소하고, 일정시점 이후에는 안정화된 가용도를 나타낸다. 이와 같이, 마코프 프로세스는 시간의 흐름에 따른 분석기법으로 과도상태와 정상상태를 모두 관찰할 수 있다는 특징이 있고, 이때 과도상태에서 정상상태로 전환될 때까지 소요되는 기간은 시스템의 파라미터(MTBF, MTTR, ALDT 등)에 따라 상이하며, 본 논문의 대상 시스템은 과도상태에서 약 15,000H(2년) 이후 정상상태로 전환됨을 알 수 있다. 이때 정상상태 도달에 대한 판단은 가용도의 샘플링 편차가 1% 이내인 기간으로 고려하였다.

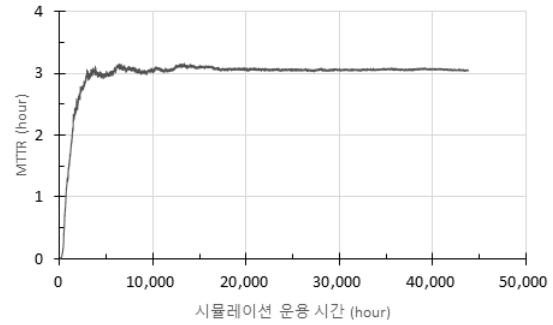
체계 신뢰도 분석 결과는 Table 5 및 Figure 8 과 같이 나타낼 수 있다. 시뮬레이션 시간동안 총 운용시간은 1676.4H이며, 이때 총 고장 수는 43.3 건이고, MTBF는 38.8H로 도출되었다[7].

MPS의 정비도 분석 결과는 Table 6 및 Figure 9 와 같이 나타낼 수 있으며, 5년의 시뮬레이션 시간 동안 총 고장수는 43.3건이 발생하였고, 총 고장정비 시간은 132H, 평균 고장정비시간은 3.1H로 산출되었다.

S/W의 유효성 검증을 위해 RAM 분석보고서와 MPS의 결과를 비교하였다. 정량적인 가용도 비교 결과는 Table 7과 같으며, 고유가용도는 2.6%, 운

<Table 6> Maintainability Analysis Result

시뮬레이션 시간	총 고장수 (건)	TPM (H)	TCM (H)	MTTR (H)
5년	43.3	761	132	3.1



[Figure 9] Estimation Results of MTTR Trend Line

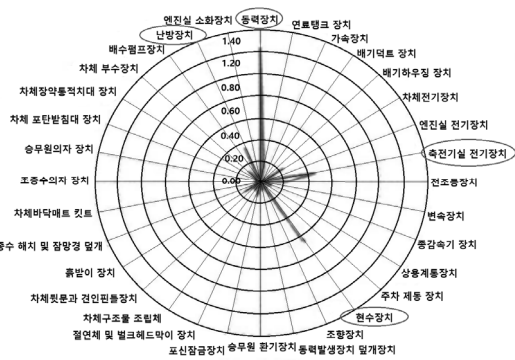
<Table 7> Comparison of Availability Analysis Results

구분	고유가용도(%)	운용가용도(%)
RAM 분석보고서	90.0	85.5
MPS	92.6	84.3

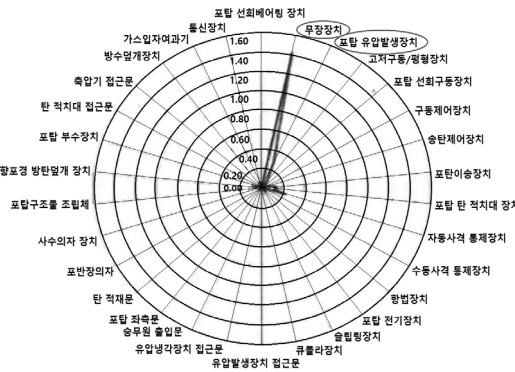
용가용도는 1.2%의 편차를 보였다. 모델링 시뮬레이션 공학에서는 3% 이내 오차의 경우 매우 정확한 결과로 생각하며 [8], 이러한 RAM 분석보고서를 통한 유효성 검증 결과로 부터 MPS를 통한 궤도차량의 가용도 분석은 타당하다고 판단된다.

마지막으로, RAM 분석보고서와 MPS 분석 결과의 고장품목 비교를 수행하였다. RAM 분석보고서에 따른 궤도차량의 차체분야 및 포탑분야 장치별 고장 수를 Figure 10 및 Figure 11에 나타냈으며 다빈도 고장품목을 빨간색 원으로 표시하였다. 차체분야에서는 동력장치, 전기장치, 현수장치, 난방장치가 주요 고장품목이고, 포탑분야에서는 무장장치가 주요 고장품목이다.

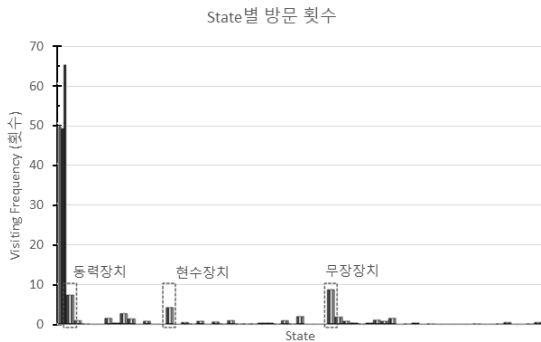
MPS는 Figure 12와 같이 각 상태에 머문 횟수를 이용하여 다빈도 고장품목을 식별할 수 있으며, 가장 고장이 많이 났던 품목은 동력장치, 현수장치, 무장장치이다. 이는 RAM 분석보고서의 결과와 동일하며, MPS를 통한 시뮬레이션 결과값으로 고장 품목을 식별할 수 있음을 보여준다.



[Figure 10] Number of Breakdowns per Device of Hull



[Figure 11] Number of Breakdowns per Device of Turret



[Figure 12] Graph of Visits per Status

5. 결론

마코프 프로세스를 기반으로 한 RAM 분석 시뮬레이션 소프트웨어인 MPS를 개발하여 궤도차량을 대상으로 유효성을 검증하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 마코프 프로세스를 활용하여 시스템의 정상상태뿐만 아니라, 특정시점에서의 RAM 분석이 가능하다.
- 2) 궤도차량을 대상으로 가용도 분석결과, RAM 분석보고서 대비 고유가용도는 약 2.6%, 운용가용도는 1.2%의 미미한 오차를 보였으며, 이를 통해 유효성을 검증하였다.
- 3) MPS를 통해 산출된 결과물 중 상태별 방문 횟수 그래프를 통해 다빈도 고장품목을 파악할 수 있으며, 이를 활용하여 설계대안 지침을 제공할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 논문은 방위사업청과 국과연의 지원(RAM 특화연구실, UD150042AD)을 받아 수행된 연구 결과임.

References

1. Kim Jin Hoon, Lee Dong Wook, "Application of Systems Engineering in SURION R&D Project", Journal of the Korea Society of Systems Engineering Vol. 10, No. 1, pp. 81-86, 2014.
2. Kim Bo Hyeon, Hur Jang Wook, "A Study on the System Engineering Standard Applicable to Defense Program", Journal of the Korea Society of Systems Engineering Vol. 12, No. 2, pp.1-8, 2016.
3. DoD, "RAM Guide Book", 2000.
4. Park Cheol-Hoon, Song Ki-Ho, Nam Dong-Kyong, "Probability Process", Life and Power Press, pp. 112-143, 2004.
5. Carter C.M. "Operational Availability Estimation, Modeling, and Analysis", Reliability Hotwire, Issue, 2007.
6. Oliver Ibe, "Markov Processes For Stochastic

- Modeling 2nd Edition”, Elsevier, pp. 57–78, 2013.
7. Defence Agency for Technology and Quality, “OO RAM Analysis Report”, pp. 121–134, 2015.
8. Seon Han Choi, Kyung–Min Seo, Se Jung Kwon, Tag Gon Kim, "Multi–fidelity Modeling and Simulation Methodology to Enhance Simulation Performance of Engineering–level Defense Model", Journal of the Korea Society for Simulation Vol. 22, No. 4, pp. 67–82, 2013.