

Markov Process 기반 RAM 모델에 대한 파라미터 민감도 분석

김영석* 허장욱

금오공과대학교 기계시스템공학과

Parametric Sensitivity Analysis of Markov Process Based RAM Model

Yeong Seok Kim*, Jang Wook Hur

Kumoh National Institute of Technology

Abstract : The purpose of RAM analysis in weapon systems is to reduce life cycle costs, along with improving combat readiness by meeting RAM target value. We analyzed the sensitivity of the RAM analysis parameters to the use of the operating system by using the Markov Process based model (MPS, Markov Process Simulation) developed for RAM analysis. A Markov process-based RAM analysis model was developed to analyze the sensitivity of parameters (MTBF, MTTR and ALDT) to the utility of the 81mm mortar. The time required for the application to reach the steady state is about 15,000H, which is about 2 years, and the sensitivity of the parameter is highest for ALDT. In order to improve combat readiness, there is a need for continuous improvement in ALDT.

Key Words : RAM parameter, Operation Available, Markov Process, Sensitivity Analysis, M&S Technique, Markov Chain

Received: March 23, 2018 / **Revised:** July 16, 2018 / **Accepted:** July 20, 2018

* 교신저자 : Yeong Seok Kim, rladudtjr4466@gmail.com

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

RAM은 Reliability(신뢰도), Availability(가용도), Maintainability(정비도)의 3가지 요소를 의미하며, 무기체계나 장비의 고장을 최소화하고, 고장발생 시 정비시간 단축을 통해 장비의 운용가용도를 향상시키기 위한 활동이다. 무기체계나 장비의 탐색개발 및 체계개발 초기 단계에서 이루어지는 RAM 목표 값 설정은 체계개발 간 신뢰도와 정비도에 대한 할당 및 예측의 기준이 되어 중요한 기준선으로 고려되고 있다.

특히 운용가용도는 무기체계나 장비가 실질적인 운용조건하에서 만족스럽게 작동할 확률로 정의하며, 운용시간, 경계시간, 대기시간, 행정 및 군수 지원시간, 고장 및 예방 정비시간 등을 포함한 가용도이다. 현실적으로 행정업무 처리시간이나 부품조달 시간 등을 배제할 수 없고, 이러한 요인들에 의한 시간지연은 다소 차이는 있지만 필수 불가결한 요소이므로 운용가용도는 현실적인 지원상황하에서 규정된 조건으로 체계가 가동될 확률이라고 할 수 있다.

이러한 운용가용도는 전투준비태세와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 미국 등 주요 선진국은 운용가용도 산출에 있어 정상상태뿐만 아니라 임의 시점 특정상태의 결과 확인이 가능한 Markov Process(마코프 프로세스)의 적용을 지침서에 반영하고 있으나[1], 우리나라는 정상상태만을 고려하는 수리적 방법을 주로 사용하고 있으며[2], 일부 활용하고 있는 M&S 기법도 정상상태만을 반영하고 있다[3].

따라서 본 연구에서는 정상상태와 특정상태 모두를 반영할 수 있는 마코프 프로세스 기반 RAM 분석 모델(MPS, Markov Process Simulation)을 개발하여 운용가용도에 미치는 파라미터(MTBF, MTTR, ALDT)의 민감도를 분석하였으며, 민감한 요소에 대한 개선 등으로 효율성을 추구하여 전투준비태세 향상에 기여토록 하였다.

2. Markov Process 시뮬레이터 개발

미래의 상태가 현재의 상태에 의해서만 결정되고, 과거와는 독립적인 랜덤 프로세스를 마코프 프로세스라고 하며, 과거의 상태를 기억하지 않는다는 점에서 비 기억 프로세스(Memoryless Process)라고도 한다. 임의의 시간 $t_1 < t_2 < \dots < t_k < t_{k+1}$ 에 대해 $X(t)$ 가 이산값이면, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P[X(t_{k+1}) = x_{k+1} | X(t_k) = x_k, \dots, X(t_1) = x_1] \\ = P[X(t_{k+1}) = x_{k+1} | X(t_k) = x_k] \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, $X(t)$ 가 연속값이면, 식 (2)와 같이 마코프 성질이 기술된다.

$$\begin{aligned} P[a < X(t_{k+1}) \leq b | X(t_k) = x_k, \dots, X(t_1) = x_1] \\ = P[a < X(t_{k+1}) \leq b | X(t_k) = x_k] \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식에서 t_k 는 현재, t_{k+1} 은 미래, 그리고 t_1, \dots, t_{k-1} 은 과거의 시점이며, 시간 t 에서 $X(t)$ 의 값을 상태(state)라고 정의한다. 이때, 마코프 프로세스의 값이 정수이면 마코프 체인(Markov Chain)이라고 하며, 마코프 체인은 t 가 이산적이냐 연속적이냐에 따라 이산시간 마코프 프로세스(Discrete-time Markov Process)와 연속시간 마코프 프로세스(Continuous-time Markov Process)로 나누어진다. $X(t)$ 가 마코프 체인일 때, 조건부 확률과 마코프 성질을 이용하면 임의의 시점에서 조인트 확률(Joint Probability)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P[X(t_3) = x_3, X(t_2) = x_2, X(t_1) = x_1] \\ = P[X(t_3) = x_3 | X(t_2) = x_2] \times \\ P[X(t_2) = x_2 | X(t_1) = x_1] \\ \times P[X(t_1) = x_1] \end{aligned} \quad (3)$$

이를 확장하면 식 (4)와 같이 된다.

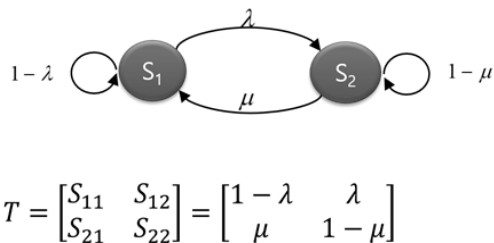
$$\begin{aligned}
 &P[X(t_{k+1}) = x_{k+1}, X(t_k) = x_k, \dots, X(t_1) = x_1] \\
 &= P[X(t_{k+1}) = x_{k+1} | X(t_k) = x_k] \times \\
 &P[X(t_k) = x_k | X(t_{k-1}) = x_{k-1}] \times \dots \times \\
 &P[X(t_2) = x_2 | X(t_1) = x_1] \times P[X(t_1) = x_1] \quad (4)
 \end{aligned}$$

일반적인 확률의 문제에서는 시간적인 개념을 고려하지 않지만 시간에 따라 나타나는 현상들이 확률적인 성격을 갖는 경우가 많이 있으며, 시간을 고려한 확률변수들의 집합을 확률과정이라고 한다. 시간을 고려한 확률이론은 동적이라고 볼 수 있으며, 이러한 성질을 이용하여 시스템의 시간을 고려한 신뢰성 분석으로 마코프 프로세스 기법이 활용되고 있다. 마코프 프로세스는 확률 과정이 모든 $x(u), 0 \leq u \leq s$ 에 대하여 식 (5)와 같은 조건을 만족해야 한다.

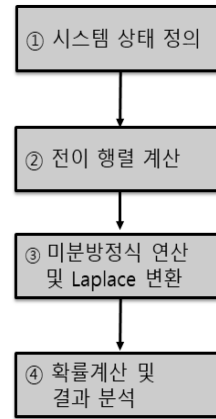
$$\begin{aligned}
 &P[X(t+s) = j | X(s) = i, X(u) = k, 0 \leq u < s] \\
 &= P[X(t+s) = j | X(s) = i] \quad (5)
 \end{aligned}$$

마코프 프로세스의 과정을 간단히 표현하면 Figure 1과 같이 나타낼 수 있으며, 이산 마코프 프로세스의 미분과 전이 매트릭스를 통해 연속시간 마코프 프로세스의 확률값을 구할 수 있다. Figure 1에서 λ 는 고장률을 나타내며 μ 는 수리율을 의미하고, 천이행렬(T)의 상태값 S는 상태가 일어날 확률을 표시하고 있다[4].

마코프 프로세스 기반의 시뮬레이션 분석절차를 Figure 2와 같이 나타내었으며, 서로 다른 상태로 전이될 확률을 이용하여 시스템 상태를 정의한 후 각각의 상태에서 다음 상태로 넘어가는 시간에 대해 전이행렬로 입력한다. 입력된 행렬값은 미분방정



[Figure 1] Markov analysis basic model



[Figure 2] Markov analysis procedure

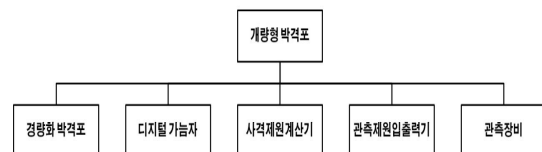
식 연산 및 Laplace 변환으로 확률계산을 하고 결과를 분석한다.

C, C#, C++ 언어를 기반으로 마코프 프로세스의 개념을 적용한 RAM 분석용 소프트웨어인 MPS (Markov Process Simulation)를 개발하였다. MPS는 각각의 상태를 정의하여 다음 상태가 일어날 사건을 설정하고, 시뮬레이션 시간, 시뮬레이션 반복횟수, 운용시간, 경계시간, 대기시간, 수리시간, 행정 및 군수 지연시간, 예방정비 시간 등을 입력한 후 시뮬레이션을 수행하며, 시뮬레이션 산출물은 각각의 상태별 방문빈도 및 머문시간과 함께 시스템 수준의 주요 파라미터인 가용도(A_r, A_c, A_o)와 신뢰도(MTBF) 및 정비도(MTTR) 등을 표시토록 하였다.

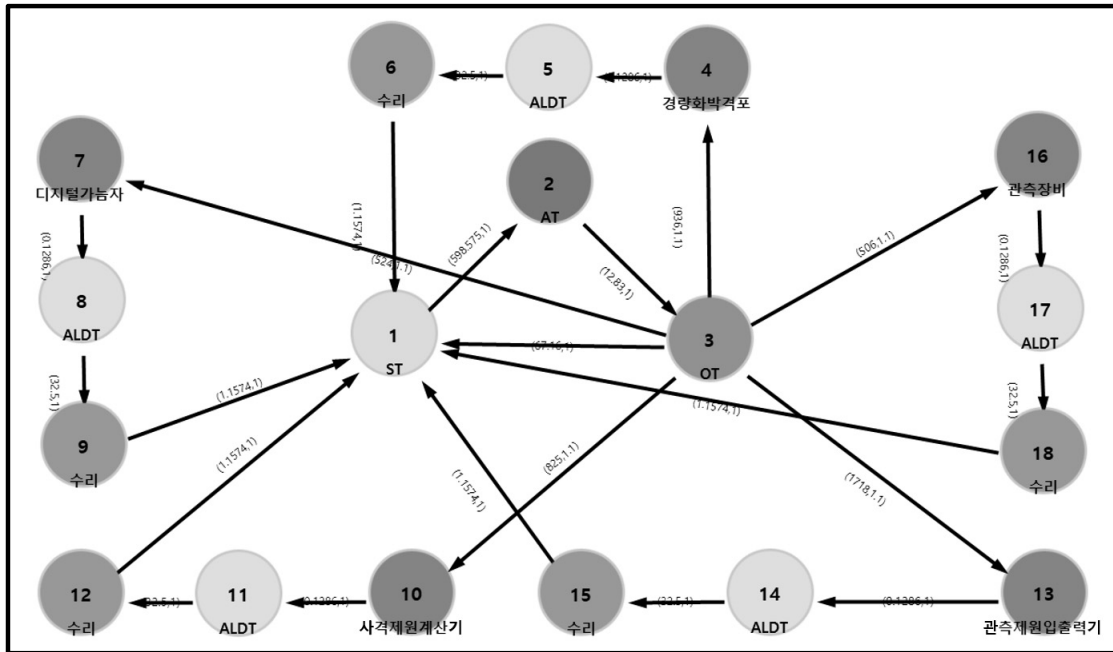
3. 상태 모델링과 민감도 분석방법

3.1 대상 시스템 모델링

RAM 분석을 위해 개발한 MPS의 민감도 분석을 위한 대상으로 박격포를 선정하였으며, 81mm 개량형 박격포의 시스템 구성은 Figure 3과 같다. 81mm 개량형 박격포는 경량화 박격포, 디지털 가늠



[Figure 3] Components of mortar



[Figure 4] MPS modeling of mortar

자, 사격제원계산기, 관측제원 입출력기 및 관측장비의 5가지 구성품으로 구분할 수 있다.

구성품별 가동 및 불가동 상태에 따른 모델링을 Figure 4와 같이 표시하였다. 그림에서 운용, 대기 및 경계로 표시된 부분은 임무수행이 가능한 가동 상태이고, 고장, ALDT, 수리로 표시된 부분은 불가동상태이다. 박격포의 운용가용도를 산출하기 위해 RAM 분석 결과보고서에 따라 MTBF는 66.5H, MTTR은 1.3H 및 ALDT는 32.4H로 설정하였다.

3.2 민감도 분석

무기체계나 장비의 성능에 미치는 설계변수의 영향성은 각기 다르기 때문에 설계변수의 변화가 무기체계나 장비의 성능에 미치는 정도를 민감도로 정의하며, 민감도 분석 기법은 한 번에 하나의 변수를 변화시켜 가며 표본을 추출하고, 결과들에 대한 데이터를 비교하여 분석하는 선별기법을 적용하였다. 이 방법은 대상모델의 응답에 주요한 영향을 주는 인자를 찾을 수 있는 장점이 있으며, 시뮬레이션 결과의 편차 분석을 용이하게 하기 위하여 회귀분

석에 의한 추세를 적용하였다. 추세선 형식은 결정계수(R^2)를 고려하였으며, 이때, 결정계수란 회귀분석이 실제 데이터를 얼마나 잘 설명하고 있는가를 표시하고, 결정계수(R^2)의 산출방법은 식 (6)과 같다[8].

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \tag{6}$$

SSR : 회귀에 의하여 설명되는 편차의 제곱합

SST : 총편차의 제곱합

SSE : 잔차들의 제곱합

또한 민감도 분석의 이론적 타당성을 확인하기 위하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀 모델은 $y=f(x) + \epsilon$ 이라는 형태로 표현되며, 종속변수를 독립변수와 오차항의 선형결합으로 나타낼 수 있는 선형 회귀분석 모델을 사용하였고, 종속 변수가 2가지 이상인 경우에는 다중 회귀분석 모델을 적용하였다. 회귀분석 방법에서 주요 RAM 분석 파라미터인 MTBF, MTTR 및 ALDT를 사용하여 p-값과 R-제곱 및

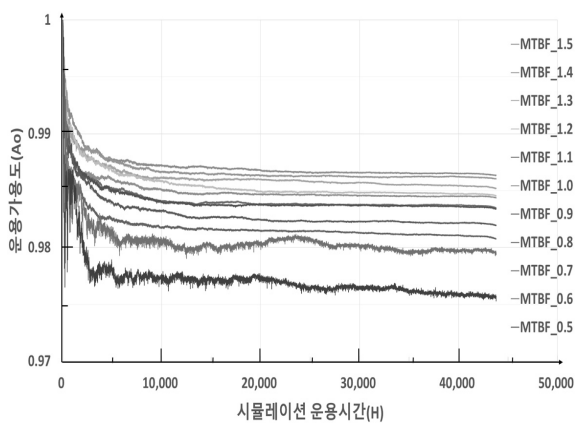
회귀방정식을 도출하였다. 이를 통하여 각 파라미터에 대한 민감도를 통계적으로 검증하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

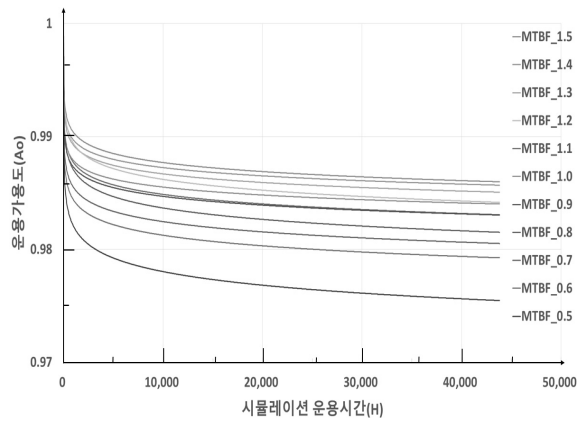
마코프 프로세스 기반 RAM 분석 모델을 이용하여 주요 RAM 파라미터인 MTBF, MTTR 및 ALDT에 대해 10%씩 변경하였을 때, 81미리 개량형 박격포 시스템의 시간에 따른 운용가용도의 변화를 Figure 5, Figure 6 및 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 추세선 분석결과는 시뮬레이션 결과에 대해 결정계수(R^2)가 1에 가장 가까운 로그함수를

적용하였으며, 이때 R^2 은 0.60 ~ 0.90의 범위에 있었고, 이러한 결과는 Figure 5, Figure 6 및 Figure 7에서 모두 유사한 결과가 도출되었다. 각각의 추세선 분석 결과로부터 정상상태 도달까지의 시간과 정상상태의 운용가용도를 Table 1에 나타내었다. 정상상태의 기준은 운용가용도와 시뮬레이션 최종시간 운용가용도의 차이가 1% 이내인 경우로 정의하였으며, 이 때, 박격포의 정상상태까지 도달시간은 약 15,000H을 보였고, 이는 약 2년으로 추정할 수 있다.

박격포의 정상상태 운용가용도를 대상으로 MTBF, MTTR 및 ALDT를 -50 ~ +50% 범위에서 10%

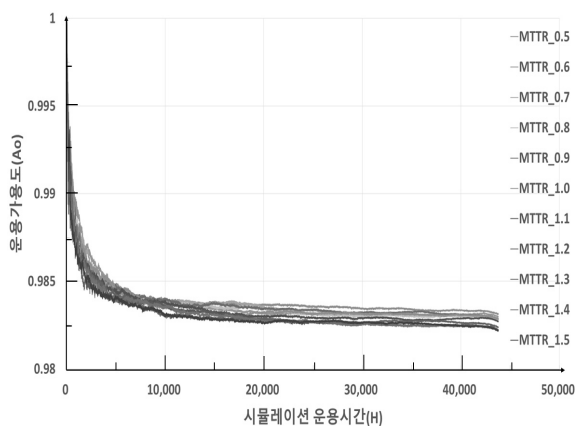


(a) Simulation result

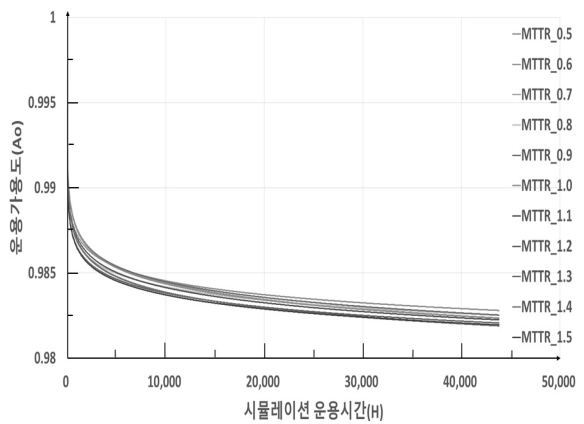


(b) Trend analysis result

[Figure 5] Operational availability according to MTBF change

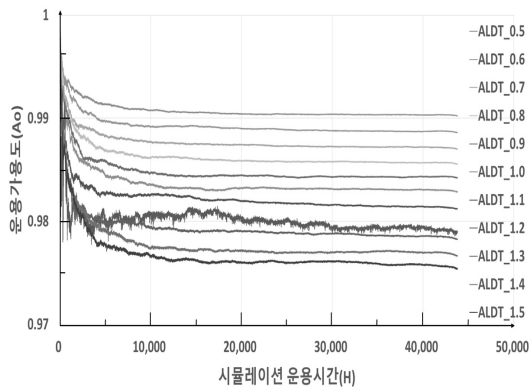


(a) Simulation result

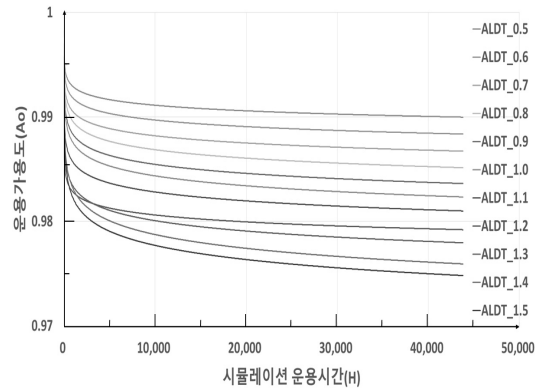


(b) Trend analysis result

[Figure 6] Operational availability according to MTTR change



(a) Simulation result

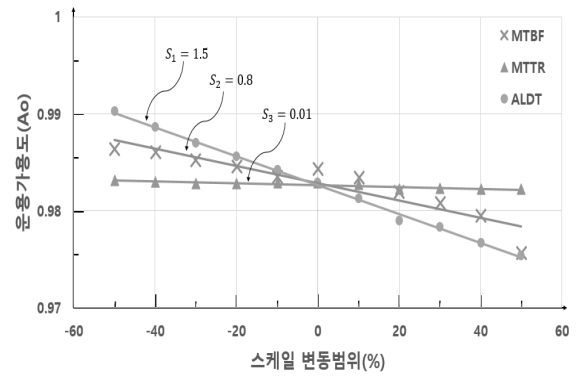


(b) Trend analysis result

[Figure 7] Operational availability according to ALDT change

<Table 1> Reaching time and A_o in steady state

구분	시간(H)	운용가용도(%)	
기본값	1.0	15,000	98.47
MTBF	50% ↓	15,000	98.70
	40% ↓	15,000	98.64
	30% ↓	15,000	98.60
	20% ↓	15,000	98.53
	10% ↓	15,000	98.39
	0%	15,000	98.47
	10% ↑	15,000	98.38
	20% ↑	15,000	98.27
	30% ↑	15,000	98.16
	40% ↑	15,000	98.02
	50% ↑	15,000	97.74
MTTR	50% ↓	15,000	98.39
	40% ↓	15,000	98.34
	30% ↓	15,000	98.38
	20% ↓	15,000	98.35
	10% ↓	15,000	98.38
	0%	15,000	98.32
	10% ↑	15,000	98.33
	20% ↑	15,000	98.32
	30% ↑	15,000	98.29
	40% ↑	15,000	98.32
	50% ↑	15,000	98.29
ALDT	50% ↓	15,000	99.06
	40% ↓	15,000	98.92
	30% ↓	15,000	98.75
	20% ↓	15,000	98.61
	10% ↓	15,000	98.44
	0%	15,000	98.32
	10% ↑	15,000	98.22
	20% ↑	15,000	98.11
	30% ↑	15,000	97.91
	40% ↑	15,000	97.72
	50% ↑	15,000	97.62



[Figure 8] A_o according to scale change of parameters

씩 변경하였을 때의 결과를 Figure 8에 나타내었다. 스케일 변동에 따른 박격포의 운용가용도는 ALDT가 가장 민감하였으며, 운용가용도 변화는 3% 수준을 표시하였다.

데이터의 회귀분석으로 인한 각 파라미터에 대한 회귀방정식은 식 (7) ~ (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_o = 0.95873 + 0.000437 \times MTBF \quad (7)$$

$$A_o = 0.984420 - 0.000001 \times MTTR \quad (8)$$

$$A_o = 0.99852 - 0.000476 \times ALDT \quad (9)$$

주요 RAM 파라미터인 MTBF, MTTR 및 ALDT에 대한 식 (7) ~ (9)에 대한 통계적 검증을 위해 p-값을 MINITAB의 회귀분석 도구를 사용하여 도출하였으며, p-값은 모두 0.00이 계산되었다. 이는

<Table 2> R-squared of parameters by regression analysis

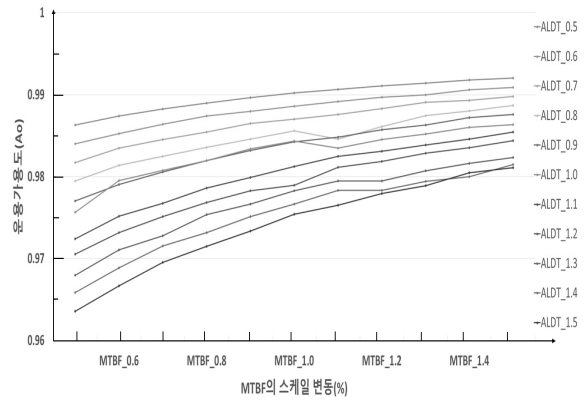
변수	R-제공	R-제공 (수정)	R-제공 (예측)	ALDT	MTTR	MTBF
1	98.43	98.24	96.90	X		
1	92.39	91.44	85.89			X
1	35.04	26.92	0		X	
2	94.83	94.74	94.46	X	X	
2	99.83	99.83	99.83	X		X

식(7) ~ (9)에 대한 통계적 검증이 유의하다는 것을 보여주며, MTBF, MTTR 및 ALDT 모두 운용가용도의 민감도에 영향을 주는 인자임을 표시하고 있다.

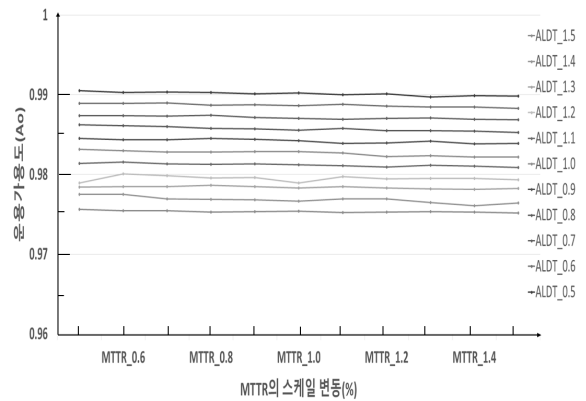
정상상태의 운용가용도를 Figure 8에 나타내었다. ALDT의 기울기($s_1 = 1.5$)가 MTBF 및 MTTR의 기울기($s_2 = 0.8$, $s_3 = 0.01$)보다 큰 기울기를 표시하고 있으며, 이로부터 주요 RAM 분석 파라미터의 민감도는 ALDT가 가장 높음을 알 수 있다.

ALDT, MTTR 및 MTBF의 변수를 적용하여 R-제공에 대한 통계적 검증결과를 Table 2에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 ALDT, MTBF, MTTR 순으로 높은 R-제공값을 나타내며, ALDT와 MTBF의 스케일을 동시에 조정할 때가 ALDT와 MTTR의 스케일을 동시에 조정할 때보다 큰 R-제공값을 보였다.

MTTR을 고정한 상태에서 ALDT와 MTBF의 스케일 변경을 통하여 운용가용도의 변화를 Figure 9에 나타내었다. MTBF가 증가할수록 ALDT의 영향성이 감소됨을 알 수 있으며, 이는 상대적으로 낮은 운용가용도에서는 ALDT의 민감도가 더욱 커지고 있음을 나타내고 있다. 또한, MTBF를 고정한 상태에서 ALDT와 MTTR의 스케일 변경을 통하여 운용가용도의 변화를 Figure 10에 나타내었다. MTTR의 변경과 관계없이 운용가용도는 일정하였으며, 이는 운용가용도에 MTTR이 민감하지 않기 때문으로 보여진다.



[Figure 9] A_0 according to change of MTBF and ALDT (MTTR fixed)



[Figure 10] A_0 according to change of MTTR and ALDT (MTBF fixed)

5. 결론

마코프 프로세스 기반 RAM 분석 모델을 개발하여 81미리 개량형 박격포의 운용가용도에 미치는 파라미터(MTBF, MTTR 및 ALDT)의 민감도를 분석하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 박격포가 야전에 배치된 이후 운용가용도가 정상상태에 도달하는 시간은 약 15,000H으로 약 2년이 소요된다.
- 2) 박격포의 운용가용도에 영향을 미치는 민감도는 ALDT가 가장 높은 것으로 나타났다.
- 3) 전투준비태세 향상을 위해서는 운용가용도에 가장 민감한 ALDT에 대한 관심과 함께 지속적인 제도개선이 필요하다.

후 기

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

References

1. "DoD Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability", DoD, pp. 6-27, 2005.
2. Practical Guidebook of Reliability Analysis of Weapon System. "Reliability prediction standards and methods", Republic of Korea Army, pp. 7-16, 2018.
3. "Defense Business Management Regulations", DAPA, pp. 55-85, 2018.
4. Oliver Ibe, "Markov Processes For Stochastic Modeling 2nd Edition", Elsevier, pp. 49-102, 2013.
5. Lee Yong-Kwan, Jung Jae-Cheon, Ohaga, Eric Owino, "Systems Engineering approach to Reliability Centered Maintenance of Containment Spray Pump", Journal of the Korea Society of Systems Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 65-84, 2013.
6. Choi Yo-Chul, "Introduction of RAMS and Certificate Process for Railway System based on International Standard and Practices", Journal of the Korea Society of Systems Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 55-61, 2008.
7. Lee Seong-Gwon, Min Kyong-Se, Jeon Seo-Tak, Jung Kye-Young, "Study on the RAM Application of a Light Rail Transit Business, According to the Technique Application in System Engineering", Journal of the Korea Society of Systems Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 13-19, 2011.
8. Min Jae-Hyung, Lee Gun-Hee, "Easy to understand statistics", booknet, pp. 391-470, 2014.