

# 무기체계 RAM 시뮬레이션의 정확도 향상을 위한 요소별 영향 분석

## Effect Analysis of Factors for Improving Accuracy of RAM Simulation in Weapon System

정 일 한\*      박 삼 준\*\*  
Chung, Il-Han      Park, Sam-Joon

### ABSTRACT

In the development stage of weapon system, it is important to analyze RAM(Reliability, Availability and Maintainability) characteristics. RAM simulation is one of the advanced techniques for analyzing RAM to overpass the limit of mathematical techniques. However, it is necessary to obtain correct input data for reliability and maintainability about target and support system to get highly accurate results through RAM simulation. In this study, we propose the technical method to improve the results by defining input data of simulation more correctly based on analyzing effects of RAM characteristics by major factors.

주요기술용어(주제어) : Simulation(시뮬레이션), RAM(신뢰도/가용도/정비도), 고장분포, 정비/보급 체계

### 1. 머리말

최근의 무기체계는 보유하고 있는 기능과 체계를 지원하는 지원 체계의 복잡성이 계속적으로 증가하고 있으며, 이는 체계 측면에서 RAM 특성 산출을 어렵게 만들었다. 운용가용도는 앞에서 언급한 신뢰도, 정비도와 정비자원에 대한 모든 정보를 기반으로 산출하게 된다. 이로 인해 과거에 사용되었던 RAM 분석 기법과 이론을 현대의 무기체계에 적용하는데 적합하지 않은 점이 많게 되었다. 즉, 무기체계가 운용되는

환경과 지원하는 체계를 반영하는데 기술적으로 현대 무기체계의 RAM 특성을 판단할 때 한계를 갖게 된 것이다. 특히, 과거에는 분석기법이 수리적인 방법을 활용하는 데에만 집중되어 있었으며, 무기체계의 특성을 정확히 분석에 반영하기 보다는 모델링이 가능한 부분만의 무기체계 특성을 분석하여 결과를 도출하는 방식이었다.

운용가용도와 관련하여 대부분의 연구는 가용도 산출을 위한 수리적인 분석 기법 보다 운영 체계에 대한 가용도 향상을 위한 대안 또는 운용가용도 산출을 위한 적용 방안을 다루고 있다. 장대익등<sup>[1]</sup>은 KOMPSAT 관계 시스템에 대한 운용 가용도를 산출하였으나, 정비지연시간에 대해서는 상수로 가정하였으며, 신주환 등<sup>[2]</sup>은 수중유도무기체계의 운용가용도 향상을 위한 정비지원체계를 구성하는 방안에 대한 연구를 하였으

† 2008년 10월 30일 접수~2008년 12월 12일 게재승인

\* 현대로템(주) 기술연구소

\*\* 국방과학연구소(ADD) 전산정보센터

주저자 이메일 : ihchung@hyundai-rottem.co.kr

며, 운용가용도 산출을 위한 방안은 제시하지 않고 있다.

RAM과 관련하여 대부분의 수리적인 분석 기법은 신뢰성 분석과 정비정책 결정에 초점이 맞추어져 있으며, 체계의 가용도 산출을 위한 방안은 수리적인 복잡성으로 인해 많은 연구가 되지 못하였다. 수리적으로 운용 가용도를 산출하는 것은 일부 수리부속 소요 산출과 관련하여 연구가 수행되어지고 있다.

대표적으로, 정비지원체계에서 수리부속에 대한 체계의 가용도 위하여 Shebrooke<sup>[3]</sup>은 단층구조 다계단 지원체계(single indenture multi echelons) 상황에서 METRIC 모형을 개발하였으며, Slay<sup>[4]</sup>는 METRIC을 기초로 하여 VARI-METRIC 모형, Graves<sup>[5]</sup>는 VARI-METRIC 모형에서 근사적으로 해를 찾는 방법을 연구하였다. 이러한 연구에서는 가용도 계산을 위하여 체계가 부재고가 발생한 시간을 고려하였다. de Smidt-Destombes<sup>[6]</sup>은 k-out-of-n구조에서 가용도를 기준으로 수리부속 재고와 정비자원, 예방정비 사이에 Trade-off 관계를 파악하기 위한 방법을 제시하였으며, Tasi<sup>[7]</sup>은 다부품에서 가용도를 기준으로 예방정비 계획을 최적화시키는 방안을 제시하였다. 위에서 언급한 대부분의 연구에서 부품의 고장은 포아송 과정을 따르는 것으로 가정하고 분석하였다.

이러한 수리적인 한계를 극복하기 위하여 가용도 산출을 위한 시뮬레이션 기법이 다양하게 적용되어져 왔다. Marquez<sup>[8]</sup>은 복잡한 체계에서 가용도와 신뢰도를 산출하기 위하여 몬테칼로 시뮬레이션 기법을 사용하였으며, Landers<sup>[9]</sup>은 SIMNET을 이용하여 대상 시스템에 대한 최소절단집합(minimal cut-set)을 구하여 시스템의 신뢰도를 산출하였다. 그러나 이 연구에서는 부품의 상태가 가동 또는 고장의 두 가지 상태만을 다루었으며, 예방정비는 고려하지 않고, 단지 고장난 부품의 수리만을 고려하였다. 또한 Chisman<sup>[10]</sup>은 규모가 큰 체계의 신뢰도/가용도를 구하는 이산 시뮬레이션 모델링을 제안하였다. 그는 Failure-Mode 방법과 Flow Method의 두가지 방법을 제안하였다. Yanez 등<sup>[11]</sup>은 무기체계에서 신뢰도 분석을 위한 시뮬레이션 접근에 대한 연구를 수행하였다. McGee et al.<sup>[12]</sup>는 Arena© 7.01.를 이용하여 미공군의 공급사슬을 모델링하였다. 이 시뮬레이션에서는 시스템을 3

수준으로 정비/보급은 2계단(3 indenture 2 echelon)으로 하고 있다. 또한, 보급트럭의 용량, lateral transshipment 등의 보급 유형에 따라 비용과 가용도를 기준으로 모델링된 시스템을 평가하였다. Cunha et al.<sup>[13]</sup>은 1900 기관차에 대해 4수준 3계단으로 모델링 하였다. 소모성 품목에 대해서는 재고정책을 (s,Q), 수리가능 품목에 대해서는 (S-1,S) 정책을 시뮬레이션에 적용하였다. Tee et al.<sup>[14]</sup>는 시뮬레이션을 활용하여 다단계 재고 모형에 대한 상황별 적합성을 평가하였다.

위와 같이 RAM 시뮬레이션은 기존의 수리적인 분석방법이 가졌던 한계를 극복하여 복잡한 시스템의 기능이나 지원 체계를 보다 정확히 반영할 수 있다는 장점이 부각되었기 때문에 무기체계를 비롯하여 여러 상용 체계에서도 운용되는 체계의 성능을 검증하고, 효과적인 운용 방안을 찾기 위해 그 사용이 보편화 되고 있다. RAM 시뮬레이션 모델이 과거의 수리적 분석 방법보다 정확한 현실상황을 잘 반영하는 특징을 갖는 대신에 무기체계에서 RAM 시뮬레이션 방법을 이용하여 정확한 결과를 산출하기 위해서는 체계가 운용되는 환경과 시스템의 특성에 관한 정확한 정보의 입력이 필수적이다.

본 연구에서는 RAM 시뮬레이션에 체계의 기능이나 운용환경을 보다 정확히 반영하기 위하여 각 특성 정보가 RAM 값에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 각 입력 모수들을 보다 정확히 정의하는 방안을 제시하며, 입력 모수별로 무기체계의 RAM 분석에 대한 적합성을 판단하기 위해 관련 소프트웨어들에 대한 기능을 비교하였다. 또한, RAM 시뮬레이션에서 시스템 전체의 효과를 측정하는 기준 중의 하나인 가용도에 영향을 미치는 요인들을 파악하고, 그에 대한 영향을 실험적으로 분석해냄으로써 시뮬레이션 기반의 RAM 분석 시 입력데이터 작성기준을 제공하고자 한다.

## 2. RAM 분석용 소프트웨어

RAM 시뮬레이션을 수행하기 위한 시뮬레이션 도구는 다양하게 많이 출시되어 있으며 본 연구에서는 대

표적인 5가지 종류에 대해 각각의 특징을 살펴보았다.  
 표 1과 2에서 보는 바와 같이 대부분의 RAM 시

뮬레이션 소프트웨어들은 다양한 고장분포를 지원하  
 고 있으며, 정비자원의 가용성에 따른 지원체계의 성

[표 1] RAM 시뮬레이션 비교(신뢰성 정보)(O : 지원, X : 미지원)

| 특 성 \ S/W 명 | RAMSim                     | BlockSim                          | AvSim+                                    | Raptor                            | OpSim                                    |
|-------------|----------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| 개발사         | 국방과학연구소                    | ReliaSoft                         | IsoGraph                                  | ARINC                             | Relex                                    |
| RBD         | O                          | O                                 | O   | O                                 | O  |
| 고장분포        | 지수<br>와이블,<br>대수정규<br>일양 등 | 지수<br>와이블<br>정규<br>대수정규<br>감마등 다수 | 지수<br>와이블<br>Bi-와이블<br>정규<br>대수정규<br>등 다수 | 지수<br>와이블<br>정규<br>대수정규<br>감마등 다수 | 지수<br>와이블<br>정규<br>대수정규,<br>레일라이<br>등 다수 |
| Duty-cycle  | O<br>(임무별 블록별<br>적용 가능)    | O                                 | O<br>(임무별 모든 품<br>목 적용)                   | O                                 | X  |
| 정비효과        | O<br>(전체수명)                | O<br>(직전고장간격,<br>전체수명)            | O<br>(전체수명)                               | X                                 | O<br>(전체수명)                              |

[표 2] RAM 시뮬레이션 비교(정비성 및 정비/보급 지원체계)(O : 지원, X : 미지원)

| 특 성 \ S/W 명             | RAMSim                       | BlockSim                   | AvSim+                     | Raptor                     | OpSim                    |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 운용환경설정                  | OMS-MP 설정                    | 블록다이어그램별                   | 전체 품목 적용                   | 품목별 설정                     | 전체 품목 적용                 |
| 정비단위                    | LRU/SRU                      | 최하위품목                      | 최하위품목                      | 최하위품목                      | 최하위품목                    |
| 예방정비                    | 계획/운용조건                      | 계획/그룹/<br>운용조건             | 계획/그룹정비                    | 계획/운용조건                    | 계획정비/<br>사용자정비           |
| 정비자원<br>(정비요원,<br>정비장비) | O<br>(동일자원 2개<br>이상 설정 가능)   | O<br>(동일자원 2개<br>이상 설정 불가) | O<br>(동일자원 2개<br>이상 설정 가능) | O<br>(동일자원 2개<br>이상 설정 가능) | O<br>(동일자원 2개<br>설정 불가)  |
| 수리부속                    | (S-1,S)재고정책                  | 정기발주<br>정량발주               | 정기발주<br>정량발주               | 정기발주<br>정량발주               | (s,S)재고정책                |
| 정비계단                    | O<br>(정비 및 수리부속<br>비대칭구조 지원) | X                          | O<br>(2 계단 이상<br>부대수 : 1개) | X                          | X<br>(수리부속 관련<br>보급 3계단) |
| 배치 대수 설정                | O                            | X                          | X                          | X                          | X                        |

능과 수리부속에 따른 영향 분석을 지원하고 있다.

표 1에서는 RAM 시뮬레이션에서 신뢰성과 관련된 기능을 비교하여 나타낸다. 대표적 요소로 신뢰성 블록 다이어그램과 고장분포, duty-cycle, 정비효과가 있다.

duty-cycle은 품목이 특정 임무에서 받는 스트레스의 정도를 수치적으로 나타낸 값으로 임무 기간 대비 사용되는 정도를 0과 1사이에 값으로 나타낸다. 이러한 duty-cycle은 무기체계에서 운용조건을 반영하기 위해 필수적으로 필요하다.

정비효과는 고장수리 또는 예방정비 후에 체계의 수명의 변화를 나타내는 지수이다.

표 2에서는 체계의 복구를 위한 정비성과 정비/보급지원 체계를 나타낸다. 특히, 무기체계가 운용되는 환경에 대한 지원성을 비교하며, 정비/보급 지원 체계에 대한 기능을 비교 분석 하였다. 정비단위는 체계 또는 부체계에 고장이 발생한 경우 복구를 위해서 수행하는 정비업무의 단위로 체계에서 품목의 수준을 나타낸다. 정비계단은 품목의 정비 또는 수리부속의 보급을 위해 정비/보급 업무별로 몇 개의 계층으로 나누어져 있다.

### 3. RAM 시뮬레이션 입력항목별 특성 분석

기호 정의

$A_i$  : 고유 가용도

$A_a$  : 성취 가용도

$A_o$  : 운용 가용도

OT : 총 운용시간

ST : 대기시간

TCM : 총보수정비 시간

TPM : 총예방정비 시간

TALDT : 총 행정 및 군수지원 시간

$h(t)$  : 고장률(강도) 함수

$S_{ij}^I$  : i 부대에서 초기에 보유한 j품목의 수리부속 수

$S_{ij}^R$  : i 부대에서 수리중인 j품목의 수리부속 수

$S_{ij}^T$  : i 부대로 수송중인 j품목의 수리부속 수

$S_{ij}^C$  : i 부대에서 현재 보유한 j품목의 수리부속 수

약어 정의

OT : Operating Time

ST : Standby Time

TALDT : Total Administrative & Logistics Delay Time

TCM : Total Corrective Maintenance time

TDT : Total Delay Time

TPM : Total Preventive Maintenance time

TT : Total Time

TUT : Total Up Time

무기체계에서 RAM 시뮬레이션 분석시에는 무기체계가 가지고 있는 다양한 환경을 정확히 분석하여 반영하여야 한다. 아래 수식에 나타낸 바와 같이 무기체계의 가용도는 적용되는 대상에 따라 고유 가용도, 성취 가용도, 운용 가용도로 나뉘어진다. 고유가용도는 무기체계가 가지고 있는 고유한 특성을 판단하는 것으로, 가장 이상적인 조건에서의 특성을 나타낸다. 성취 가용도는 무기체계가 단위 시험 또는 생산단계에서의 시험 시점에서 분석하는 것으로 고유 가용도에 예방정비를 감안하여 계산된다. 마지막으로 운용 가용도는 실제 무기체계가 야전에서 운용될 때 무기체계의 특성을 나타내는 것으로, 무기체계의 특성 및 정비지원체계의 특성 모두를 포함하여 나타내어준다. RAM 시뮬레이션은 이러한 3가지 가용도를 산출하는데 주로 사용되어질 수 있다.

$$A_i = \frac{OT}{OT + TCM} \quad (1)$$

$$A_a = \frac{OT}{OT + TCM + TPM} \quad (2)$$

$$A_o = \frac{OT + ST}{OT + ST + TCM + TPM + TALDT} \quad (3)$$

수리적인 방법을 사용할 경우에 무기체계 개발 및 운용단계에서 산출되는 가용도는 모두가 지수분포를 가정하여 분석되어지고 있으며, 이 때문에 가용도의 왜곡현상을 발생시키게 된다. 예를 들어, 예방정비는 무기체계의 가용도 및 신뢰도를 향상시키기 위한 행

위이나, 정비에 따른 고장률 저하나 가동률 상승을 반영하지 못하는 관계로 식 (2)에서와 같이 예방정비를 적용할 경우 성취 가용도는 항상 고유 가용도보다 작은 값을 나타내게 된다. 또한, 군수 및 행정지연시간을 나타내는 ALDT(Administrative and Logistics Delay Time)는 정비자원과 수리부속의 수송시간에 많은 영향을 받고 있을 뿐만 아니라, 무기체계의 고유 특성인 신뢰도와 정비도에도 직접적으로 연관이 되어져 있다.

따라서, 가용도의 산출을 위해서는 무기체계의 특성과 정비자원체계에 대한 특성을 정확히 고려하여 계산되어야 하는데 수리적인 방법은 이러한 특성을 표현하는 것이 불가능한 실정이다. 시뮬레이션 기반 RAM 분석 방법은 무기체계가 운용되는 환경특성 및 기능을 모델링을 가능하게 하여 이러한 제약을 뛰어넘을 수 있는 것이다.

가. RAM 분석 데이터

RAM 시뮬레이션을 분석하기 위해서는 그림 1에 나타난 바와 같이 4가지 분류의 분석 데이터가 필요하다. 운용환경 분석은 체계가 운용되는 환경을 분석한 것으로, 무기체계에서는 운용형태 종합 및 임무유형(OMS-MP : Operational Mode Summary and Mission Profile)으로 표현된다. 신뢰성 분석은 체계를 구성하는 각 품목에 대한 고장 및 정비 정보와 체

계의 고장을 유발시키는 요인에 대한 분석을 포함한다. 정비성 분석은 체계 고장 발생시 체계를 복구시키는 역할을 수행하며, 정비대상 품목과 정비자원 등의 분석이 필요하다.

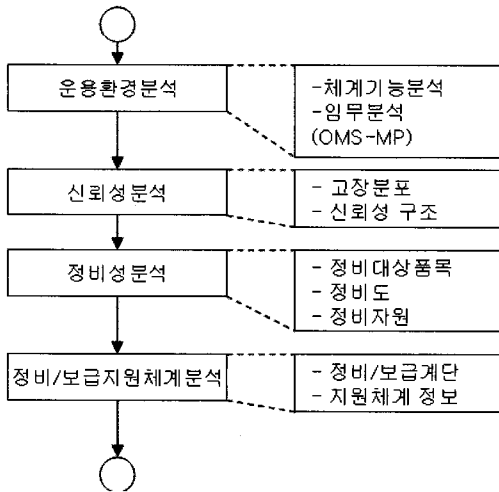
마지막으로 정비/보급지원 체계 분석은 정비성 분석에서 분석된 정비자원을 활용하여 정비를 수행하는 정비계단에 관련된 정보를 포함한다. 이러한 4가지의 데이터는 RAM 시뮬레이션의 정확성을 향상시키는데 중요한 역할을 한다.

나. 운용환경 분석

무기체계에 대한 RAM 분석시 최우선적으로 정의되어야 하는 것은 운용형태 종합 및 임무분석이다. 체계를 설계할 때에는 전시/평시에서 요구되는 임무를 성공적으로 수행하기 위한 설계 목표값인 신뢰도/가용도/정비도를 정의하게 되며 해당하는 목표값은 단위 임무 또는 연간 임무를 수행하기 위해 체계가 운용되는데 소요되는 운용시간을 나타낸다. 운용형태 종합에는 무기체계가 임무를 수행하는데 소요되는 시간분석이 포함되며, 시간분석 결과는 무기체계의 운용시간에 대한 내용을 포함하게 된다.

또한, 임무분석을 통한 산출물은 duty-cycle 적용이 가능해야 한다. 무기체계가 단위 임무를 수행할 때 체계내에 모든 구성품이 사용되지는 않으며, 임무의 종류에 따라 무기체계의 구성품이 받는 스트레스의 강도도 달라지게 된다. 표 3과 표 4는 가상전차에 대한 운용형태와 임무유형을 나타낸다. 가상전차는 운용형태로부터 498시간 임무에 투입되는 것을 알 수 있으며, 그림 2와 같이 전술훈련에서는 100시간 동안에 가상전차는 1000km 기동하고 사단급 훈련에서는 200시간에 1000km를 운용한다. 이런 경우 기동에 대한 기능은 전술훈련에서 사단급훈련보다 가혹한 조건에서 운용되게 된다. 따라서, 해당하는 duty-cycle은 구성품과 기능에 연결되어 그림 2와 같이 시뮬레이션에 적용될 수 있다.

표 2에서 언급한 것과 같이 조사된 모든 소프트웨어에서는 운용환경 설정이 가능하다. 그러나, AvSim+와 OpSim은 운용환경의 변화시 모든 품목에 동일한 Duty-cycle이 적용되어 무기체계의 운용환경을 정확히 반영하지 못하며, BlockSim과 Raptor는 품목별로



[그림 1] 데이터 분석 절차

운용환경 설정이 가능하나, 복잡한 절차를 필요로 한다. RAMSim은 무기체계의 운용환경을 표 3과 표 4, 그림 2와 같은 동일한 과정으로 정확히 반영이 가능하다.

[표 3] 가상전차의 운용형태

| 임무유형  | TUT(hr) |     | TDT(hr) |     |       | TT (hr) |
|-------|---------|-----|---------|-----|-------|---------|
|       | OT      | ST  | TCM     | TPM | TALDT |         |
| 전술훈련  | 100     | 50  | 5       | 10  | 3     | 168     |
| 사단급훈련 | 200     | 100 | 10      | 15  | 5     | 330     |
| 합     | 300     | 150 | 15      | 25  | 8     | 498     |

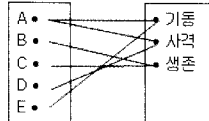
[표 4] 가상전차의 임무유형

| 임무유형  | 기동     | 사격      | 생존    |
|-------|--------|---------|-------|
| 전술훈련  | 1000km | 10round | 80hr  |
| 사단급훈련 | 1000km | 5round  | 100hr |

■ 전술훈련 가능 운영조건 설정

- 기동 (1000km/100hr)
- 사격 (10발/100hr)
- 생존 (80hr/100hr)

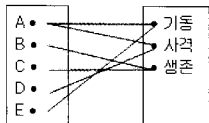
■ 구성품-기능 관계 설정



■ 사단급훈련 가능 운영조건 설정

- 기동 (1000km/200hr)
- 사격 (5발/200hr)
- 생존 (100hr/200hr)

■ 구성품-기능 관계 설정



[그림 2] 임무유형별 기능 관계

다. 신뢰성 분석

1) 고장분포

대부분의 무기체계에서 신뢰도 예측 및 분석을 위하여 지수분포를 사용한다. 지수분포는 무기역성 성질(memoryless property)로 인해 수리적인 분석을 용이하게 하며, 전자 부품에 대해 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나, 기계적인 성질을 띠는 부품이나 기타 환경적인 요인이 체계의 고장에 영향을 주는 부품은 지수분포로 분석하는데 다소 무리가 있다. Black

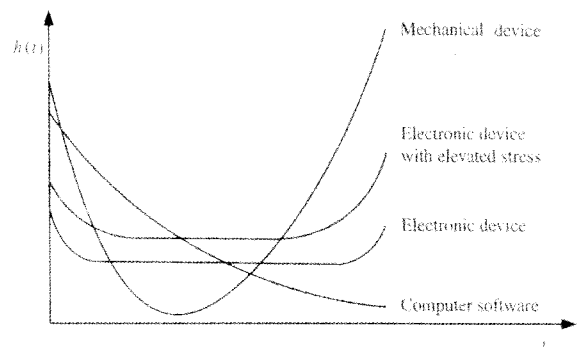
과 Gaintner<sup>[15]</sup>는 고장 메커니즘에 따라 적합한 분포를 표 5와 같이 나타내고 있으며, Rausand와 Reinertsen<sup>[16]</sup>는 표 6과 같이 나타내고 있다.

[표 5] Black과 Gaintner의 고장분포/메커니즘

| 메커니즘 | 고장분포 |     |
|------|------|-----|
|      | 정규   | 와이블 |
| 부식   | ○    | ○   |
| 피로   |      | ○   |
| 침식   |      | ○   |
| 마모   | ○    | ○   |

[표 6] Rausand와 Reinertsen의 고장분포/메커니즘

| 메커니즘     | 고장분포 |      |      |      |        |
|----------|------|------|------|------|--------|
|          | 와이블  | 대수정규 | I.G. | B.S. | Gumbel |
| 피로 (주기성) |      | ○    | ○    |      |        |
| 피로 (누적성) |      |      | ○    | ○    |        |
| 부식       | ○    |      |      |      | ○      |
| 마모       |      |      | ○    |      |        |



[그림 3] 장치에 따른 육종곡선의 변화

또한, Kuo. W.와 Zuo. M. J<sup>[17]</sup>는 장치 종류에 따른 고장률의 변화를 그림 3과 같이 나타내고 있다. 그림 3에서 보는바와 같이 전자장치는 안정 상태에서

고장률이 상수의 형태를 나타내지만, 기계적 장치는 초기에는 고장률이 감소하다가 계속해서 증가하는 형태를 나타낸다.

따라서, RAM 시뮬레이션 분석시에는 무기체계를 구성하는 품목에 대한 정확한 고장형태를 반영하기 위하여 식 (4)~(6)에서와 같은 적합한 분포를 선택하여 적용할 필요가 있다.

$$\text{지수분포} : h(t) = \lambda \quad (4)$$

$$\text{와이블분포} : h(t) = \frac{\beta}{\eta} (t/\eta)^{\beta-1} \quad (5)$$

$$\text{대수정규분포} : h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi[(\ln t - \mu)/\sigma]} \quad (6)$$

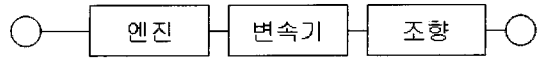
식 (4)~(6)은 주요 분포에 대한 고장률 함수(h(t))로 식 (5)의 와이블 분포의 경우 형상모수(η)가 1보다 클 경우 고장률이 증가하며, 1보다 작은 경우 고장률이 감소하는 형태를 가지며, 또한 1의 경우 지수분포와 동일한 고장률이 상수형태가 된다. 따라서, 와이블 분포는 형상모수에 따른 다양한 변화로 많은 수명분포로 활용되어진다.

조사된 모든 소프트웨어에서 고장 분포로 와이블 분포를 지원하고 있으며, RAMSim에서는 표 5에서 나타난 정규 분포를 지원하지 않고 있다. 표 6에서 언급한 I.G.(Inverse Gaussian)과 B.S.(Birbaum Sanders), Gumbel 분포는 5 종류 모두에서 지원하지 않는 것으로 나타났다.

## 2) 신뢰도 블록 다이어그램

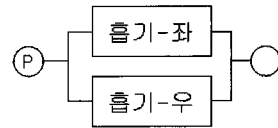
신뢰도 블록 다이어그램(RBD : Reliability Block Diagram)은 무기체계의 임무 고장을 기능적인 관점에서 분석하여 표시하는 다이어그램이다. 따라서, 체계의 신뢰도 예측에서 사용하던 부품간의 직렬구조는 RBD상에서는 다양한 형태로 표현되어질 수 있다. RBD를 작성시에는 먼저 임무 고장을 유발하는 요인을 분석하고, 요인을 하나의 기능으로 분류하는 작업이 선행되어야 한다. 이때, 무기체계의 고장정의 및 판단기준의 임무실패 요인을 참조하여 기능 분류를 작성할 수도 있다.

RBD에서 직렬은 그림 4와 같이 나타나며, 직렬구조의 경우에는 하위 부품의 고장은 상위 부품의 고장으로 직결된다. 그림 4에서 엔진과 변속기, 조향 중 한 개의 고장은 체계의 고장을 유발시키게 된다.



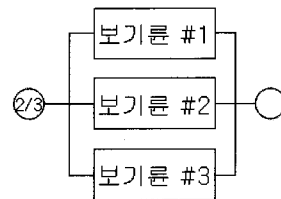
[그림 4] 직렬구조

또한, 병렬구조는 기능적으로 유사성을 가진 부품 또는 무기체계의 고장에 치명적인 영향으로 인해 중복설계를 수행한 경우에 적용할 수 있다. 예를 들어, 그림 5에서 엔진의 흡기가 좌/우에 있고 둘 중 한개만 정상적으로 작동하면 엔진의 작동에 문제가 없을 경우 중복구조로 나타낼 수 있다.



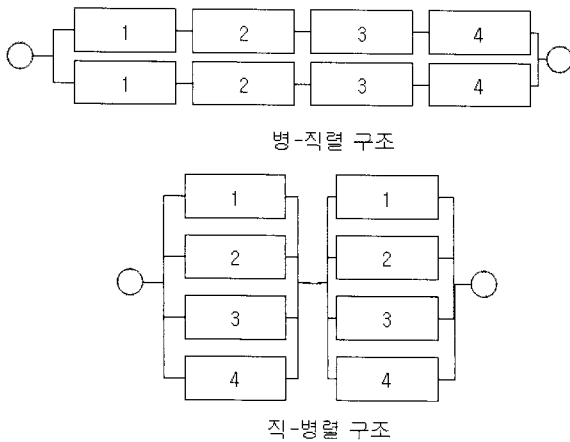
[그림 5] 흡배기 장치에서의 병렬 구조

k-out-of-n의 구조는 연속된 기계적인 메카니즘에서 주로 찾아 볼 수 있다. 예를 들어, 컨베이어벨트는 컨베이어벨트를 구성하는 롤러가 일정개수 이하로 고장날 경우 컨베이어벨트의 작동에는 문제가 없다. 무기체계에서는 전차의 그림 6과 같은 현수장치에서 이와 같은 것을 찾아 볼 수 있다. 현수에서 1개의 보기륜의 고장은 기동상에는 치명적으로 영향을 미치지 않는다.



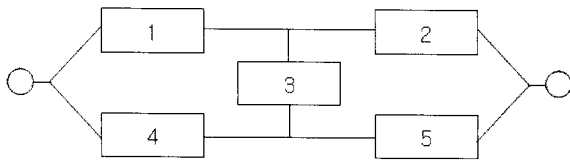
[그림 6] 현수 장치에서의 k-out-of-n 구조

또한, 앞에서 살펴본 직렬과 병렬을 혼합해서 병-직렬, 직-병렬의 구조를 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 7] 직렬과 병렬이 혼합된 구조

그림 8은 브릿지 구조를 나타낸다. 브릿지 구조는 직렬과 병렬로는 구조를 표현할 수 없으며, 시작 노드에서 종료 노드 사이의 여러 경로 중 한 개의 경로가 작동 가능할 경우 브릿지 구조는 작동 상태로 유지 된다.



[그림 8] 브릿지 구조

이러한 RBD로 구성된 체계는 수리적으로 신뢰도 또는 가용도를 계산하기에는 어려움이 있다. 예를 들어, 지수분포로 4개의 부품이 직렬로 있는 경우 단순히 고장률을 더하지만, 자주 사용되는 병렬 또는 직-병렬, 병-직렬의 경우도 단순한 계산으로 체계 측면에서 신뢰도 및 가용도, 정비도를 산출하는데 어려움이 있다.

정확한 RAM 특성을 분석하기 위해서는 분석하고자 하는 체계가 가지는 신뢰성 특성을 파악하여 RAM 시뮬레이션에 반영해야 하며, 표 1에서 언급하였듯이, 5 종류 모두 앞서 언급한 다양한 형태의 RBD를 정의할 수 있도록 지원하고 있다. 그러나, 브릿지 구조는 BlockSim에서만 표현이 가능했으며, 나머지 4 종류에서는 정확히 표현이 불가능 하였다. 따라서,

무기체계의 신뢰성 구조가 브릿지 구조를 가질 경우 BlockSim이 적합할 것으로 사료된다.

## 라. 정비성 분석

### 1) 정비도

정비도는 체계에 고장이 발생했을 때 복구시키는데 소요되는 시간이다. 식 (1)~(3)에서 보는바와 같이 정비도를 나타내는 TCM시간은 가용도에 큰 영향을 미친다. 따라서, 정확한 가용도 산출을 위해서는 정확한 정비도의 산출이 필수적이다. 일반적으로 정비도는 지수분포 또는 상수로 가정하여 활용된다. QCI<sup>[18]</sup>에 따르면 지수분포는 대형체계에서 고장메제와 수리업무에 적합한 것으로 나타나고 있으며, NAVORD OD 39223<sup>[19]</sup>에 따르면 복잡한 장비와 대형체계에는 대수정규분포가 수리시간에 대한 분포로 가장 적합하고 널리 사용되어지고 있다. 정비 업무 분포가 대수정규 분포를 따르는 상황에서 수리적으로 가용도를 구하는 것은 수리적인 문제의 복잡성으로 인해 산출이 불가능하다. 그러나, 정확한 가용도 산출을 위하여 대수정규분포의 적용이 가능해야 하며, 이는 RAM 시뮬레이션을 통해 가능해진다.

RAM 시뮬레이션에서 정비 업무는 교환과 수리로 나누어질 수 있다. 교환은 상위 품목의 수리를 위하여 고장난 하위 품목을 교체하는 것이며, 수리는 체계의 구조상 최하위 품목에 대한 복구를 위한 행위이다. 따라서, RAM 시뮬레이션 적용시에 최하위 품목에는 교환과 수리, 두 가지에 대한 정비도가 필요하게 된다. 5가지 종류 모두에서 정비도를 표현하기 위하여 지수 분포와 대수정규 분포를 지원하고 있으며, 해당 분포를 위에서 언급한 정비 업무에 맞게 적용하여 분석하여야 한다.

### 2) 정비절차 분석

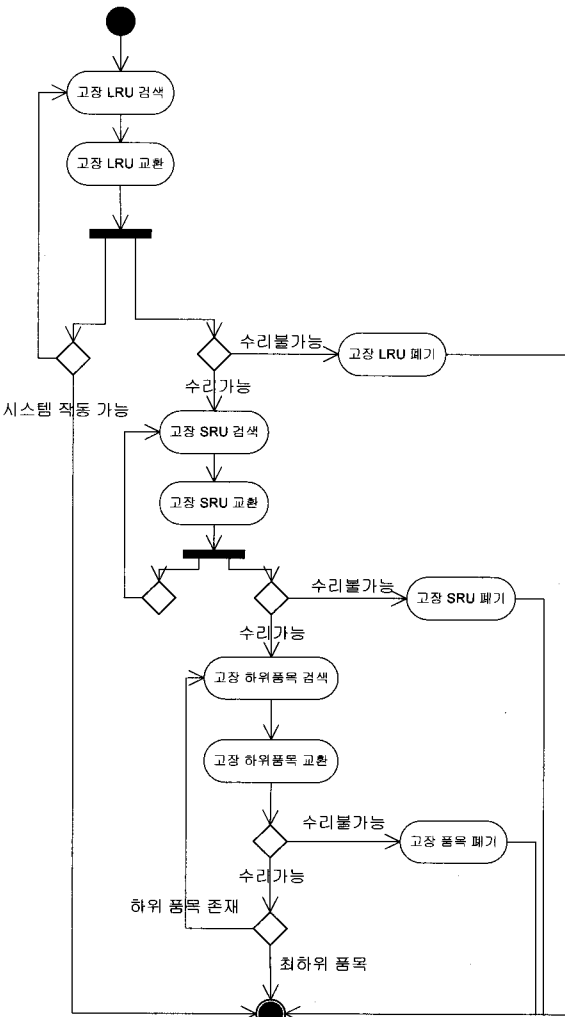
체계의 고장을 복구하기 위해서는 그림 9와 같은 과정을 따른다(정일한등<sup>[20]</sup>). 그림 9에서 보는 바와 같이 체계에 고장이 발생한 경우 체계를 복구 시키기 위해서 먼저 고장 난 LRU를 식별하고 교환하는 절차를 따르게 된다. 이는 고장난 체계의 복구 시간을 줄이고, 가용도를 향상시키는 효과가 있다.

또한, 체계에서 탈거된 LRU의 수리는 고장 난 SRU



를 교환함으로써 이루어 진다. RAM 분석에서는 이러한 체계 복구 절차를 정확하게 표현할 필요가 있다.

이런 측면에서 RAMSim은 그림 9와 같은 절차를 정확하게 반영하고 있으며, 그 외 4의 분석 소프트웨어들은 고장이 발생한 최하위 품목을 곧바로 찾아 교환하는 방식의 정비 업무를 가정하고 있어서 일반적인 무기체계의 복구 절차와 상이하여 정확한 체계의 복구 시간을 표현할 수 없다.



[그림 9] 체계 복구 절차<sup>[20]</sup>

2) 정비자원(수리부속/정비요원/정비장비)

정비자원의 부족은 체계가 고장 발생시 복구하는데

지연시간을 발생시킨다. 일반적으로 정비자원은 수리부속, 정비요원, 정비장비가 있으며, 체계의 복구를 위해서는 3가지 모두가 가용해야만 한다. 정비자원은 각 정비/보급 부대에서 보유하고 있으며, 시뮬레이션에서는 정비/보급부대에 정비자원을 요청한 순서대로 처리하는 FIFO(first in first out) 방식을 따른다.

과도한 정비자원은 정비자원의 관리를 위한 소요비용이 증가하게 되며, 정비자원의 부족은 가용도의 저하로 인한 기회 비용을 발생시키게 된다.

RAMSim에서는 정비 자원에 대한 비용을 고려하지 않고 있으며, 나머지 4 종류에서는 소요 자원에 대한 비용을 산출하고 있다. 그러나, 기회 비용에 대한 산출은 모든 5 종류에서 불가능하였다. 또한, RAMSim에서는 정비계단별로 정비업무의 할당이 가능하며, 정비계단내에 각 부대별로 필요한 정비자원에 대한 할당이 가능하다. 따라서, 정비자원에 대한 비용 소요 판단을 위해서는 BlockSim, AvSim+, Raptor 또는 OpSim이 적합하며, 정비계단별 정비자원에 대한 소요 판단에는 RAMSim이 적합할 것으로 판단된다.

마. 정비/보급 지원체계

1) 발주 및 수송시간

수리부속의 보급은 one-for-one 즉, (S-1,S) 재고 정책을 따른다. 각 정비/보급 부대는 초기에 유지하기를 원하는 수리부속별로 S개를 보유하게 된다. 그림 10에서의 같이 고장 난 LRU를 교환함으로써 인해 부대에서의 수리부속이 1개 사용된 경우에는 바로 상위 계단의 부대에 수리부속을 요청하게 된다.

$$S_{ij}^r + S_{ij}^T + S_{ij}^c < S_{ij}^I \tag{7}$$

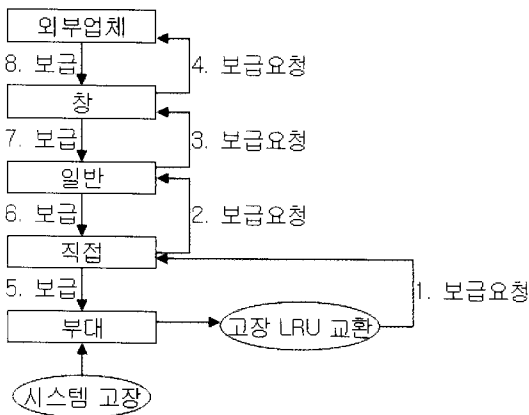
이때 부대에 수리부속은 현 보유 재고(on-hand-stock) 이외에 보급 예정인 수리부속(pipeline내의 수리부속)이 존재하게 된다.

보급 예정인 수리부속은 바로 사용할 수는 없지만, 현재 보급중인 수리부속으로 상위부대로부터 운송중이거나, 또는 현재 부대 내에서 수리중인 수리부속을 의미한다. 따라서 다음 식 (7)을 만족할 경우에 해당 부대는 상위부대에 수리부속을 요청하게 된다.

이러한 수리부속의 공급에서 각 정비/보급 계단간

에 수송시간이 존재하며, 수송시간은 체계의 복구에 대하여 지연시간을 생성하게 된다. 이러한 지연 시간은 식 (3)에서 보는 바와 같이 체계의 운용 가용도를 감소시키는 주요한 원인이 될 수 있다. 수송시간이 짧을 경우 각 부대에서 보유해야할 수리부속의 수량을 감소시킬 수 있으며, 그로 인해 수리부속에 대한 비용 역시 감소시킬 수 있다.

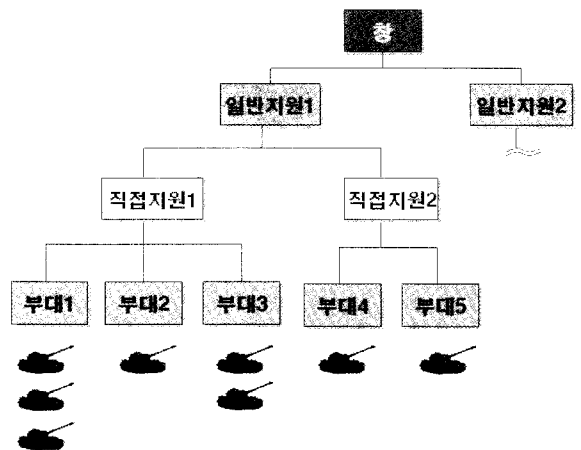
RAMSim을 비롯하여 5가지 소프트웨어가 모두 무기체계에 적합한 재고 정책을 보유하고 있다. 그러나, 그림 10에서 기술된 다단계 보급을 위한 지원은 RAMSim만이 지원이 가능하였다. 그 외 소프트웨어는 RAMSim에 비해 재고 정책은 더욱 유연하게 지원하였으나, 다단계 보급의 표현이 국내 무기체계 보급 환경과 맞지 않는 특성을 가지고 있다.



[그림 10] 수리부속보급 절차<sup>[21]</sup>

져야 한다. 또한, 정비/보급체계가 비대칭형으로 구성됨으로써 중간 수준의 정비/보급 부대에 요청되는 정비와 보급 요청 빈도 역시 각 부대별로 차이가 발생하게 된다. 예를 들어 그림 11에서 직접지원1의 경우 부대1, 부대2, 부대3을 지원하게 되어 간접적으로 완제품 6대를 지원하게 된다.

이러한 정비/보급 지원 체계를 RAM 시뮬레이션에 반영하기 위해서는 소프트웨어에서 다단계 비대칭형 정비/보급 구조가 표현이 가능해야 하며, 최하위 계단에서 완제품의 배치 대수 설정이 가능해야 한다. RAMSim은 두 가지 모두의 특성을 반영하고 있으며, 그 외 4가지 소프트웨어에서는 정비/보급 계단 설정에 대해 부족한 면을 가지고 있다.



[그림 11] 정비/보급 지원 체계 구조<sup>[21]</sup>

## 2) 정비/보급 지원 체계

RAM 시뮬레이션에서는 한 개의 부대에서 정비와 보급이 같이 이루어진다. 부대의 구조는 2~4계단으로 구성이 가능하며, 최 상위계단은 창이 된다. 또한, 최하위 계단은 완제품이 운용되는 계단이 된다. 2~4계단의 구성은 그림 11에서 보는 것과 같이 비대칭형으로 표현될 수 있다.(정일한과 윤원영<sup>[21]</sup>)

최하위 계단인 부대 계단에는 완제품이 배치되며, 각 완제품의 배치 수는 부대별로 다르게 배치될 수 있다. 따라서 각 최하위 부대에서 발생하는 고장과 정비 빈도가 다르게 되며, 빈도의 차이에 의해 각 부대에서 요구되는 정비자원수도 다르게 적용되어

## 4. 예제를 통한 요소별 영향 분석

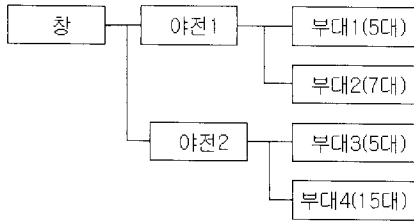
본 예제에서는 무기체계의 가용도에 영향을 미치는 요인을 정량적으로 분석하여 나타낸다. 분석에 사용된 소프트웨어는 국방과학연구소에서 개발한 RAMSim이다. 대상 예제에서는 그림 12와 같이 정비/보급 구조를 다계단 비대칭 구조로 표현하였으며, 최하위 지원 부대인 부대1에서 4에는 부대에 배치된 전차의 수를 나타낸다. 또한, 그림 13에서는 다계층 체계로 가상의 전차를 구성하였다. 요소별 영향 분석을 용이하게 하기 위해 각 품목간의 신뢰성 관계는 모두 직렬

[표 7] 품목 데이터(단위 : 시간)

| 품목명  | 고장분포<br>형상모수 | 고장분포<br>척도모수 | 평균<br>교환시간 | 평균<br>수리시간 | 수리시간<br>분산 | 교환부대 | 수리부대 |
|------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------|------|
| 기동   | -            | -            | 1          | -          | 5          | 부대   | -    |
| 기동관측 | 1.5          | 900          | 2.5        | 50         | 7          | 직접   | 창    |
| 동력   | 1.3          | 800          | 2.8        | 50         | 7          | 직접   | 창    |
| 현수   | 2            | 500          | 4          | 60         | 10         | 부대   | 폐기   |
| 보조   | 1.2          | 1000         | 6          | 40         | 10         | 직접   | 직접   |
| 차량제어 | 1            | 800          | 6          | 70         | 12         | 직접   | 창    |
| 흡배기  | 1.1          | 1800         | 2          | 30         | 5          | 직접   | 직접   |
| 화력   | -            | -            | 0.5        | -          | -          | 부대   | -    |
| 무장   | 1.3          | 800          | 2.5        | 80         | 4          | 부대   | 직접   |
| 사격통신 | 1.1          | 1000         | 3          | 80         | 6          | 부대   | 직접   |
| 생존성  | 1.3          | 1100         | 2.5        | 40         | 4          | 부대   | 직접   |
| 통신   | 1.1          | 1300         | 2          | 50         | 6          | 부대   | 직접   |

[표 8] 정비부대별 수리부속 보유 수량(단위 : 개)

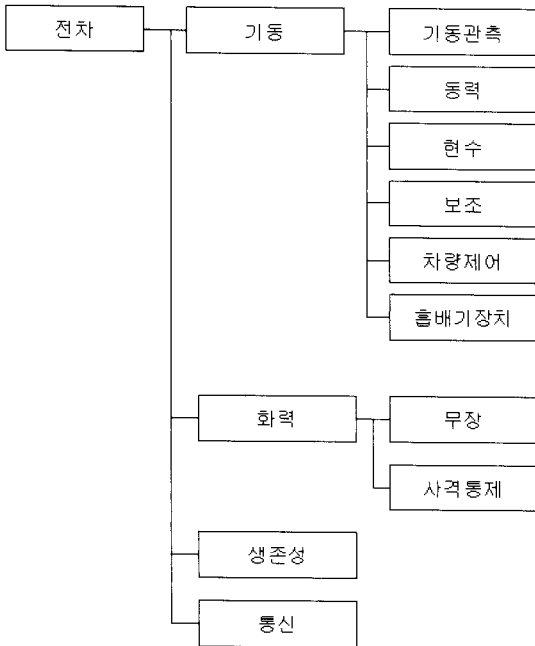
|      | 창 | 직접1 | 직접2 | 부대1 | 부대2 | 부대3 | 부대4 |
|------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 기동   | 0 | 2   | 4   | 2   | 2   | 1   | 2   |
| 기동관측 | 1 | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 동력   | 1 | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 현수   | 2 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |     |
| 보조   | 1 | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 차량제어 | 1 | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 흡배기  | 1 | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 화력   | 0 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 무장   | 1 | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 사격통신 | 1 | 1   | 0   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 생존성  | 0 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 통신   | 0 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |



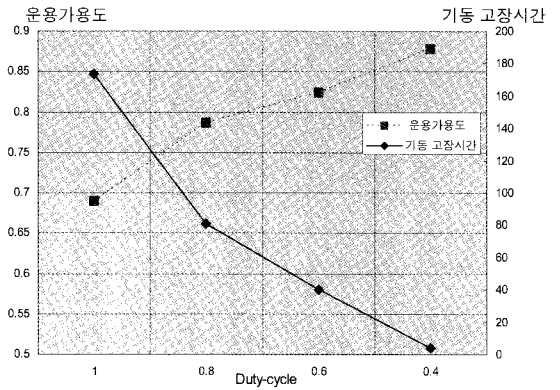
[그림 12] 정비/보급 부대 구조

창 ↔ 직접 : 150 시간  
 직접 ↔ 부대 : 100 시간

먼저, 기동 장치의 하위 품목에 대한 duty-cycle을 1.0, 0.8, 0.6, 0.4로 변경하였을 경우에 대하여 실험한다. duty-cycle은 실제 운용하는 시간내에 품목이 받는 스트레스의 비율이다. duty-cycle의 감소는 기동 하위 품목의 실 운용시간을 감소시켜 그림 14에서 보는 바와 같이 기동의 고장시간을 감소시키고 운용가용도를 증가시키는 결과를 나타내었다.

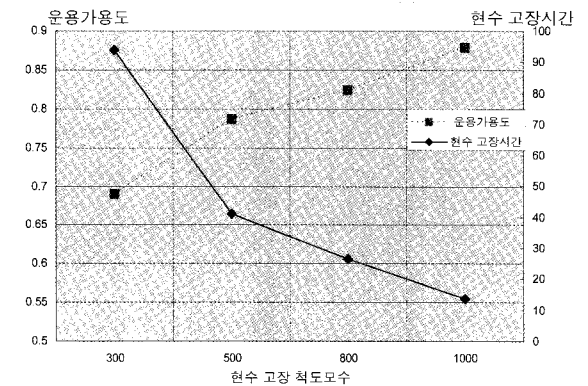


[그림 13] 가상전차 구조



[그림 14] duty-cycle 변화에 따른 결과

그림 15에서는 현수 장치의 척도모수를 300, 500, 800, 1000으로 변경하였을 경우에 대한 결과를 나타낸다. 현수의 척도모수 증가로 인해 현수의 고장시간은 감소하고 체계 가용도는 증가되고 있다.



[그림 15] 현수 척도모수에 따른 결과

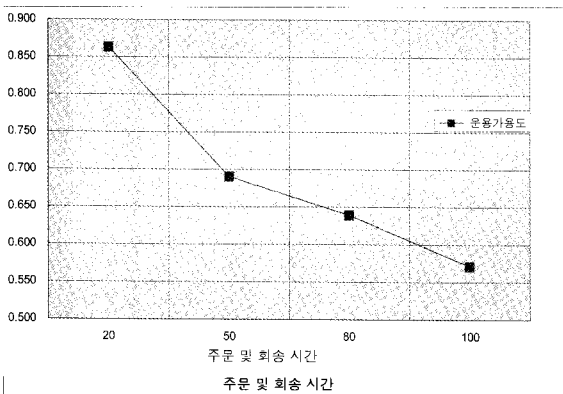
로 구성하였다. 표 7은 각 품목의 고장 및 정비 데이터를 나타내며, 고장시간에 대한 분포는 와이블 분포로, 교환 시간은 앞 장에서 언급한 것과 같이 지수분포를 사용하였으며, 수리시간은 대수정규분포로 가정하였다. 또한, 표 8은 각 정비/보급 부대별 수리부속 보유량을 나타낸다.

시뮬레이션의 시간은 1,000시간이며, 각 경우에 대한 시뮬레이션 반복회수는 30회로 하여 수행하였다. 본 장에서는 아래의 기본 데이터를 기준으로 duty-cycle, 고장분포모수, 수리부속, 주문 및 회송시간, 정비요원에 대한 경향을 분석한다.

정비계단간의 주문 및 회송시간은 다음과 같다.

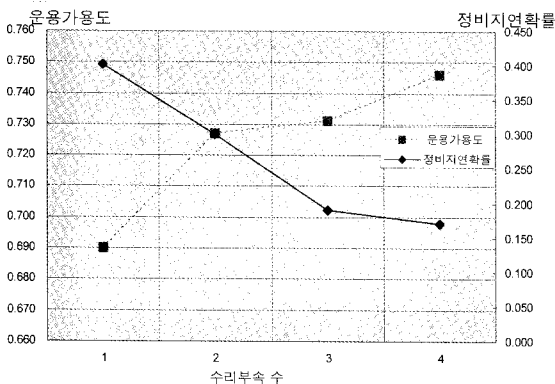
창 ↔ 외주 : 300 시간

그림 16에서는 직접에서 부대까지의 주문 및 회송 시간을 20, 50, 80, 100으로 변경하였을 경우에 대한 결과를 나타낸다. 주문 및 회송 시간은 수리부속의 부족으로 인해 발생하는 군수지연시간과 관련되어 있다. 그림 16의 결과에서 볼 수 있듯이, 주문 및 회송 시간의 감소로 인해 운용가용도가 증가하고 있다. 주문 및 회송 시간의 단축은 동일한 수리부속 조건에서 운용 가용도를 증가시킬 수 있는 한 가지 방안이라 하겠다.



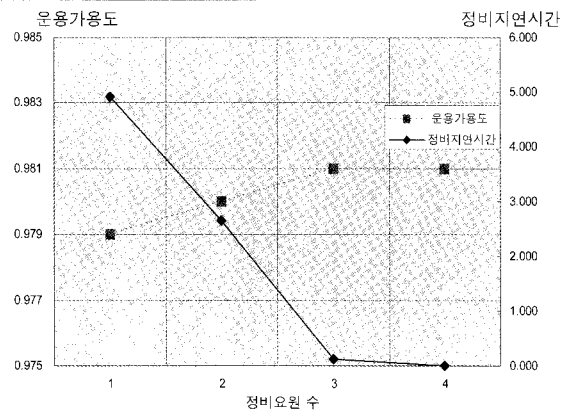
[그림 16] 주문 및 회송시간에 따른 결과

그림 17은 부대4가 보유하는 화력 구성품에 대한 수리부속수가 1, 2, 3, 4개인 경우에 대해 시험한 결과를 나타낸다. 수리부속수가 증가함에 따라 정비지연 확률이 감소하고 있으며, 운용 가용도는 정비지연 확률과 반비례하게 증가하고 있다.



[그림 17] 수리부속에 따른 결과

정비요원에 대한 영향을 분석하기 위해 수리부속수를 무한대로 설정하고, 기동 구성품을 교체하는데 정비요원이 1명 필요한 것으로 설정하여 실험을 수행하였다. 그림 18은 부대4가 보유하는 정비요원에 대한 수를 1, 2, 3, 4명인 경우에 대해 시험한 결과를 나타낸다. 정비요원이 증가함에 따라 정비지연시간이 감소하고 있으며, 운용가용도는 정비지연시간과 반비례하게 증가하고 있다. 그림 17과 그림 18에서 볼 수 있듯이, 본 가상 체계는 수리부속에 대해서는 민감하게 가용도가 반응을 하고 있으나, 정비요원에 대해서는 큰 가용도 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 교체하는데 소요되는 시간이 짧음으로 인한 결과로 생각된다.



[그림 18] 정비요원에 따른 결과

## 5. 맺음말

본 연구에서는 RAM 시뮬레이션을 무기체계에 적용하는 방안에 대해서 다루었다. RAM 시뮬레이션은 수리적으로 분석이 불가능한 많은 부분을 해결하는데 사용되어질 수 있다. 무기체계에 시뮬레이션을 적용하기 위해서는 정확한 입력 데이터를 마련하는 것이 중요하며, 본 연구에서는 RAM 시뮬레이션에 입력되는 각종 데이터와 데이터가 갖는 의미에 대하여 다루었다. 또한, 무기체계에서 시뮬레이션을 이용하여 체계의 신뢰도, 정비도 및 가용도를 산출하는데 필요한 개념을 나타내었다. 특히, 체계 측면에서 정비도와 가용도는 LRU의 교환 시간과 신뢰성 구조에 많은 영향을

받고 있으며, 이를 적용하여 분석을 하는 것은 무기 체계의 정비도 및 가용도를 산출하는데 중요하다.

또한, 무기체계에서 각 입력 요소들이 RAM 시뮬레이션에 미치는 영향을 파악하기 위하여 한 개의 가상의 체계를 구성하여 분석하였다. 가상의 체계에서는 각 입력 요소의 변화에 따른 운용가용도의 변화를 나타내었다. 앞에서 언급하였듯이, 운용가용도는 신뢰도 및 정비도, 그리고 정비자원에 대한 모든 영향을 평가하는 요소로 운용가용도의 변화는 신뢰도 및 정비도의 변화를 같이 반영하게 된다.

추후에는 RAM 시뮬레이션과 최적화 기법을 활용하여 운용가용도 제약하에 정비지원체계에 대한 최적화 문제에 대한 연구가 필요하다 하겠다.

### 참 고 문 헌

- [1] 장대익, 고지환, 이성팔, 김대영, "KOMPSAT 관제시스템의 운용가용도 분석", 대한전자공학회 학술대회 논문집, 제21권, 2호, 1998.
- [2] 신주환, 윤원영, 김호근, "수중유도무기의 운용가용도 향상을 위한 통합정비체계 개발에 관한 연구", 경영과학, 제23권, 2호, 2006. 11.
- [3] C. C. Sherbrooke, "METRIC : Multi-echelon Technique for Recoverable Item Control", Operations Research, 16, 122~141, 1968.
- [4] F. M. Slay, "VARY-METRIC : An Approach to Modeling Multi-echelon Resupply When the Demand Process is Poisson with Gamma Prior", Report AF301-3, Logistic Management Institute, Washington, DC. Conference, 1984.
- [5] S. C. Graves, "A Multi-echelon Inventory Model for a Repairable Item with One-for-one Replenishment", Management Science, 31, 1247~1256, 1985.
- [6] K. S. de Smidt-Destombes, M. C. van der Heijden, A. van Harten, "On the Availability of a k-out-of-n System Given Limited Spares and Repair Capacity Under a Condition Based Maintenance Strategy", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, No. 3, pp. 287~300, 2004.
- [7] Y. T. Tsai, K. S. Wang, L. C. Tsai, "A Study of Availability-centered Preventive Maintenance for Multi-component Systems", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 84, No. 3, pp. 261~270, 2004.
- [8] A. C. Marquez, A. S. Heguedas, B. Iung, "Monte Carlo-based Assessment of System Availability. A Case Study for Cogeneration Plants", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 88, No. 3, pp. 273~289, 2005.
- [9] T. L. Lander, H. A. Taha, C. L. King, "A Reliability Simulation Approach for Use in the Design Process", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 40, pp. 177~181, 1991.
- [10] J. A. Chisman, "Using Discrete Simulation Modeling to Study Large-Scale System Reliability/Availability", Computers and Operations Research, Vol. 25, pp. 169~174, 1998.
- [11] J. Yanez, T. Ortuno, B. Vitoriano, "A Simulation Approach to Reliability Analysis of Weapon Systems", European Journal of Operational Research, Vol. 100, pp. 216~224, 1997.
- [12] J. B. McGee, M. D. Rossetti, S. J. Mason, "Simulating Transportation Practices in Multi-indenture Multi-echelon(MIME) Systems, Proceedings of the 2004 Winter Simulation [1], 2004.
- [13] M. E. Cunha, A. Paula Barbosa Povo, A. A. Lopes, "A Multi-echelon System's Simulation Model for Repairable and Consumable Items Management : A Case Study", Sixteenth Annual Conference of POMS.
- [14] Y. S. Tee, M. D. Rossetti, "A Robustness Study of a Multi-echelon Inventory Model Via Simulation", International Journal of Production Economics, 80, 265~277, 2002.

- [15] K. C. Block, F. K. Geitner, "An Introduction to Machinery Reliability Assessment", Gulf Publishing Company, 1994.
- [16] M. Rausand and R. Reinertsen, "Failure Mechanisms and Life Models", International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 137~152, 1996.
- [17] W. Kuo, M. J. Zuo, "Optimal Reliability Modeling", John Wiley & Sons, p. 35, 2003.
- [18] QCI, "CRE Primer, 3rd Edition", Quality Council of Indiana, 2002.
- [19] NAVORD OD 39223, "Maintainability Engineering Handbook", Naval Ordnance Systems Command, 1970.
- [20] 정일한, 김대용, 황정욱, "MIME 시스템 분석 방안에 관한 연구", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2008. 8.
- [21] 정일한, 윤원영, "가용도 제약하에 MIME 시스템에서 유전알고리즘과 시뮬레이션을 이용한 수리부속 최적화", 한국품질경영학회, 제38권, 2호, 2008. 7.