

## PBL 계약을 위한 수리부속 재고비용 예측과 V-METRIC의 활용에 관한 연구

김윤화 이성용\*

창원대학교 산업시스템공학과

### A Study on the Repair Parts Inventory Cost Estimation and V-METRIC Application for PBL Contract

Yoon Hwa Kim, Sung Yong Lee\*

*Dept. of Industrial & Systems Engineering, Changwon National University*

**Abstract** : For the PBL contract, it is necessary for the contracting parties to share information regarding the reasonable inventory-level and the cost of its repair parts for the estimated demand. There are various models which can be used for this purpose. Among them, V-METRIC model is considered to be the most efficient and is most frequently applied. However, this model is usually used for optimizing the inventory level of the repair parts of the system under operation. The model uses a time series forecast model to determine the demand rate, which is a mandatory input factor for the model, based on past field data. However, since the system at the deployment stage has no operational performance record, it is necessary to find another alternative to be used as the demand rate of the model application. This research applies the V-METRIC model to find the optimal inventory level and cost estimation for repairable items to meet the target operational availability, which is a key performance indicator, at the time of the PBL contract for the deployment system. This study uses the calculated value based on the allocated MTBF to the system as the demand rate, which is used as input data for the model. Also, we would like to examine changes in inventory level and cost according to the changes in target operational availability and MTBF allocation.

**Key Words** : PBL, Repairable Item, Optimum Inventory Level, Inventory Cost, Availability, MTBF, Multi-Echelon, Multi-Indenture, V-METRIC

**Received:** May 10, 2017 / **Revised:** June 1, 2017 / **Accepted:** June 22, 2017

\* 교신저자 : Sung Yong Lee, sunylee@changwon.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

국방부는 총수명주기 관리제도(TLCSM: Total Life Cycle System Management)의 일환으로 성과 기반 군수지원(PBL: Performance Based Logistics) 제도를 도입, 적용하여 효율적인 예산 운용과 장비 가동률 향상을 추진하고 있다. 성과기반 군수지원(이하 PBL)은 적합한 군수지원업체와 소요군에서 제시하는 성과목표 및 지표를 기준으로 계약을 하고, 업체의 실적을 평가하여 수행성과에 따라 비용을 정산하는 군수지원전략이다.

PBL 계약 시 고려되는 주요 비용 요소는 수리부속의 구매비, 정비비, 사업관리를 위한 인건비, 데이터 관리를 위한 정보시스템 구축 및 유지비, 수송비, 인센티브 등이 있다. 이중 가장 많은 비중을 차지하는 것은 수리부속에 대한 구매 및 정비 비용이다[1]. 따라서 군수지원기업 및 소요군의 입장에서 균형적인 PBL 계약을 위해서는 요구되는 PBL 성과지표 달성을 위해 향후 소요가 예상되는 수리부속에 대한 적정재고수준 및 비용을 예측하는 것은 대단히 중요한 과제라고 할 수 있다.

수리부속의 재고는 최초 해당 시스템의 운용배치와 함께 동시조달수리부속(CSP: Concurrent Spare Part)의 형태로 결정되어 초도 배치되나, 시간이 흐름에 따라 수리부속의 수요율 및 정비지원시스템의 운용능력을 고려한 적정 재고수준을 결정하고, 실행하는 단계로 진행된다. 이러한 수리부속의 적정 재고수준 결정을 위한 최적화 계량모형들은 시스템 및 정비지원체계의 특성을 고려한 다 단계(Multi-Echelon), 다 계층(Multi-Indenture) 재고 모형들이 주류를 이루고 있고, 다양한 유사연구들이 계속 진행되고 있다. 하지만 이러한 다 단계 다 계층(MIME: Multi-Indenture, Multi-Echelon)모형들은 시스템을 운용하면서 획득한 수리부속들의 수요율 예측치 및 운용중인 정비지원시스템의 능력을 바탕으로 적용될 수 있기 때문에 시스템이 개발 완료되어 전력화 단계에서 이루어지는 PBL 계약에는 사용하기 어려운 측면이 있다.

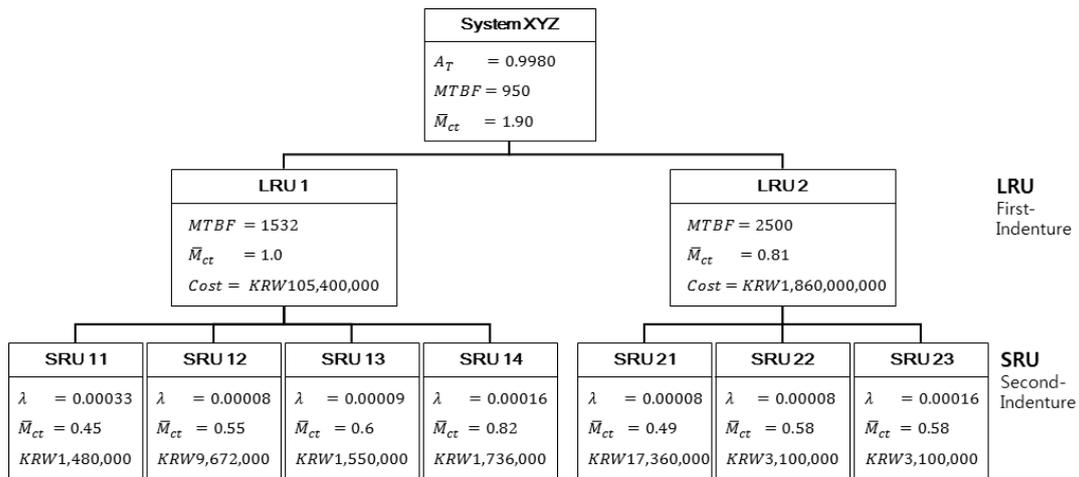
MIME모형의 기본형이라 할 수 있는 METRIC (Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control) 및 V-METRIC(Vari-METRIC)모형의 필수 입력요소인 수요율은 운용중인 시스템의 LRU (Line Replaceable Unit)에 대한 야전데이터의 확보를 바탕으로 주로 시계열 분석의 수요예측모형을 활용하여 결정한다. 따라서 전력화배치를 계획하고 있는 시스템에 대해 운용시점에서의 유지보수를 위한 수리부속 재고량 예측에 관한 모델적용을 위해서는 시스템 운용실적이 없는 점을 감안하여 수요율로 활용될 수 있는 다른 대안을 찾을 필요가 있다. 물론 이러한 대안들에는 유사 시스템의 과거 실적을 원용하는 방안도 있을 수 있겠으나, 수리부속 재고량 결정을 포함한 모든 군수지원체계(Logistics Support System)설계는 시스템 가용도 요구사항을 달성하기 위한 신뢰도 및 정비도의 결정과 이들의 할당(Allocation)으로부터 출발한다는 점을 고려한다면 시스템을 구성하는 각 LRU에 할당된 평균고장간 운용시간(MTBF: Mean Time Between Failure)을 수요율 계산의 대안으로 활용하는 방안도 고려될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 전력화 단계에 있는 시스템의 PBL 계약 시 성과지표인 운용가용도 목표를 달성하는 수리부속품들의 최적재고수준 및 재고비용 산정에 V-METRIC모형을 적용하고, 이 때 필요한 수요율을 시스템에 할당된 MTBF를 활용하여 계산된 값으로 대체하고자한다. 또한 목표 운용가용도의 변화 및 MTBF 할당의 변화에 따른 재고수준 및 비용의 변화를 살펴보고자 한다.

## 2. 신뢰도 및 정비도 할당과 정비체계

### 2.1 신뢰도 및 정비도 할당

시스템엔지니어링 프로세스 과정을 거치면서 기능분석을 통해 시스템 최상위 수준의 정의가 결정되면 다음 단계로 진행되는 것은 기능분석 결과를 시스템의 하위시스템 및 차 하위 시스템 수준으로 분할(Partitioning)하는 것이다. 이 때 분할되는 각



[Figure 1] System Functional Requirements Allocation (Multi-indenture Structure)

그룹은 여러 기능들을 달성할 수 있도록 가능한 가깝게 관련된 기능들을 하나의 패키지로 묶어 자원들을 공통으로 활용할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 이렇게 분할된 패키지들이 시스템의 하위시스템 구성요소로 정해지면 다음단계로는 이 하위시스템들에 대해 최상위 시스템의 요구사항들을 할당하는 단계가 진행된다.

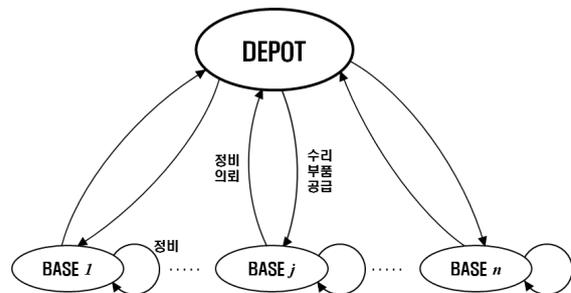
시스템 개발을 위한 성능 및 운영 요구사항 분석과 정비개념 수립의 결과 다양한 종류의 기술성능 척도들에 대한 우선순위가 결정되어 설계기준으로 적용된다. 이 때 운영유지보수를 위한 군수지원시스템 설계의 기초로 사용될 가장 중요한 설계모수(Design Parameter)는 운용가용도라 할 수 있고, 시스템의 목표 운용가용도를 달성하기 위해 신뢰도와 정비도 간에 경제적 파급효과의 균형을 이룰 수 있는 시스템 신뢰도 및 정비도 할당이 이루어진다. 시스템 수준에서의 가용도 및 신뢰도 기준은 목표 달성을 할 수 있도록 하위 시스템 및 차 하위시스템으로 순차적으로 할당이 진행되어 최종 부품 단위까지 할당된다. Figure 1은 시스템의 가용도 및 신뢰도를 비롯한 정비도 등의 기술성능척도와 비용의 할당을 간략히 보여준다. 시스템의 계층구조는 수리 교체가 가능한 1단계 하위시스템과 수리 가능 혹은 불가능한 2단계 차 하위시스템 및 차 차위 하위시스템으로 전개된다.

하위시스템인 1단계 구성품(First Indenture Item)은 시스템에서 바로 탈거가 가능한 수리부속품을 의미하며, 소요군의 특성에 따라 LRU 혹은 WRA(Weapon Replaceable Assembly)라고 한다. 2단계 구성품(Second Indenture Item)은 1단계 구성품에서 분리된 부품을 의미하며, SRU(Shop Replaceable Unit) 혹은 SRA(Shop Replaceable Assembly)라 한다.

수리가능 구성품(교체 가능한 모듈형 유닛)은 대체로 고가이고, 높은 신뢰도를 가지며, 수요 빈도가 적고, 고장 발생 부분을 수리 후 재사용 할 수 있다(고장 모듈의 고장 부속품만 교체) [2].

### 2.2 다단계 정비체계 구조

Figure 2는 군 정비지원체계에서 수리 가능한 부품(Spare Part)의 수리, 공급 문제를 다단계 수리



[Figure 2] Two-Echelon Maintenance Inventory System

체계로 관리하고 있는 구조를 도식화 한 것이다. 기지(Base)에서 운용되고 있는 시스템의 수리부속품에 고장이 발생하면, 그 고장이 기지 수리가 가능한가를 판단하여, 가능한 경우 기지에서 수리하고, 기지 수리가 불가능한 경우에는 정비창(Depot)으로 보낸다.

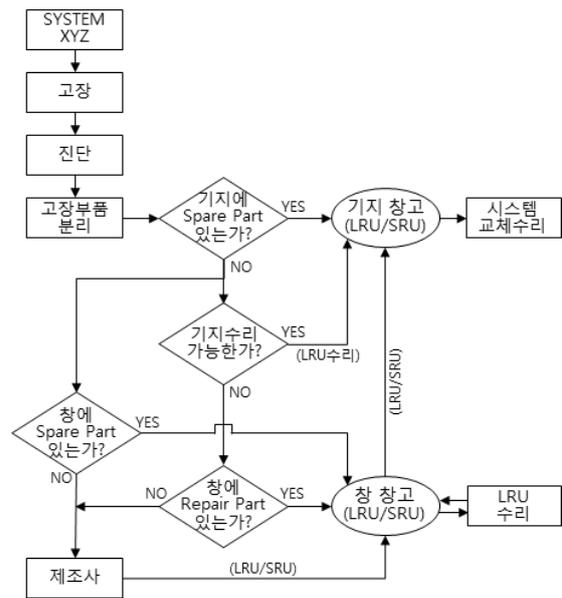
### 3. V-METRIC

Figure 1 및 2에서 보는 바와 같이 수리 구성품의 구조가 다 계층(Multi-Indenture)을 갖고 있는 시스템에 대한 수리가 Figure 2와 같은 다 단계(Multi-Echelon)의 정비지원체계에 의해 수행될 때 이에 대한 수리부품 재고수준 최적화를 위해 개발된 최초의 모형은 Sherbrooke의 METRIC 모델이다. 그 후 이 모형의 효율을 다소 향상 시킨 것으로 평가되는 모형이 Slay에 의해 발전된 V-METRIC 모델이다.

V-METRIC은 창과 기지로 구성된 다 단계 수리 구조와 수리부속의 계층구조까지 고려한 재고모형인 METRIC을 기반으로, 제한된 비용 내에서 최상의 가용도를 얻을 수 있는 수리부품의 적정 재고수준을 결정하거나, 주어진 가용도 목표를 달성하면서 수리부품 재고비용을 최소화하기 위해 활용할 수 있는 모델이다.

#### 3.1 정비 및 수리부속 재고의 개념

Figure 3은 기지와 창이 포함된 2단계 정비 및 재고 시스템에서 수리부속의 흐름을 도식화한 것이다. 기지에서 운용중인 시스템에 고장이 발생하면, 고장진단 후 고장 난 구성품을 시스템에서 분리한다. 이 때 시스템에서 바로 탈거되는 고장 구성품이 LRU가 된다. 고장으로 탈거된 LRU는 수리가능 여부에 따라 기지 또는 창에서 수리하는데, 기지 창고에 LRU의 예비품(Spare)이 있으면 교체를 하고, 그렇지 않을 경우 기지에서는 창에, 창에도 없을 경우 제조사에 조달 요청하며, 이 때 이월주문(Backorder)이 발생하게 된다.



[Figure 3] Flow of Repair Parts Inventory Model

기지 혹은 창에 수리부품(SRU)이 있을 경우 해당 위치에서 수리를 완료한 후, 수리가 완료된 구성품(LRU)을 창에 보관하거나, 기지창고로 보내, 후에 해당 구성품(LRU)의 고장이 발생할 경우 교체할 수 있도록 재고로 활용한다[2].

### 3.2 모델

#### 3.2.1 가정

- 1) 각 기지에서의 수요는 독립적이며, 포아송 프로세스를 따른다.
- 2) 재고 정책은 (s-1, s)를 따른다.
- 3) 기지와 창의 정비능력은 충분하고, 고장품은 입고 즉시 정비된다.
- 4) 창에서는 모든 수리가 가능하고, 고장품의 폐기는 없다.
- 5) 기지간의 전환 보급(Lateral Supply)은 허용하지 않는다.
- 6) 동류 전용(Cannibalization)은 허용하지 않는다.
- 7) LRU 및 SRU의 고장간 시간간격은 지수분포를 따른다.
- 8) 평균 발주 및 수송시간(OST: Order and Ship Time) 및 수리시간은 일정하다.

### 3.2.2 기호 및 용어

V-METRIC의 주요개념으로 기대부재고(EBO: Expected Backorders)와 재보급선 재고(Pipeline)가 있다. 기대부재고는 보급요청에 대해 재고가 없어 수요를 충족시키지 못할 때 발생하는 재고부족량의 기댓값이고, 재보급선 재고는 수리중이거나 재보급중인 재고로 기지나 창으로 들어올 예정인 재고를 의미한다.

V-METRIC 모형에 필요한 기호의 정의는 다음과 같다.

#### Input Variable

- $h$  = LRU 식별 번호(Family number)
- $i$  = 부품 종류(LRU:  $i = 0$ , SRU:  $i = 1, 2, \dots, I$ )
- $j$  = 수리 위치(Depot:  $j = 0$ , BASE:  $j = 1, 2, \dots, J$ )
- $m_{hij}$  = 부품  $hi$ 에 대한 창 및 기지  $j$ 에서의 연간 평균 수리소요대수
- $r_{hij}$  = 부품  $hi$ 의 기지  $j$ 에서의 수리 확률( $j > 0$ )
- $T_{hij}$  = 부품  $hi$ 에 대한 창 및 기지  $j$ 에서의 대당 평균 수리시간(년 단위)
- $q_{hij}$  = LRU 고장시 그 원인이 SRU  $i$ 의 결함으로 고장날 확률( $i > 0$ )
- $O_{hij}$  = 창 또는 기지  $j$ 까지 평균 발주 및 수송시간
- $c_{hij}$  = 부품  $hi$ 의 단가
- $X_{hij}$  = 창 및 기지  $j$ 에서 수리(Repair) 또는 재보급중(Resupply)인 부품  $hi$ 의 수
- $Z_0$  = 시스템 한 대당 LRU의 수 (QPA, Quantity per Assembly)
- $N_j$  = 기지  $j$ 의 시스템 보유대수
- $A_j$  = 기지  $j$ 의 가용도
- $A_T$  = 목표 운용가용도
- $OT$  = 연간 운영시간
- $CF_{hi}$  = 부품  $hi$ 의 복잡도 요인
- $\lambda_{hi}$  = 부품  $hi$ 의 고장률
- $\lambda_{sys}$  = 시스템 전체 고장률
- $DV_{hij}$  = 부품  $hi$ 의  $j$ 에서 EBO 감소효율

#### Decision Variable

$s_{hij}$  = 부품  $hi$ 의  $j$ 에서 재고수준

#### Output Variable

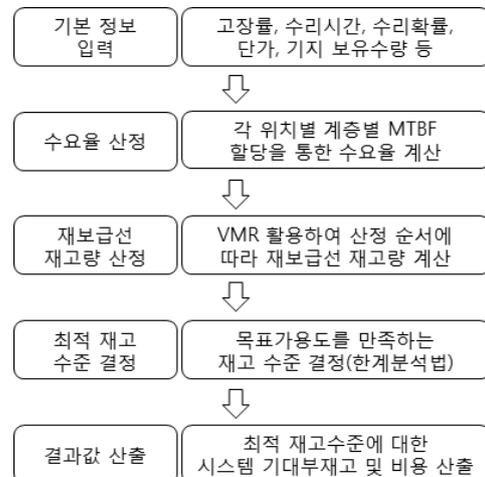
- $A$  = 시스템 가용도
- $C$  = 시스템 총비용

### 3.2.3 적용 및 계산 절차

V-METRIC의 적용은 기지와 창에서 LRU 및 SRU 수요율을 각각 계산한 후, 이를 바탕으로 기지와 창의 재보급선 재고량의 평균과 분산을 계산하는 단계로 되어있다.

모델의 계산절차는 기지 LRU의 수요율을 바탕으로 창의 LRU, 기지의 SRU, 그리고 창의 SRU를 계산하고, 재보급선 재고량은 분산 대 평균비(VMR: Variance to Mean Ratio)를 이용하여 분포를 결정 한 후, 이를 적용하여 수요율 계산의 역순으로 계산한다.

앞에서 언급한 바와 같이 운용 실적이 없는 전력화 단계의 시스템을 대상으로 할 경우, 시스템의 가용도 목표 달성을 위해 시스템에 할당된 MTBF를 기준으로 각 계층별로 하위시스템에 할당된 MTBF를 통해 구성품의 수요율을 계산해보았다. Figure 4는 수정된 V-METRIC 모델적용과정을 보여준다.



[Figure 4] Modified V-METRIC Model Flow

<Table 1> Demand Rate Calculation Formula

Indenture/Echelon	Calculation Formula
LRU BASE( $m_{h0j}$ )	$\lambda_{sys} \times CF_{h0} \times OT \times N_j$
SRU BASE( $m_{hij}$ )	$\lambda_{h0} \times CF_{hi} \times OT \times N_j$
LRU DEPOT( $m_{h00}$ )	$\sum_{j=1}^J m_{h0j}(1-r_{h0j})$
SRU DEPOT( $m_{hi0}$ )	$\sum_{j=1}^J m_{hij}(1-r_{hij})$

**1) 기지/창 별 제품의 수요율 계산**

수요율은 목표가용도, 시스템 MTBF, 그리고 연간 운영시간을 기준으로 각 위치별 계층별로 Table 1의 식에 따라 MTBF 할당을 통해 산출한다. MTBF 할당 시에 타당한 복잡도 요인(Complexity Factor)을 이용했으며, 각 기지별로 보유하고 있는 시스템 수도 고려한다.

시스템 고장률과 CF값의 곱으로 LRU의 고장률을 계산하고, 이 값에 연간 운영시간과 해당 기지에서 보유하고 있는 시스템의 수를 곱하여 기지에서 LRU 수요율을 산출한다. 기지에서 SRU의 수요율은 상위 계층인 LRU의 고장률에 CF값, 연간 운영시간, 기지에서 보유하고 있는 시스템의 수를 곱하여 산출한다. 마지막으로 창 수요율은 부품별로 기지 수요율을 바탕으로 각 기지에서 수리가 불가능한 확률을 고려하여 계산한다.

**2) 재보급선 재고량의 평균과 분산 계산**

앞 단계에서 계산된 수요율을 바탕으로 재보급선 재고량의 평균과 분산을 산출한다. 이를 위해 계산 순서에 따라 기대부재고, 분산을 구한다. 이 때, VMR을 활용하여 재보급선 재고량의 확률분포를 추정하는데, VMR이 1이면 포아송 분포를 적용하고, 1 이상인 경우에 음이항 분포를 적용한다.

기대부재고( $EBO(s)$ )와 분산( $VBO(s)$ )은 다음과 같은 기본식을 이용해서 계산할 수 있다[5].

$$EBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s)Pr\{x\}$$

$$VBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s)^2Pr\{x\} - [EBO(s)]^2$$

이는 무한대까지 확률분포를 반복 계산해야하지만, 분포값이 커지면 확률값이 0에 가까워지므로, 일반적으로 임의의 수인 100을 대입하거나, 대칭계산법을 활용한다.

(1) SRU DEPOT

창의 SRU 재보급선 재고량은 포아송 고장에 대한 수리과정으로 평균과 분산이 같다.

$$E[X_{hi0}] = Var[X_{hi0}] = m_{hi0} T_{hi0} + EBO(s_{hi0} | m_{hi0} T_{hi0})$$

(2) LRU DEPOT

창에서 SRU의 기대부재고 계산값을 이용한 창의 LRU 재보급선 재고량의 평균과 분산 계산식은 다음과 같다.  $f_{hi0}$ 는 창에서 LRU 수리를 위해 필요한 SRU 수요의 비율을 의미한다.

$$f_{hi0} = \frac{m_{h00} q_{hi0}}{m_{hi0}} \quad i > 0$$

$$E[X_{h00}] = m_{h00} T_{h00} + \sum_{i=1}^I f_{hi0} EBO(s_{hi0} | m_{hi0} T_{hi0})$$

$$Var[X_{h00}] = m_{h00} T_{h00} + \sum_{i=1}^I f_{hi0} (1-f_{hi0}) EBO(s_{hi0} | m_{hi0} T_{hi0}) + \sum_{i=1}^I f_{hi0}^2 VBO(s_{hi0} | m_{hi0} T_{hi0})$$

(3) SRU BASE

창에서 계산된 SRU의 기대부재고 값을 이용하여, 기지에서 SRU 재보급선 재고량의 평균과 분산 계산식은 다음과 같다.  $f_{hij}$ 는 창의 SRU 수요 중 기지 j의 SRU 수요가 기여하는 비율을 의미하며, 각 기지에서  $f_{hij}$  값을 합하면 1이 된다.

$$f_{hij} = \frac{m_{hij}(1-r_{hij})}{m_{hi0}} \quad i, j > 0,$$

$$\sum_{j=0}^J f_{hij} = 1 \quad i > 0$$

$$E[X_{hij}] = m_{hij} [(1-r_{hij})O_{hij} + r_{hij}T_{hij}] + f_{hij} EBO(s_{hi0} | m_{hi0} T_{hi0}) \quad i, j > 0$$

$$\begin{aligned} Var[X_{hij}] &= m_{hij}[(1-r_{hij})O_{hij} + r_{hij}T_{hij}] \\ &+ f_{hij}(1-f_{hij})EBO(s_{hi0}|m_{hi0}T_{hi0}) \\ &+ f_{hij}^2 VBO(s_{hi0}|m_{hi0}T_{hi0}) \quad i, j > 0 \end{aligned}$$

(4) LRU BASE

앞 단계에서 구한 창 의 LRU와 기지에서 의 SRU 기대부재고 계산값을 이용해서 기지에서 LRU 재보 급선 재고량의 평균과 분산을 계산한다.  $f_{h0j}$ 는 창 의 LRU 수요 중에서 기지  $j$ 에서의 LRU 수요가 기여 하는 비율을 의미하며, 각 기지에서 의  $f_{h0j}$ 값을 합하 면 1이 된다.

$$f_{h0j} = \frac{m_{h0j}(1-r_{h0j})}{m_{h00}} \quad j > 0, \quad \sum_{j=0}^J f_{h0j} = 1$$

$$\begin{aligned} E[X_{h0j}] &= m_{h0j}[(1-r_{h0j})O_{h0j} + r_{h0j}T_{h0j}] \\ &+ f_{h0j}EBO(s_{h00}|E[X_{h00}], Var[X_{h00}]) \\ &+ \sum_{i=1}^I EBO(s_{hij}|E[X_{hij}], Var[X_{hij}]) \quad j > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Var[X_{h0j}] &= m_{h0j}[(1-r_{h0j})O_{h0j} + r_{h0j}T_{h0j}] \\ &+ f_{h0j}(1-f_{h0j})EBO(s_{h00}|E[X_{h00}], Var[X_{h00}]) \\ &+ f_{h0j}^2 VBO(s_{h00}|E[X_{h00}], Var[X_{h00}]) \\ &+ \sum_{i=1}^I VBO(s_{hij}|E[X_{hij}], Var[X_{hij}]) \quad j > 0 \end{aligned}$$

3) 한계분석법(Marginal Analysis) 적용

V-METRIC에서는 한계분석법을 이용하여 적정 재고수준을 결정하는데, 이는 모든 부품의 재고를 0 으로 고정하고, 기대부재고의 감소효율이 가장 높은 부품의 재고수준을 한 단위씩 증가시키는 방법이다. PBL 계약 시 요구되는 목표가용도를 만족할 때까 지 반복하고, 만족하면 종료한다[2].

최적 해를 산정하기 위한 한계분석법은 아래와 같은 단계로 수행한다.

단계 1 : 기준이 되는 목표가용도를 설정한다.

단계 2 : 모든 재고수준을 0으로 설정하고, 위치별 계층별 기대부재고를 계산한다.

단계 3 : 적정재고수준 결정을 위해 위치별 계층별 DV(Delta Value)값을 계산한다.

$$DV_{hij} = \{EBO(s_{hij}) - EBO(s_{hij} + 1)\} / c_{hij}$$

단계 4 : DV값이 가장 높은 부품의 재고를 1만큼 추가한다.

단계 5 : 목표가용도를 만족할 때까지 반복한다.

단, 재고수준의 변경에 따라 부품의 효율의 변경 되므로 기대부재고 및 DV값을 재계산해야 한다.

4) 시스템의 기대부재고, 비용 및 가용도 계산

한계분석법의 결과로 다 단계, 다 계층에서의 최 적 재고수준이 결정되면, 그 값을 기준으로 시스템 의 기대부재고, 비용, 그리고 가용도를 계산한다. 각 각의 계산식은 아래와 같다[6].

(1) 기대부재고(EBO)

시스템의 기대부재고는 모든 기지에서 LRU의 기 대부재고를 합한 값으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$EBO_{System} = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J EBO(s_{h0j}|E[X_{h0j}], Var[X_{h0j}])$$

(2) 비용(Cost)

시스템의 총 비용은 창과 기지  $j$ 에서 부품  $hi$ 의 재고수준( $s_{hij}$ )과 단가( $c_{hij}$ )를 곱한 값의 합이다.

$$COST_{System} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J s_{hij} c_{hij}$$

(3) 가용도(Availability)

기지  $j$ 에서의 가용도( $A_j$ )는 기지에서 LRU의 기 대부재고( $EBO(s_{h0j})$ ), 시스템의 수( $N_j$ ), 그리고 LRU 의 수량( $Z_0$ )을 이용하여 아래와 같은 식으로 계산 할 수 있으며, 이를 바탕으로 시스템 가용도( $A$ )를 구할 수 있다[5].

$$A_j = \left\{ 1 - \frac{EBO(s_{h0j}|E[X_{h0j}], Var[X_{h0j}])}{N_j Z_0} \right\}^{Z_0} \quad j > 0$$

$$A = \frac{\sum_{j=1}^J A_j N_j}{\sum_{j=1}^J N_j}$$

#### 4. 데이터 적용 및 결과 분석

##### 4.1 데이터 적용을 위한 MIME 환경 가정

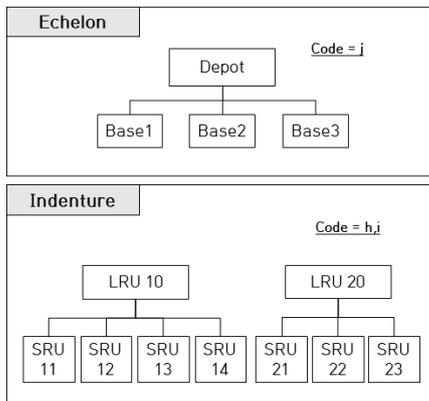
데이터를 적용하기 위해 사용한 MIME 구조는 Figure 5와 같이 1개의 창과 3개의 기지 환경에서 2개의 LRU가 각각 4개, 3개의 SRU를 갖는 다계층 구조라고 가정한다.

본 적용사례의 최적 재고량 산정을 수행하기 위해 필요한 부품의 단가와 평균 주문 및 수송시간, 고장발생률, 수리율, 수리시간, 기지별 시스템 보유 수량 등 수리에 대한 기본 데이터를 입력하였다.

##### 4.2 수요율 계산(MTBF 할당)

MTBF의 할당을 이용한 수요율 계산을 위해서는 Table 2와 같은 정보가 필요하다. 시스템의 목표 운용가용도는 99.8%, 시스템의 MTBF는 950 hours, 그리고 연간 운용 시간은 360 hours으로 가정한다.

위치별 계층별로 시스템의 MTBF를 기준으로 단계별 할당을 통해 수요율을 산출한다. 3곳의 기지



[Figure 5] MIME Structure Model

<Table 2> Basic Information for Model Application

Measure	DATA
Target Operational Availability	0.998
MTBF	950 hrs/yr
Failure Rate ( $\lambda$ )	0.0011
$\bar{M}ct$	1.9038 hrs/yr
Operating time per year	360 hrs/yr

<Table 3> Calculation of Demand Rate

h	i	Code	DP	B1	B2	B3
1	0	LRU10j	4.28	3.05	7.05	4.70
1	1	SRU11j	1.02	1.53	3.52	2.35
1	2	SRU12j	0.25	0.37	0.85	0.56
1	3	SRU13j	0.29	0.43	0.99	0.66
1	4	SRU14j	0.49	0.73	1.69	1.13
2	0	LRU20j	2.62	1.87	4.32	2.88
2	1	SRU21j	0.25	0.37	0.86	0.58
2	2	SRU22j	0.50	0.75	1.73	1.15
2	3	SRU23j	0.50	0.75	1.73	1.15

h	i	n <sub>ij</sub>	T <sub>ij</sub>	Q <sub>ij</sub>	Q <sub>ij</sub>	m <sub>ij</sub>	T <sub>ij</sub>	EB0i(MT)	VB0i(MT)	h <sub>ij</sub>	EB0i(j)	Var0i(j)	Distribution	EB0i(j)	VB0i(j)
1	0	1	0.2	0	195,400,000	4.28	0.8952						Poisson	0.8952	0.8952
1	1	1	0.16	0.5	11,408,000	1.02	0.1635	0.1635	0.1635	2.09	0.3270	0.3270	Poisson	0.1635	0.1635
1	2	0	1	0.16	0.12	9,672,000	0.25	0.0392	0.0392	2.09	0.0785	0.0785	Poisson	0.0392	0.0392
1	3	0	1	0.16	0.14	1,550,000	0.29	0.0458	0.0458	2.09	0.0916	0.0916	Poisson	0.0458	0.0458
1	4	0	1	0.16	0.24	1,736,000	0.49	0.0765	0.0765	2.09	0.1570	0.1570	Poisson	0.0765	0.0765
1	0	1	0.89	1	0	195,400,000	0.5	0.3543		0.28	4.4343	4.4343	Poisson	0.3543	3.9543
1	1	1	0.8	0.45	0.5	11,408,000	0.2	0.153	0.153	0.30	0.5977	0.5977	Poisson	0.153	0.8872
1	2	1	0.8	0.55	0.12	9,672,000	0.13	0.0216		0.30	0.1625	0.1625	Poisson	0.0216	0.2016
1	3	1	0.8	0.54	0.14	1,550,000	0.12	0.043	0.043	0.30	0.2202	0.2202	Poisson	0.043	0.2665
1	4	1	0.8	0.82	0.24	1,736,000	0.34	0.073	0.073	0.30	0.5102	0.5102	Poisson	0.073	0.6011
1	0	2	0.70	1	0	195,400,000	0.5	0.705	0.705	0.49	10.4444	10.4444	Poisson	0.705	7.0444
1	1	2	0.85	0.45	0.3	11,408,000	0.2	0.232	0.232	0.52	1.583	1.583	Poisson	0.232	1.583
1	2	2	0.85	0.55	0.12	9,672,000	0.13	0.0452		0.52	0.4322	0.4322	Poisson	0.0452	0.4652
1	3	2	0.85	0.6	0.14	1,550,000	0.12	0.099	0.099	0.52	0.5447	0.5447	Poisson	0.099	0.5921
1	4	2	0.85	0.82	0.24	1,736,000	0.34	0.189	0.189	0.52	1.2286	1.2286	Poisson	0.189	1.3871
1	0	3	0.89	1	0	195,400,000	0.55	0.79	0.79	0.22	7.1026	7.1026	Poisson	0.79	4.6989
1	1	3	0.82	0.45	0.5	11,408,000	0.2	0.235	0.235	0.18	1.0403	1.0403	Poisson	0.235	1.0573
1	2	3	0.82	0.55	0.12	9,672,000	0.13	0.058	0.058	0.18	0.2884	0.2884	Poisson	0.058	0.3101
1	3	3	0.82	0.6	0.14	1,550,000	0.12	0.086	0.086	0.18	0.2779	0.2779	Poisson	0.086	0.3047
1	4	3	0.82	0.82	0.24	1,736,000	0.34	0.153	0.153	0.18	0.8688	0.8688	Poisson	0.153	0.9248
2	0	1	0.2	0	1,880,000,000	2.62	0.5242			-	1.3628	1.3628	Poisson	0.5242	0.5242
2	1	0	1	0.16	0.2	17,360,000	0.25	0.0401	0.0401	2.09	0.0802	0.0802	Poisson	0.0401	0.0401
2	2	0	1	0.16	0.4	3,100,000	0.50	0.0802	0.0802	2.09	0.1604	0.1604	Poisson	0.0802	0.0802
2	3	0	1	0.16	0.4	3,100,000	0.50	0.0802	0.0802	2.09	0.1604	0.1604	Poisson	0.0802	0.0802
2	0	1	0.6	0.81	0	1,880,000,000	1	1.5163		0.28	2.8804	2.8804	Poisson	1.5163	1.5163
2	1	1	0.8	0.49	0.2	17,360,000	0.45	0.073	0.073	0.30	0.1924	0.1924	Poisson	0.073	0.1925
2	2	1	0.8	0.58	0.4	3,100,000	0.2	0.0434		0.30	0.4014	0.4014	Poisson	0.0434	0.4343
2	3	1	0.8	0.58	0.4	3,100,000	0.2	0.0434		0.30	0.4014	0.4014	Poisson	0.0434	0.4343
2	0	2	0.7	0.81	0	1,880,000,000	1	4.32	3.4992	0.49	8.4325	8.4325	Poisson	3.4992	3.4992
2	1	2	0.85	0.49	0.2	17,360,000	0.45	0.095	0.095	0.52	0.4398	0.4398	Poisson	0.095	0.4324
2	2	2	0.85	0.58	0.4	3,100,000	0.2	0.052		0.52	0.4545	0.4545	Poisson	0.052	1.0022
2	3	2	0.85	0.58	0.4	3,100,000	0.2	0.052		0.52	0.4545	0.4545	Poisson	0.052	1.0022
2	0	3	0.8	0.81	0	1,880,000,000	1	2.88	2.3328	0.22	4.1760	4.1760	Poisson	2.3328	2.3328
2	1	3	0.82	0.49	0.2	17,360,000	0.45	0.095	0.095	0.18	0.2878	0.2878	Poisson	0.095	0.3022
2	2	3	0.82	0.58	0.4	3,100,000	0.2	0.052		0.18	0.4478	0.4478	Poisson	0.052	0.8882
2	3	3	0.82	0.58	0.4	3,100,000	0.2	0.052		0.18	0.4478	0.4478	Poisson	0.052	0.8882

[Figure 6] Calculation of Pipeline Using Excel VBA

가 보유하고 있는 시스템의 수는 각각 13대, 30대, 20대로 가정하였으며, 수요율 계산 결과는 Table 3과 같다.

##### 4.3 재보급선 재고량 계산

각 위치별 계층별 대상을 계산 순서에 따라 재보급선 재고량을 계산한다. Figure 6은 Excel VBA를 이용한 계산과정을 나타내었고, 재고수준이 0일 때 부품의 재보급선 재고량이 포아송 분포를 따르는 것을 확인 할 수 있다. 한계분석을 진행하면 재보급선 재고량의 분포가 VMR에 따라 음이항 또는 포아송으로 나타난다.

##### 4.4 한계분석법 적용

목표가용도 99.8%를 만족하는 알고리즘 수행 결과로 창과 기지에서 계층별 최적 재고 수량을 산출

<Table 4> Allocation of Items

h	i	Code	DP	B1	B2	B3
1	0	LRU10j	4	8	14	11
1	1	SRU11j	3	5	8	6
1	2	SRU12j	2	3	4	4
1	3	SRU13j	2	4	6	5
1	4	SRU14j	3	6	8	7
2	0	LRU20j	2	4	7	6
2	1	SRU21j	2	3	4	3
2	2	SRU22j	3	5	7	6
2	3	SRU23j	3	5	7	6

하여 Table 4에 나타내었다. 해당 시스템은 99.81%의 가용도를 가지며, 1년간 총 재고 소요 비용은 40,023,046,000원으로 산출되었다.

**4.5 결과분석**

Figure 7은 알고리즘의 단계별 적용에 따라 목표 가용도를 만족할 때까지 할당된 재고수준의 증가로 전체 재고 비용이 증가하는 것을 보여준다.

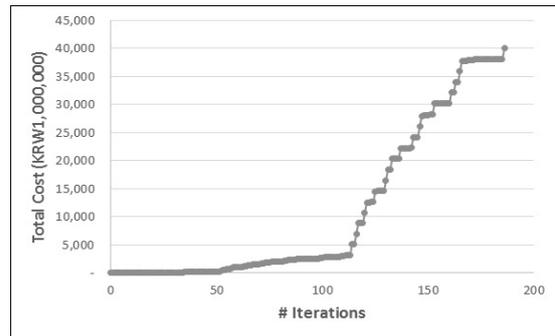
Figure 8은 SRU, LRU1, 그리고 LRU2의 재고 수준의 변화를 나타낸 그래프이다. 51번째 반복까지는 SRU의 재고가 증가하는 것을 확인할 수 있고, 그 이후에 LRU1과 LRU2의 재고가 증가하는 것을 확인할 수 있다. DV값이 비용을 기준으로 나눈 값이므로, 가격이 상대적으로 낮은 SRU부터 재고수준이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

**4.6 MTBF 변화에 따른 재고수준과 비용**

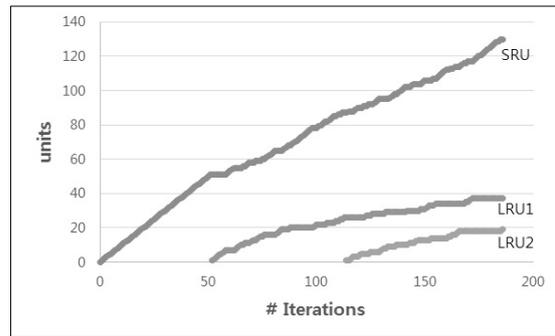
MTBF할당 변화에 따른 비용의 변화는 Figure 9와 같다. 시스템 MTBF가 증가할수록 시스템 재고와 총비용이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

**5. 결론**

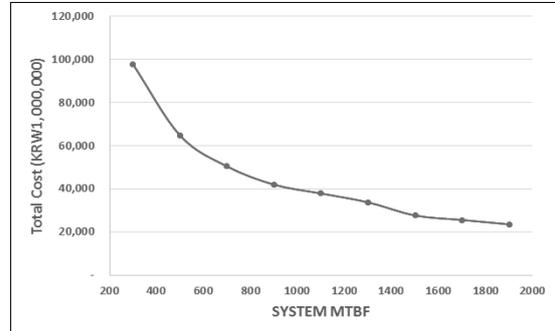
본 연구에서는 개발된 시스템의 전력화와 함께 이루어지는 PBL 계약에 활용하기 위한 수리부속 재고량에 대한 예측을 위해 다 단계 다 계층의 환경에서 V-METRIC 모형을 적용하였다. 새로운 시스템



[Figure 7] Evolution of Cost Estimation



[Figure 8] Number of Units of Item Allocated



[Figure 9] System MTBF-Cost Curve

의 운영실적이 없기 때문에 수리부품의 수요율을 MTBF의 할당을 통해 산정 및 적용하였다.

PBL 계약의 주요지표인 목표가용도를 기준으로 한계분석법을 통한 최적 재고수준을 탐색하였으며, 그 결과로 시스템 전체의 기대부재고, 가용도, 그리고 총 재고비용을 산출하였다. 이를 통해 목표가용도의 변경이나, 예산비용의 변화 등이 있을 경우 예상되는 재고와 가용도, 비용 등을 확인할 수 있다. 또한, MTBF의 할당에 따른 부품 재고수준과 전체

비용의 변화를 확인할 수 있기 때문에 시스템 설계 시 목표가용도를 달성하기 위한 신뢰도와 정비도 할당의 균형을 찾는 데 활용할 수 있을 것이다.

## References

1. A.Y. JIN, H.S. LEE, Cost Analysis Methodology for Performance Based Logistics of Equipment Maintenance, 국방정책연구, 제32권 제3호, p225-276, 2016.
2. Y.H. Kim, S.Y. Lee, Review of Studies on V-METRIC Related Models, Journal of the Korean Society of Systems Engineering, Vol.12, No.2, p47-57, 2016.
3. Y.H. Kim, S.Y. Lee, Review of Studies on V-METRIC for Repairable Parts Inventory Management, 2016 Fall Systems Engineering Symposium, p46.
4. Y.H. Kim, S.Y. Lee, Review of Research on Multi-echelon and Multi-indenture Inventory Models for Repairable Parts, 2016 Spring Systems Engineering Symposium, p37.
5. C.C. Sherbrooke, Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques, Wiley, New York, 1992.
6. F. Costantino, G. Di Gravio, and M. Tronci, Multi-Echelon, Multi-Indenture Spare Parts Inventory Control Subject to System Availability and Budget Constraints, Reliability Engineering and System Safety 119, p95-101, 2013.
7. J. Muckstadt, A Model for Multi- Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System, Management Science 20, p472-481, 1973.
8. F.M. Slay, VARI-METRIC: An Approach to Modelling Multi-Echelon Resupply When the Demand Process is Poisson with a Gamma Prior, Logistics Management Institute, Washington, D.C. Report AF301-3, 1984.
9. C.C. Sherbrooke, VARI-METRIC : Improved Approximations for Multi- Indenture, Multi-Echelon Availability Models, Operations Research 34, p311-319, 1986.
10. W.D. Rustenburg, G.J. van Houtum, and W.H.M. Zijm, Spare Parts Management at the Royal Netherlands Navy: Vari-Metric and Beyond, BETA Working Paper WP-39, University of Twente, 1998.
11. J.W. Woo, A Decision Model for Optimal Aircraft Engine/Module Level, 국방정책연구 제49권, p.115-144, 2000.
12. S.T. Jung, S.J. Lee, Optimal Spare Part Level in Multi Indenture and Multi Echelon Inventory Applying Marginal and Genetic Algorithm, Korean Management Science Review 31, p61-76, 2014.