

동적 환경에서의 동시조달 수리부속품 재고수준 결정 (Determining the Current Spare Parts Level in a Dynamic Environment)

우 제 응*, 강 맹 규**

Abstract

This article develops model of the nonstationary state behavior of the multiechelon spare parts provisioning systems. This study is concerned with a problem of determining the near optimal requirements level of the spare parts, especially Concurrent Spare Parts(CSP). CSP is supplied with the procurement of new equipment system, and is used to sustain the equipment without resupply during the initial coverage period.

We consider this situation as a multiechelon inventory model with several bases and one depot. And we assume an equipment system which consists of many types of parts would grounded if one of the parts fail. Also this multiechelon CSP problem is considering the nonstationary poisson failure process and nonstationary exponential repair process in a dynamic environment.

We develop an efficient computational procedure to find the near optimal number of spare parts minimizing the total expected cost, while achieving the required system availability. Finally we present a simple example of suggested method.

* 한국국방연구원

** 한양대학교 산업공학과

1. 서 론

자원의 효율적 운영측면에서 수명주기 전체기간 동안에 기존의 장비체계가 목표기능을 경제적으로 수행하도록 관리하는 것도 중요하지만, 그렇게 될 수 있도록 고가의 신규 장비체계 도입시 정상보급과의 연계가 원활하도록 고장현상이 집중될 수 있는 초기 일정기간 동안의 운영관리가 더욱 중요하다. 이처럼 초기에 장비체계의 목표 가용도를 보장하고 효율적인 운영유지를 위한 수리부속의 구매 및 보급은 군 및 기업 자원관리의 중요한 문제 중 하나라고 생각된다. 이와 같이 신규장비체계 배치시 장비와 함께 보급되는 수리 및 예비부속품을 초도소요수리부속(CSP : Concurrent Spare Parts)이라고 하며, 이는 배치 후 초기 일정기간 동안 재보급 없이 장비체계의 주어진 운용임무를 수행하기 위하여 사용되는 지원품목이다.

본 연구는 이러한 초도소요수리부속 소요를 산출하는 문제로서 다단계(multi-echelon) 정비 및 보급체계 하에서 운용 유지되고 있는 장비체계의 부품이 시간에 따라 고장률이 변하고 이를 수리하기 위한 능력이 변할 때 즉, 동적환경(dynamic environment)에서 목표수준의 장비 운용가용도를 만족시키기 위해 필요한 부품의 적정 초도 보급량을 산정하고자 한다.

대부분의 CSP관련 기법과 모형들은 고장률 자료를 근거로 대상 품목의 수요를 예측하고 수학적인 기법을 적용하여 비용이나 운용가용도를 척도로 최적 보급 수준을 결정하고 있다.

Richards and McMasters[10]의 모형은 미 해군에 적용되었던 것으로 완제품을 수리하는 데 필요한 1차 예비부품만을 CSP 대상품목으로 선정·분석하

였으며, CSP 운용 기간동안에 정비가 불가능한 것으로 간주하여 재고량을 결정하였다. 따라서 장비배치 시점에 이미 어느 정도의 정비까지는 가능한 점을 전혀 고려할 수 없게 되어 장비 운용시 정비를 통하여 재사용될 수 있는 예비부품인 경우에는 실소요보다 상당히 많은 재고량을 할당하게 된다.

또한 국방대학원 정책연구 보고서에 수록된 김[1]의 CSP 적정소요 산출 모형은 개별 구성품의 운용가용도를 중심으로 모형이 구성되어 전체 시스템의 운용가용도를 분석할 수 없으며, 다단계 개념을 적용하지 않았고, 초도 보급량이 운용되는 기간에서의 총 수요량과 배치된 장비를 지원하는 정비 및 보급체계의 지원능력을 반영할 수 있도록 설계되지 않았다.

기존의 CSP 관련 이론들은 대부분 초기 불확실한 상황을 고려한 동적 확률개념을 반영하지 않거나, CSP 개념에 적절히 부합하지 못하는 모형들로서 실제 소요보다 많거나 적은 소요를 반영함으로써 경제적으로 또는 장비가용도 측면에서 상당한 손실을 초래한다.

CSP 소요산정 문제에 앞서 이러한 문제에 적용할 수 있는 기존의 다단계 수리부품 재고문제를 살펴보면 먼저 Sherbrook[11]의 METRIC 모형은 장비에 고장이 발생하였을 때 여유부품이 존재하면 즉시 교체하고, 존재하지 않으면 부재고가 되며, 부품 발주방식이 $(s-1, s)$ 에 의할 때 기지와 창에서 보유하고 있어야 할 여유 부품수를 결정하였다. Muckstadt[9]의 MOD-METRIC과 Sherbrook[12]의 Vari-METRIC 모형은 더욱 발전된 개념으로 계층적 부품구조를 갖는 모형을 제시하였으나 이들 모두는 정상상태(steady-state)의 모형들이다. 그밖에 박[2],

Cohen et al.[5], Graves[6], Kaplan and Orr[8], Smith et al.[13] 등은 장비 가용도나 서비스 수준을 고려한 재고모형을 제시하였으며 이들 역시 정상상태를 가정한 모형들이다. 한편 Abboud[3], Albright[4] 등은 기지와 창에 병렬로 존재하는 한정된 수리능력과 일정시점에서 고장이 발생할 수 있는 부품이 한정되어 있을 때 전통적 기계-수리 대기모형을 다단계 모형으로 일반화 시켰다.

이와 같이 기존의 문제들은 대부분 평형상태 수요를 가정하고 있으며 이는 동적인 부품수요를 고려해야 하는 CSP 문제의 특징을 정확하게 반영하지 못하고 있다. 따라서 본 연구는 Hillestad[7]의 연구를 중심으로 우발적인 부품수요를 반영할 수 있는 동적 상황 묘사에 중점을 두고 내용을 전개하고자 한다.

먼저 2절에서는 3절에서 사용될 가용도 함수를 표현하기 위한 모수의 특성치들을 유도한다. 즉, 확률분포 함수의 묘사를 위해 각 정비단계 및 보급선 상의 평균 수리대기소요의 특성치들을 유도한다. 특히 수리시간이 지수분포를 따를 때 수리대기 소요분포를 유도한다. 또한 적정 CSP 소요산정을 위한 가용도 중심의 보급기법을 제시한다. 3절에서는 장비의 목표 운용가용도를 충족시킬 수 있도록 각 품목의 단가와 각 품목이 체계의 운용가용도에 미치는 효과의 절충분석을 통하여 품목들간의 재고수량을 결정하는 해법을 제시하고, 4절에서 예제를 이용하여 이 과정들을 설명한다.

2. 모형의 설계

CSP 소요산정을 위해서는 CSP가 운용되는 기간에서의 총수요량과 배치된 장비를 지원하는 정비 및

보급체계의 지원능력을 정확히 반영하여야 한다. 미래에 발생될 수요량을 예측하는 것은 불확실성을 내포하고 있으므로 확률분포함수를 이용하는 것이 바람직하며 분포함수식에 필요한 모수는 부품의 특성, 운용조건 등을 이용하여 추정된 값을 사용한다. 이 모수 중에 대표적인 것이 고장률이다. 그 외에 중요하게 고려될 사항은 지원체계의 지원능력이라 할 수 있는데, 이는 한 번 고장이 발생한 부품은 다시 수리하여 사용할 수 있다는 점과 각 정비계단에서 소요발생시 가지고 있는 재고가 부족할 경우 상위계단에 요청하여 수요를 충족시킬 수 있다는 점이다. 다시 말하면, 각 정비계단에서 확보해야 할 재고수준은 고장 부품 수리에 소요되는 시간과 재고가 부족하여 상위부대에 요청할 때 재고획득에 소요되는 시간이 얼마인가를 고려하여 결정해야 한다.

모형의 해를 산정하기 위해서는 각 품목의 단가와 각 품목이 체계의 운용가용도에 미치는 효과의 절충분석을 통하여 품목들간의 재고수량을 결정하는 한계분석법(marginal analysis)을 사용하여 장비의 목표 운용가용도를 충족시킬 수 있도록 하며 최종적으로 이를 이용하여 최적에 근접한 근사 해법을 제시한다.

정비 및 보급체계는 일반적으로 다단계 형태로 이루어지고 있으며, CSP 소요는 각 계단별로 할당되어야 하는데, 본 연구의 경우는 그림 1처럼 기지(base)와 창(depot)의 2단계로 α 의 비율로 기지수리가 발생하며, β 의 비율로 기지수리에 들어갔던 부품이 다시 창에서 수리받는다고 가정한다. 기지와 창 각각에 대해 수리소요가 발생하며, 그 밖의 주요 가정사항은 다음과 같다.

1) 부품고장은 시점 t 에 강도(intensity) $\lambda(t)$ 인 비정

상 포아송과정(nonhomogeneous poisson process)을 따른다.

- 2) 정비계단에서의 보급요청은 상위 정비계단에만 가능하다.
- 3) 일반기지에서의 재고정책은 수요량 발주($s-1, s$)를 하고 창에서의 재보급은 초도보급 운영기간이 끝나는 시점에서 이루어진다.
- 4) 부품수요를 유발하는 장비운용시간이나 운용횟수가 시간에 따라 변화한다.
- 5) 수리시간은 비정상 지수분포를 따른다.

2.1 기호정의

본 연구에서 사용될 기호들을 정의하면 다음과 같다.

- i : 부품형태를 나타내는 지표(index), $i=1, 2, \dots, N$
 j : 수리위치를 나타내는 지표(창: $j=0$, 기지: $j=1, 2, \dots, J$)

t : 시점을 나타내는 지표, $t=1, 2, \dots, T$

$S_i(t)$: 시점 t 에서 주어진 가용도를 만족시키기 위한 부품 i 의 총 재고수준

$B_{ij}(t)$: 시점 t 에 기지 j 에서 수리 중에 있는 부품 i 의 수

$O_i(t)$: 창과 기지간 이동(order and ship) 중에 존재하는 부품 i 의 수

$D_{i0}(t)$: 시점 t 에서 창 수리 중에 있는 부품 i 의 수

$V_{ij}(t)$: 시점 t 에서 부품 i 에 대한 기지 j 의 부재고 수

$V_{i0}(t)$: 시점 t 에서 부품 i 에 대한 창 부재고 수

$W_{ij}(t)$: 시점 t 에 기지 j 에 재보급 되어야 할 부품 i 의 수

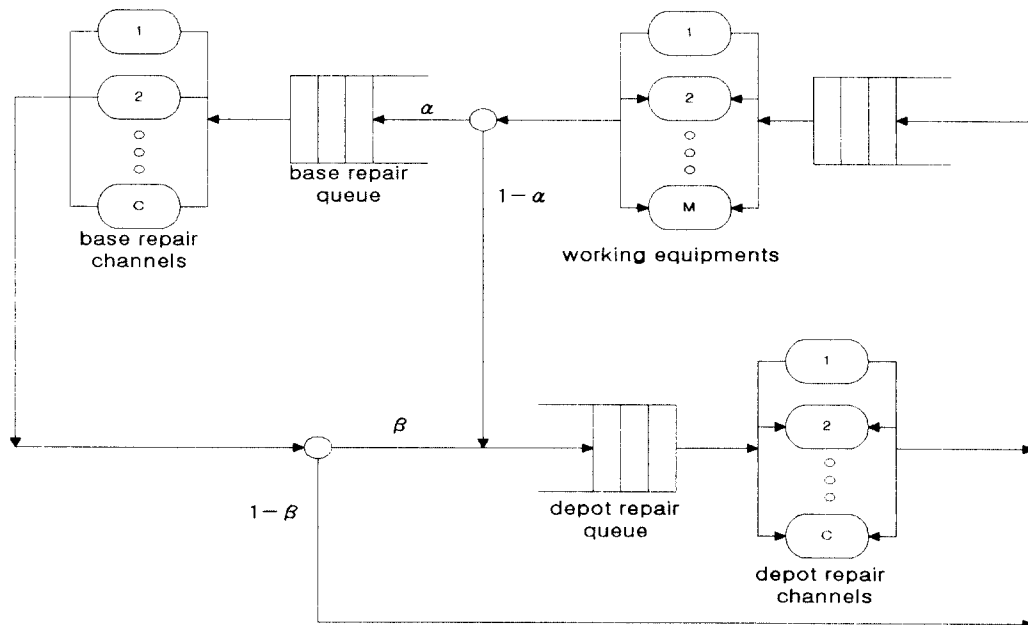
$R_{ij}(t)$: 시점 t 에서 부품 i 에 대한 기지 j 에서의 수리시간

$R_{i0}(t)$: 시점 t 에서 부품 i 에 대한 창 수리시간

$Z_i(t)$: 시점 t 에서 부품 i 에 대한 창과 기지간 이동시간

$\alpha_i(t)$: 부품 i 가 시점 t 에 기지에서 수리될 비율

$\beta_i(t)$: 부품 i 가 시점 t 에 기지에서 서비스가 끝난 후 창에서 수리될 비율



<그림 1> 2단계 수리가능 부품체계의 Block Diagram

$\lambda_{ij}(t)$: 시점 t 에 기지 j 에서 발생하는 부품 i 에 대한 평균 고장 강도
 $A_i(t)$: 시점 t 에서 존재하는 부품 i 의 평균 수리 대기소요
 c_i : 부품 i 의 단가
 $d_i(t)$: 부품 i 에 대한 시점 t 에서의 단위시간당 고장률
 $h(t)$: 시점 t 에서의 장비 운용시간
 π : 희망 신뢰수준 (예: 95%의 신뢰수준이면 $\pi = 0.95$)
 A : 목표 운용가용도 (예: 90% 이면 $A=0.9$)
 q_i : 장비 한대 당 부품 i 의 구성수
 $M(t)$: 시점 t 에서의 장비 대수

2.2 수리대기소요

CSP 소요는 CSP 운용기간 동안 배치되는 장비 전체 대수의 구성품 중 1회 이상 소요가 예상되는 수요품목이 대부분을 차지하므로 이들 품목의 고장 현상과 정비능력에 따른 수리회송시간 등을 고려하여 수리대기 현상을 먼저 분석해야 한다. 일반적으로 부품의 고장간격 시간이 지수분포(exponential distribution)를 따른다고 할 때 임의의 시점에 k 개의 수리대기 소요가 발생할 확률은 포아송 분포로부터 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\Pr(k\text{개의 수리대기소요}) = \frac{e^{-\Lambda(t)} \Lambda(t)^k}{k!} \quad (1)$$

여기서 $\Lambda(t)$ = 평균 수리대기소요

이때 평균 수리대기 소요는 시점에 따라 변화할 수 있으며 따라서 가용도 계산을 위한 첫 번째 단계는 시변량 수리대기소요 즉, 재보급 보급선재고(pipeline)의 확률분포를 유도하는 것이다. 부품 수요가 평형상태를 가정한 기존의 연구와 달리 본 연구

에서는 비정상 포아송과정을 가정한다. 시점 t 에 대한 가용도 계산을 위해서는 그 시점에 영향을 미칠 수 있는 이전 조건들을 고려해야 한다. 먼저 수리시간과 재보급시간이 변하지 않을 때를 가정해 보면 기지에 재보급되어야 할 부품들은 기지에서 수리중이거나 창과 기지간 이동 중(order & ship)인 보급선 상에 있거나, 창에서 부재고 상태로 존재한다. 재보급 보급선 상의 이 세 가지 상황은 확률과정이고, 시간 t 에서의 임의의 재보급 보급선재고량은 확률변수이다. $Z_i(t)$ 를 상수라고 가정하면 식 (2)와 같이 부품 i 의 기지 재보급 보급선재고 수준을 상호 독립적인 세 변수의 합으로 표현할 수 있다.

$$W_{ij}(t) = B_{ij}(t) + O_i(t) + V_{ij}(t - Z_i(t)) \quad (2)$$

$\lambda_{ij}(t)$ 를 시점 t 에 기지 j 에서 발생하는 부품 i 의 수요강도(intensity)라 할 때 다음과 같이 표현한다.

$$\lambda_{ij}(t) = d_i(t) \times h(t) \times q_i \quad (3)$$

다단계 재고관리 개념을 반영하기 위해 창과 기지에서의 수요를 분리하여 생각하면 기지수리 수요는 평균 $\lambda_{ij}(t) \alpha_i(t)$ 인 비정상 포아송과정을 따른다. $B_{ij}(t)$ 는 $[t - R_{ij}(t), t]$ 에 기지수리 수요이고 이는 평균과 분산이 식 (4)와 같은 포아송 확률변수이다.

$$\Phi_i(t) = \int_{t - R_{ij}(t)}^t \lambda_{ij}(t) \alpha_i(t) dt. \quad (4)$$

식 (4)는 수요강도와 $\alpha_i(t)$ 가 연속적이지 않고 이산적일 경우 아래와 같이 표현한다.

$$\Phi_i(t) = \sum_{t - R_{ij}(t) + 1}^t \lambda_{ij}(t) \alpha_i(t)$$

또한 창수리 수요는 평균 $\lambda_{ij}(t) \cdot [1 - \alpha_i(t) + \alpha_i(t) \beta_j(t)]$ 인 비정상 포아송과정을 따르고, $O_i(t)$ 는 $[t - Z_i(t), t]$ 에서의 창 수요이므로 평균과 분산이 식 (5)와 같은 포아송 확률변수이다.

$$\Psi_i(t) = \int_{t-Z_i(t)}^t \lambda_{ij}(t) [1 - \alpha_i(t) + \alpha_i(t) \beta_i(t)] dt. \quad (5)$$

$V_{i0}(t-Z_i(t))$ 의 분포를 얻기 위해서는 $t-Z_i(t)$ 에서 창수리 보급선의 분포를 계산한다. $D_{i0}(t-Z_i(t))$ 는 $(t-Z_i(t)-R_{i0}(t), t-Z_i(t))$ 에서의 창 수요이고, 따라서 창에서의 수요는 평균 $\lambda_i(t) \cdot [1 - \alpha_i(t) + \alpha_i(t) \beta_i(t)]$ 인 비정상 포아송과정을 따른다는 사실로써 $D_{i0}(t-Z_i(t))$ 는 평균과 분산이 식 (6)과 같은 포아송 확률변수라는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \Omega_i(t) &= \int_{t-Z_i(t)-R_{i0}(t)}^{t-Z_i(t)} \lambda_{ij}(t) [1 - \alpha_i(t) \\ &\quad - \alpha_i(t) \beta_i(t)] dt. \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로 $V_{i0}(t)$ 의 분포는 다음과 같다.

$$\Pr(V_{i0}(t)=0) = \sum_{k=0}^{s_{i0}} \frac{[\Omega_i(t)]^k e^{-\Omega_i(t)}}{k!} \quad (7)$$

$$\Pr(V_{i0}(t)=k) = \frac{[\Omega_i(t)]^{s_{i0}(t)+k} e^{-\Omega_i(t)}}{(s_{i0}(t)+k)!}, \quad k > 0. \quad (8)$$

식 (2)의 우변 확률변수들은 각각 독립이고, 또한 위의 식들로부터 계산되므로 보급선 상의 3 요소들을 중합(convolution)하여 기지 재보급 보급선재고 $W_{ij}(t)$ 의 분포를 계산할 수 있다. 그러나 분포의 중합은 계산적으로 복잡한 면이 있으므로 본 연구에서는 보다 편리한 방법을 제시하여 계산의 편의를 제공하고자 한다. 평균과 분산을 이용하여 분포에 근사화하는 방법이다. 앞에서 $B_{ij}(t)$ 와 $O_i(t)$ 의 평균과 분산을 알 수 있었고 $V_{i0}(t-Z_i(t))$ 분포의 평균과 분산을 식 (9), (10), (11)과 같이 직접 구한다.

$$E(V_{i0}(t-Z_i(t))) = \sum_{k=1}^{\infty} k \frac{[\Omega_i(t)]^{s_{i0}(t)+k} e^{-\Omega_i(t)}}{(s_{i0}(t)+k)!} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E[(V_{i0}(t-Z_i(t)))^2] \\ = \sum_{k=1}^{\infty} k^2 \frac{[\Omega_i(t)]^{s_{i0}(t)+k} e^{-\Omega_i(t)}}{(s_{i0}(t)+k)!} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(V_{i0}(t-Z_i(t))) \\ = E[(V_{i0}(t-Z_i(t)))^2] - [E(V_{i0}(t-Z_i(t)))]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

시점 t 에서의 기지 재보급 보급선의 세 요소는 서로 독립인 확률변수라는 것을 알 수 있고 따라서 식 (12), (13)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} E(W_{ij}(t)) &= E(B_{ij}(t)) + E(O_i(t)) \\ &\quad + E(V_{i0}(t-Z_i(t))) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(W_{ij}(t)) &= \text{Var}(B_{ij}(t)) + \text{Var}(O_i(t)) \\ &\quad + \text{Var}(V_{i0}(t-Z_i(t))). \end{aligned} \quad (13)$$

이상에서와 같이 시점 t 에서 기지 재보급 보급선 재고 분포의 평균과 분산을 알 수 있지만 밀도함수 형태는 알 수 없다. 따라서 VMR (Variance to Mean Ratio)을 이용하여 밀도함수 형태를 추정한다. VMR을 계산하여 정확하게 1인 경우, 식(12)에서 얻어진 평균을 갖는 포아송 분포로 근사화시킬 수 있으나 창 재고수준에 따라 오차가 발생할 수 있다. 즉 창 재고수준이 0이 아닌 경우 창부재고 분포는 포아송이 될 수 없다. 이는 기존의 연구 [12]에서도 증명된 바 있다. 이러한 경우 음이항(Negative binomial) 밀도함수로 기지재보급 보급선재고 분포를 근사화하면 더 적은 오차의 분포를 얻을 수 있으며 다음과 같이 적용한다.

$$\Lambda_i(t) = E(W_{ij}(t)), \quad (14)$$

$$\sigma_i^2(t) = \text{Var}(W_{ij}(t)), \quad (15)$$

$$\text{VMR}_i(t) = \frac{\sigma_i^2(t)}{\Lambda_i(t)}. \quad (16)$$

위 식을 이용하여 시점 t에서 기지재보급 보급선 분포를 근사화하면 다음과 같다.

$$\Pr(W_{ij}(t) = k) = \frac{\Gamma\left[k + \frac{\Lambda_i(t)}{VMR_i(t) - 1}\right]}{k! \Gamma\left[\frac{\Lambda_i(t)}{VMR_i(t) - 1}\right]} \times \left[\frac{VMR_i(t) - 1}{VMR_i(t)}\right]^k VMR_i(t) \frac{e^{-\Lambda_i(t)}}{VMR_i(t) - 1},$$

$$VMR_i(t) \approx 1$$

$$\Pr(W_{ij}(t) = k) = \frac{e^{-\Lambda_i(t)} \Lambda_i(t)^k}{k! VMR_i(t)} = 1. \quad (17)$$

따라서 식 (14), (15), (16), (17)을 이용하여 장비 사용도 판단에 사용될 수리 보급선의 확률분포함수를 표현한다.

지금까지는 창과 기지에서의 수리시간이 결정적이라고 가정하였다. 그러나 창과 기지에서의 수리시간은 결정적이기보다는 확률변수에 가깝다. 따라서 수리시간을 지수분포로 가정하는 것이 보다 합리적이다. 정상상태의 수리시간을 가정하면 수리에 대한 수요는 강도 $\lambda_i(s)$ 인 비정상 포아송과정이고 $G_i(s, t)$ 는 s시점에서 고장 발생한 부품이 시점 t까지 수리될 확률이라고 하고, $P_i(t)$ 를 t시점에서 수리 보급선에 있는 부품수라고 하면 $P_i(t)$ 는 평균과 분산이 다음과 같은 포아송 확률변수이다.

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^t [1 - G_i(s, t)] \lambda_i(s) ds. \quad (18)$$

지수 수리시간 분포의 경우 $G_i(s, t)$ 를 계산해야 하며, 먼저 R_i 를 수리시간 확률변수라 하면 다음과 같이 계산한다.

$$G_i(s, t) = \Pr(R_i \leq t - s) = 1 - e^{-\mu_i(t-s)}$$

$$1 - G_i(s, t) = e^{-\mu_i(t-s)} \quad (19)$$

여기서 $1/\mu_i$ 은 평균수리시간 $E(R_i)$ 를 나타낸다. 따라서 Palm's 이론에 의하면 다음과 같다.

$$E[P_i(t)] = \text{Var}\{P_i(t)\} = \int_0^t e^{-\mu_i(t-s)} \lambda_i(s) ds. \quad (20)$$

다음으로 비정상 수리시간의 경우를 가정하면 비정상 수리시간은 수리시간이 확률과정이라는 것을 의미한다. 즉 시간 t에 수리에 들어간 부품에 대한 수리시간은 t에 의존하는 확률분포를 갖는 확률변수 $R_i(t)$ 이다. 비정상 수리시간을 다루기 위해 확률변수의 고장함수(hazard function)를 이용한다. 임의의 시간 확률변수 X에 대한 고장함수 H는 다음과 같이 표현한다.

$$H(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)}. \quad (21)$$

$$\int_s^t H(x) dx = \int_s^t \frac{f(x)}{1 - F(x)} dx = -\ln[1 - F(t)] + \ln[1 - F(s)] = \ln\left[\frac{1 - F(s)}{1 - F(t)}\right], \quad (22)$$

$$\exp\left\{-\int_s^t H(x) dx\right\} = \frac{1 - F(t)}{1 - F(s)} = \frac{\Pr(X > t)}{\Pr(X > s)} = \Pr(X > t | X > s). \quad (23)$$

X_{is} 을 시간 $r \leq s$ 에서 수리에 들어가는 부품 i의 수리시간이라고 하면 위의 식(23)은 시점 s에 여전히 수리중에 있다고 할 때 시점 t까지 완료되지 않을 확률을 나타낸다. 만약 $r=s$ 이면 다음과 같다.

$$\exp\left\{-\int_s^t H_i(x) dx\right\} = \Pr(X_{is} > t) = 1 - G_i(s, t), \quad (24)$$

여기서 $1 - G_i(s, t)$ 는 s에 수리에 들어간 부품이 t까지 끝나지 않을 확률이다. 이것을 $F_i(s, t)$ 로 표현

한다.

$\Delta t \rightarrow 0$ 이라 하면 다음과 같다.

$$H(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{1-F(t)} \\ \approx \Pr(t < RTRV \leq (t+\Delta t) \mid RTRV > t),$$

우변은 t시점에 여전히 수리중에 있다고 할 때 (t, t+Δt)동안 수리가 끝나는 부품의 확률을 의미하며,

$H(t) = \frac{H(t)\Delta t}{\Delta t}$ 는 (t, t+Δt) 에서 전술한 확률의 평균변화율로 해석될 수 있다. 따라서 H(t)는 t시점에서 단위시간당 수리로부터 나오는 부품에 대한 확률변화율이다. 지수 수리시간 분포에 대해 다음과 같이 표현한다.

$$H(t) = \frac{\mu e^{-\mu t}}{1-[1-e^{-\mu t}]} = \mu$$

따라서 고장함수는 상수이다. 즉 수리중에 있는 부품에 대한 출현확률의 변화율은 상수이다. 비정상 지수 수리과정을 모든 s에 대해 $R(s) \geq 0$ 인 확률과정 $\{R(s)\}_s$ 이라 정의할 수 있고 각 s에 대해 확률변수 $R(s)$ 에 대한 고장함수 H_s 는 상수이다.(각 s에 대해 상수라는 말과는 차이가 있음) $RT(s) = \frac{1}{H_s}$ 로 정의하면 s시점에서 고장함수가 모든 시간에 대해 적용될 경우 이것은 평균수리시간에 해당된다.

$$\theta_i(t) = \int_{-\infty}^t F_i(s,t)\lambda_i(s)ds \\ = \int_{-\infty}^t \exp\left\{-\int_s^t \frac{1}{RT_i(x)} dx\right\}\lambda_i(s)ds. \quad (25)$$

식 (21)을 식 (25)에 대입하면 비정상 지수 수리과정에 대한 수리 보급선재고의 평균과 분산을 얻을 수 있다.

상황이 이산적인 경우 수요강도 $\lambda_i(t)$ 는 t를 특정

일(day)이라고 할 때, 주어진 t일 내에서 상수인 계단함수로 표현할 수 있다. 수리시간 확률분포 또는 주어진 기간 내에서는 동일하고, 기간이 경과할 때만 변한다. 즉 $RT_i(t)$ 는 계단함수이다. t일에 보급선 재고의 평균과 분산을 계산하기 위해서는 임의의 t에 대한 $F_i(s, t)$ 를 먼저 계산해야 한다.

$$F_i(s,t) = \exp\left(-\int_s^t \frac{1}{RT_i(u)} du\right) \\ = \exp\left(-\int_s^l \frac{1}{RT_i(l)} du - \sum_{m=l+1}^t \left[\int_{m-1}^m \frac{1}{RT_i(m)} du\right]\right) \\ = \exp\left\{\frac{-(t-s)}{RT_i(l)}\right\} \prod_{m=l+1}^t \exp\left\{\frac{-1}{RT_i(m)}\right\}. \quad (26)$$

이 식을 식 (25)에 대입하면 다음과 같다.

$$\theta_i(t) = \int_{-\infty}^t F_i(s,t)\lambda_i(s)ds \\ = \sum_{l=-\infty}^t \lambda_i(l) \int_{l-1}^l F_i(s,t)ds \\ = \sum_{l=-\infty}^t \lambda_i(l) \left\{ \int_{l-1}^l \exp\left[\frac{-(l-s)}{RT_i(l)}\right] \cdot \prod_{m=l+1}^t \exp\left[\frac{-1}{RT_i(m)} ds\right] \right\} \\ = \sum_{l=-\infty}^t \lambda_i(l) \left\{ \prod_{m=l+1}^t \exp\left[\frac{-1}{RT_i(m)}\right] \right\} \\ \cdot \int_{l-1}^l \exp\left[\frac{-(l-s)}{RT_i(l)}\right] ds \\ = \sum_{l=-\infty}^t \lambda_i(l) \left\{ \prod_{m=l+1}^t \exp\left[\frac{-1}{RT_i(m)}\right] \right\} \\ \cdot \int_0^1 \exp\left[\frac{-w}{RT_i(l)}\right] dw \quad (27)$$

$$K_i(l) = \exp\left[\frac{-1}{RT_i(l)}\right],$$

$$I_i(l) = \int_0^1 \exp\left[\frac{-w}{RT_i(l)}\right] dw \\ = RT_i(l)[1 - K_i(l)]$$

라고 하면 식 (27)은 다음과 같다.

$$\theta_i(t) = \sum_{l=-\infty}^t \lambda_i(l) \left[\prod_{m=l+1}^t K_i(m) \right] I_i(l) \quad (28)$$

RT_i(l)와 λ_i(l)를 알 수 있으므로 이산형의 비정상 지수 수리과정에 대한 수리 보급선재고의 평균과 분산을 얻을 수 있고, 따라서 수리대기 소요 분포를 추정할 수 있다.

2.3 재고수준과 운용가용도

수리대기 소요는 분석하고자 하는 부품의 고장현상과 정비능력을 복합적으로 반영하고 있는데 개별 부품의 부족 및 가용상태를 판단하기 위해서는 수리대기 소요와 재고수준과의 관계를 분석하여야 한다. 부품 단위의 운용가용도를 판단하는 것은 장비 시스템 전체의 임무수행능력을 평가하는 지표로는 미흡하지만 전체 시스템에 영향을 주는 주요 관리대상 부품을 식별하는데 유용하고 전체 시스템의 운용가용도를 산정하기 위한 기반이 된다.

임의의 시점에 수리 중인 부품과 이동중인 부품의 총량인 수리대기 소요가 그 시점의 재고수준(S_i(t))을 초과하면 재고부족 상태에 놓이게 되어 운용가용도를 저하시키는데 재고수준과 수리대기소요 발생 확률과의 관계를 통해 아래와 같은 분석지표들을 구한다.

$$\Pr(\text{임의의 시점에 재고부족 없이 가용}) = \sum_{k=0}^{S_i(t)} \Pr(k/\Lambda_i(t)) \quad (29)$$

부품 단위의 운용가용도 및 재고부족량을 산출하는 것도 의미 있는 일이지만 CSP 소요를 산정하는 궁극적인 목적은 장비 전체시스템의 초기 일정기간 동안의 목표 운용가용도를 유지하는데 있으므로 고장, 정비 및 재고수준의 관계분석을 통한 전체시스템의 운용가용도를 산출해야 한다. 시스템의 목표

운용가용도는 보유하고 있는 장비 중 임무수행이 가능한 장비의 비율로 산출할 수 있다. 시스템의 부품에 고장이 발생하게 되어 이를 교환하거나 정비해야 하는 경우 같은 기능을 하는 부품간의 동류전용(cannibalization)을 허용하는지의 여부에 따라 임무수행이 가능한 장비 대수와 이와 관련된 CSP 소요는 크게 달라진다.

CSP 소요산정시 동류전용의 허용여부는 정책적인 결정이지만 일반적으로 CSP가 운영기간 동안 배치되는 전체 장비를 공통적으로 지원한다는 개념에서 볼 때 동류전용을 허용하는 조건에서 소요를 산정하는 것이 합리적이다. 동류전용 허용정책과 임의의 시점에 CSP로 지원되어야 할 장비의 대수가 결정된 후, 장비의 임무수행에 영향을 미치는 N개의 주요 부품 중 부품 i가 부족한 경우 임무수행이 불가능한 장비의 평균대수를 구한다. 장비 대당 부품 i가 1개 뿐인 경우, 임의의 시점에 부품 i가 y개 이하로 부족할 확률을 Prⁱ(y(t))라고 하면 수리대기 소요의 발생 확률과 부품 i의 재고수준(S_i(t))과의 관계로부터 다음과 같이 구한다.

$$\Pr^i(y(t)) = \sum_{k=0}^{S_i(t)+y} \Pr(k/\Lambda_i(t)) \quad (30)$$

임의의 시점에서 임무수행이 불가능한 장비의 대수가 y(t) 이하일 확률(Pr(y(t)))은 부품이 y개 이하로 부족할 확률들의 곱으로 쉽게 구할 수 있으며 이것은 임무수행 불가능 장비의 분포함수(cdf : cumulative density function)에 해당한다.

$$\Pr(y(t)) = \prod_{i=1}^N \Pr^i(y(t)) \quad (31)$$

분포함수 Pr(y(t))는 확률들의 곱이므로 비음(nonnegative)함수이고 비음함수의 기대값은 이 합

수의 보수(complement)의 합으로 쉽게 구할 수 있으므로 동류전용 허용 하에서의 임무수행 불가 장비의 평균대수는 다음과 같다.

$$E(y(t)) = \sum_{y(t)=0}^{M(t)-1} (1 - \prod_{i=1}^N \Pr^i(y(t))) \quad (32)$$

장비 대당 부품 개수가 1개 이상으로 i 부품이 q_i 개 있는 경우 부품 수가 q_i 개인 i 부품은 1개 부족한 경우나 q_i 개 부족한 경우 모두 1대의 장비가 불가동상태에 놓이게 되고 임무수행을 할 수 없는 장비의 대수가 $y(t)$ 대 이하라면 재고수준을 초과하여 $y(t)q_i$ 개 까지 부족이 일어날 수 있으므로 i 부품이 y 개 이하로 부족할 확률은 다음과 같다.

$$\Pr^i(y(t)) = \sum_{k=0}^{S_i(t)+y(t)q_i} \Pr(k/\Lambda_i(t)) \quad (33)$$

임무수행 불가능 장비의 분포함수와 기대값을 구하는 과정은 부품의 개수가 기껏해야 1개인 경우와 동일하다.

$$\Pr(y(t)) = \prod_{i=1}^N \sum_{k=0}^{S_i(t)+y(t)q_i} \Pr(k/\Lambda_i(t)) \quad (34)$$

$$E(y(t)) = \sum_{y(t)=0}^{M(t)-1} (1 - \Pr(y(t))) \quad (35)$$

따라서 식 (34)를 이용하여 가용도만족 확률함수를 표현한다.

3. 근사 해법

3.1 정형화

부품들의 수리대기 소요가 장비 전체 시스템의 운용가용도에 미치는 영향을 분석하고 장비의 목표 운용가용도를 충족시킬 수 있는 가용도 중심의 보급개념을 모형에 적용한다. 수리대기 소요가 포아송 분포를 따를 경우 장비의 목표 운용가용도, CSP 운용

기간 동안의 평균 배치 대수를 기반으로 고장률, 구성수, 수리기간 등의 입력 요소들을 고려한 CSP 적정 소요산정 모형은 (P1)과 같다.

(P1)

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N c_i S_i(t)$$

$$\text{s.t.} \quad \Pr(S(t), y(t)) \geq \pi$$

$$\Pr(S(t), y(t)) =$$

$$\prod_{i=1}^N \sum_{k=0}^{S_i(t)+y(t)q_i} \frac{e^{-\Lambda_i(t)} \Lambda_i(t)^k}{k!}$$

$$S_i(t) = 1, 2, 3, \dots$$

$$S(t) = (S_1(t), S_2(t), \dots, S_i(t), \dots, S_N(t))$$

$$y(t) = (1 - A)M(t)$$

3.2 해 산정 절차

CSP 품목선정은 부품들의 수리대기 소요 발생확률에 근거하여 선정하고 CSP 적정 소요를 산정하기 위한 품목들간의 재고수량 할당은 각 품목의 단가와 각 품목이 시스템의 운용가용도에 미치는 효과의 절충분석을 통해 결정한다. CSP 적정 소요산정 모형의 해를 구하는 과정은 목표가용도를 만족하는 초기 가능해 탐색 단계[1, 2, 3]와 이 초기해를 이용하여 해를 개선하는 단계[4, 5]로 구성된다.

[단계 1] : CSP 품목의 선정

각 부품에 대한 고장률, 정비계단, 수리기간 등의 입력에 근거한 수리대기 소요의 발생 확률을 기준으로 CSP 운용기간 동안 적어도 1개 이상의 수리대기 소요가 발생할 품목들을 선택하여 CSP 수요품목으로 선정한다. 부품의 수리대기 소요의 발생 확률이 포아송 분포를 따를 때, CSP 품목선정 기준인 적어

도 1개 이상의 소요가 발생할 확률은 다음과 같다.

$$1 - e^{-\Lambda_i(t)} > 0$$

[단계 2] : 초기 CSP 소요 산정

모형의 조건식은 시스템 운용가용도에 영향을 주는 각 부품들의 확률 값으로 표현되기 때문에 필수적으로 각 부품에 대한 시스템 운용가용도를 만족할 확률이 희망 신뢰수준 이상 되어야 한다는 것이 초기 CSP 소요를 산정하는 기준이 된다. 이 조건을 만족하는 각 CSP 품목의 소요($S_i(t)$)들로 구성된 집합 $S(t)$ 가 초기 CSP 소요가 된다.

초기 CSP 소요 필수조건 :

$$\ln\left(\sum_{k=0}^{S_i(t)+y(t)q_i} \frac{e^{-\Lambda_i(t)} \Lambda_i(t)^k}{k!}\right) > \ln(\pi)$$

[단계 3] : 탐색과정 및 초기 가능해 선정

초기 CSP 소요를 출발점으로 최소의 구매비용으로 시스템의 목표 운용가용도를 만족할 수 있는 집합 $S(t)$ 를 찾으면 그 집합이 모형의 초기가능해가 된다. 해를 개선하는 탐색과정은 초기 CSP 소요로부터 각 부품들의 상호작용 하에서 전체 시스템 운용가용도에 영향을 주는 정도와 구매단가와와의 절충 분석을 통하여 해를 개선하며, 이 탐색과정을 계속하여 주어진 목표 운용가용도에 도달하는 최초의 집합 $S(t)$ 가 초기 가능해가 된다. 이 탐색방법은 투입된 비용대비 가용도 증가에 대한 기여도가 가장 큰 부품을 하나씩 증가시키는 것으로 간단하고 편리하게 가능해를 찾을 수 있는 방법이다.

탐색조건

$$\max_i \frac{\ln[\Pr(S^i(t), y(t)) / \Pr(S(t), y(t))]}{c_i}$$

여기서 $S^i(t)$

$$= (S(t)_1, S(t)_2, \dots, S(t)_i+1, \dots, S(t)_N)$$

초기가능해 선정조건:

$$\ln(\Pr(S(t), y(t))) = \ln\left(\prod_{i=1}^N \sum_{k=0}^{S_i(t)+y(t)q_i} \frac{e^{-\Lambda_i(t)} \Lambda_i(t)^k}{k!}\right) > \ln(\pi)$$

[단계 4] : 해 개선

단계 3에서 구한 각 부품의 초기 가능해를 이용하여 각 $S_i(t)$ 에 대해 재고수준을 1개씩 줄여가면서 가능해 조건을 만족하는가를 탐색한다. 각 부품에 대해 가능해 조건을 만족하는 최소 재고수준을 최종 근사해 후보로 설정하며 그때의 총비용 Z_0 를 상한값으로 하고, 단계 5로 간다.

[단계 5] : 최종 근사해 결정

단계 4에서 구한 개선된 해를 기준으로 최소 c_i 인 부품 i 를 선정하여 수준 1을 증가시키고, 부품 i 보다 단가가 큰 부품들을 1개씩 감소시킨다. 이때 가능해 조건을 만족하면 그때의 수준을 최종 근사해 후보로 하고 모든 부품에 대해 반복한다. 더 이상 해가 개선되지 않으면 끝내고, 이때의 Z_0 를 최종 해로 한다.

4. 예제

본 예제는 항공기를 예로 들어 동적 상황을 가정한 임의의 시점에 대해 부재고 확률분포와 수리대기 소요 계산 방법 및 적정 부품수 산정 방법을 설명한다.

제보급 시간과 비행시간당 고장률은 상수로 가정하고, 수리시간은 지수분포를 따른다고 할 때 부재고 확률분포와 수리대기 소요 계산 방법을 설명한다. 모든 계산은 각 일자별 끝시점의 비행 활동으로 정의된다. CSP 운용기간 동안에 40대의 항공기가

배치된다고 가정한다. 평상시는 25대로 평균 일간 2회의 비행임무를 수행하고, 1회 비행에 2시간이 소요된다. 또한 우발시에는 40대의 항공기로 평균 일간 5회, 1회 비행에 3시간 소요된다. 일간 비행시간은 <표 1>과 같이 5일 동안의 우발 상황을 가정하며, 이때 총 비행시간은 평시의 6배, 6일째는 4배가 된다.

수요는 비정상 포아송과정을 따르며, 하부부품 구조가 없는 임의 부품으로 폐기는 없는 것으로 가정한다. 그 밖의 부품 정보는 <표 2>와 같다.

수리시간이 비정상 지수분포를 할 때 먼저 부품 1에 대한 기지수리 보급선재고를 계산하면 다음과 같다.

$$E[B_1(t)] = \sum_{k=0}^t \lambda_1(k) \left[\prod_{j=k+1}^t K_1(j) \right] I_1(k) a_1(k)$$

다음과 같이 6일째의 수리대기 소요를 구한다.

$$E[B_1(6)] = \sum_{k=0}^6 \lambda_1(k) \left[\prod_{j=k+1}^6 K_1(j) \right] I_1(k) a_1(k)$$

여기서

$$\lambda_1(k) = d_1(k) \times h(k) \times q_1$$

$$K_1(j) = \exp\left[\frac{-1}{R_{1j}(j)}\right] = e^{-1/5},$$

$$I_1(k) = R_{1j}(k)[1 - K_1(k)] = 5(1 - e^{-1/5}).$$

따라서 각 단계(창, 기지, 이동)에서 수리대기 소요는 다음과 같다.

$$E[B_1(6)] = 0.97,$$

$$\text{Var}[B_1(6)] = E[B_1(6)] = 0.97$$

$$E[O_1(6)]$$

$$= \sum_{k=6-3+1}^6 d_1(k) \times h(k) \times (1 - a_1(k) + a_1(k)\beta_1(k))$$

$$= (0.6 \times 0.5) + (0.6 \times 0.5) + (0.4 \times 0.5) = 0.8$$

$$E[D_1(t - Z_{10})]$$

$$= E[D_1(3)]$$

$$= \sum_{k=0}^3 \lambda_1(k) \left[\prod_{j=k+1}^3 e^{-1/10} \right] [10(1 - e^{-1/10})] \times 0.5$$

$$= 0.58$$

창의 재고수준이 0일 때 창 부재고의 평균과 분산은 다음과 같이 구한다.

$$E[V_{10}(t - Z_{10})] = E[V_{10}(3)] = E[D_{10}(3)] = 0.58$$

<표 1> 비행시간 프로그램

일(t)	0	1	2	3	4	5	6
일간 비행시간(h(t))	100	600	600	600	600	600	400

<표 2> 부품 정보

품목 (i)	단가 (c _i)	고장율 (d _i (t))	기지수리 가능비율 (α _i (t))	창수리 비율 (β _i (t))	기지수리 기간 (R _{ij} (t))	창수리 기간 (R _{i0} (t))	이동시간 (Z _i (t))	구성 부품수 (q _i)
1	867	0.00100	0.50	0.00	5	10	3	1
2	355	0.00050	0.17	0.00	10	20	3	1
3	884	0.00014	1.00	0.00	20	30	3	1
4	1789	0.00020	0.70	0.00	30	40	3	1

$$\begin{aligned} \text{Var}[V_{10}(t-Z_{10})] &= \text{Var}[V_{10}(3)] \\ &= E[V_{10}(3)] - E[D_{10}(3)] = 0.58 \end{aligned}$$

그러나 창 의 재고수준이 0이 아니고 임의의 수를 가질 때는 다음과 같은 방법을 이용하여 창 부재고 의 평균과 분산을 구한다.

$$\begin{aligned} E[V_{i0}(s_0+1, t-Z_{i0})] \\ &= E[V_{i0}(s_0, t-Z_{i0})] - [1 - \sum_{k=0}^{s_0} P(k)] \\ E[V_{i0}(s_0+1, t-Z_{i0})^2] \\ &= E[V_{i0}(s_0, t-Z_{i0})^2] - E[V_{i0}(s_0, t-Z_{i0})] \\ &\quad - E[V_{i0}(s_0+1, t-Z_{i0})] \end{aligned}$$

따라서 창 의 재고수준이 1일때 다음과 같이 창 부 재고에 대한 평균과 분산을 구한다.

$$\begin{aligned} E[V_{10}(1,3)] &= E[V_{10}(0,3)] - [1 - P(0)] \\ &= E[D_1(3)] - (1 - e^{-0.58}) = 0.1399 \\ E[V_{10}(0,3)^2] \\ &= \text{Var}[V_{10}(0,3)] + (E[V_{10}(0,3)])^2 \\ &= 0.58 + (0.58)^2 = 0.9164 \\ E[V_{10}(1,3)^2] \\ &= E[V_{10}(0,3)^2] - E[V_{10}(0,3)] - E[V_{10}(1,3)] \\ &= 0.9164 - 0.58 - 0.1399 = 0.1965 \\ \text{Var}[V_{10}(1,3)] \\ &= E[V_{10}(1,3)^2] - (E[V_{10}(1,3)])^2 \\ &= 0.1965 - (0.1399)^2 = 0.1769 \end{aligned}$$

최종적으로 수리대기소요 분포의 평균과 분산은 다음과 같이 3 요소를 합하여 구할 수 있고, 분포를 설정하기 위해 이를 이용하여 VMR을 계산한다.

$$\begin{aligned} E[W_1(6)] \\ &= E[B_1(6)] + E[O_1(6)] + E[V_{10}(1,3)] \\ &= 0.97 + 0.8 + 0.1399 = 1.9099 \\ \text{Var}[W_1(6)] \\ &= \text{Var}[B_1(6)] + \text{Var}[O_1(6)] + \text{Var}[V_{10}(1,3)] \\ &= 0.97 + 0.8 + 0.1769 = 1.9469 \\ \text{VMR}(6) &= \frac{\sigma^2(6)}{\Lambda(6)} = \frac{1.9469}{1.9099} = 1.019 > 1 \end{aligned}$$

평균과 분산을 이용하여 부품 1에 대해 VMR을 구한 결과, 1보다 크므로 기존의 포아송분포 보다는 다음과 같이 Negative Binomial 분포에 근사화한다.

$$\begin{aligned} \text{Pr}(B(6) = k) \\ &= \frac{\Gamma\left[k + \frac{\Lambda(6)}{\text{VMR}(6) - 1}\right]}{k! \Gamma\left[\frac{\Lambda(6)}{\text{VMR}(6) - 1}\right]} \left[\frac{\text{VMR}(6) - 1}{\text{VMR}(6)}\right]^k \\ &\quad \times \text{VMR}(6)^{\frac{-\Lambda(6)}{\text{VMR}(6) - 1}} \end{aligned}$$

위와 같은 방법으로 나머지 부품에 대해서도 수리 대기소요 분포를 구하고 이것을 근사해 산정 알고리즘에 의해 다음과 같이 전개해 나간다. 항공기의 목표 운용가용도를 100%로 유지하기 위한 신뢰수준을 80% 이상 요구한다고 할 때 적정 부품 수를 산정해 보기로 한다. 창에 부품을 각 1개씩 보유하고 있다고 가정할 때 다음과 같이 탐색하여 초기 기본소요를 할당할 수 있다.

```
[부품1]:.sum(0.135606)..sum(0.406547)..sum(0.677218)..sum(0.857484) ==> stock(3)
[부품2]:.sum(0.267135)..sum(0.619754)..sum(0.852482) ==> stock(2)
[부품3]:.sum(0.658362)..sum(0.933558) ==> stock(1)
[부품4]:.sum(0.563268)..sum(0.886584) ==> stock(1)
```

즉, 신뢰수준 0.8을 만족할 때까지 각 부품별로 소
요를 1개씩 증가시켜 최소요구 수준을 정하는 과정
을 보여준다. 부품 1의 경우 최소요구 수준은 3개가
된다는 것을 의미한다.

다음 단계로 탐색에 의한 해를 개선해 가면서 초
기가능해를 산정하는 절차를 <표 3>에 제시한다.
<표 3>에서 *표시는 비용대비 신뢰수준 증가가 가
장 큰 것으로 선택되어 그 부품의 소요를 한 개 증
가시킨다는 의미이다. 즉, 부품 2를 한 개 증가시킨
다. 부품 2를 한 개 증가시켜 계산된 시스템 전체의
신뢰수준은 ③이 된다. 신뢰수준(③)이 0.8이상 될
때까지 반복하면 최종적으로 <표 4>와 같이 각 부

품에 대한 소요를 산정할 수 있다.

①→③→④→⑥은 전체 시스템 신뢰수준의 증가
과정을 보여준다. 이렇게 하여 계산한 총비용은
 $(867 \times 4) + (355 \times 4) + (884 \times 2) + (1789 \times 1) = 8,445$ 가 되
며, 이것이 초기 가능해이다.

앞에서 구한 초기 가능해를 이용하여 단계 4와 5
를 수행한다. 먼저 해 산정절차의 단계 4에서는 더
이상 해가 개선되지 않음을 알 수 있다. 다음으로
단계 5를 최소 단가 부품부터 반복 수행하면 최종적
으로 <표 5>와 같은 결과를 얻는다.

따라서 적정 부품구매 총비용은 8,428로 부품 1,
2, 3, 4를 각각 5, 4, 1, 1개씩 구매한다.

<표 3> 초기 가능해 선정 절차 (1)

품목	기본소요	현 부품 신뢰수준	소요 한 개 증가시			소요	변화된 부품 신뢰수준
			부품신뢰수준	체계신뢰수준②	$\Delta P_i(②/①)/c_i$		
1	3	0.857484	0.947527	0.668556	1.15×10^{-4}	4	0.857484
2	2	0.852482	0.954883	0.677699	$*3.2 \times 10^{-4}$	2	*0.954883
3	1	0.933558	0.991073	0.642299	6.76×10^{-5}	1	0.933558
4	1	0.886584	0.979375	0.668346	5.56×10^{-5}	1	0.886584
체계신뢰수준		①0.605024					③0.677699

<표 4> 초기 가능해 선정 절차 (2)

품목	현소요	현 부품 신뢰수준	소요 1개 증가시			소요	변화된 부품 신뢰수준
			부품신뢰수준	체계신뢰수준⑤	$\Delta P_i(⑤/④)/c_i$		
1	4	0.947527	0.983508	0.804808	4.3×10^{-7}	4	0.947527
2	4	0.988675	0.997596	0.782361	2.53×10^{-5}	4	0.988675
3	1	0.933558	0.991073	0.823184	$*6.76 \times 10^{-5}$	2	0.991073
4	1	0.886584	0.979375	0.856516	5.56×10^{-5}	1	0.886584
체계신뢰수준		④0.775365					⑥0.823184

<표 5> 개선된 최종 해

품목	임시 최적해	현 부품 신뢰수준	최적 소요	조정된 신뢰수준
1	4	0.947527	5	0.983508
2	4	0.988675	4	0.988675
3	2	0.991073	1	0.933558
4	1	0.886584	1	0.886584
		0.823184		0.804809

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 정상상태가 아닌 장비배치 초기의 비정상상태, 즉 동적상태에서의 고장현상과 장비배치 시점의 정비능력을 고려하여 다단계 정비 및 보급체계 형태를 반영한 다단계 재고모형을 수립하였다. 또한 장비의 목표 운용가용도를 충족시킬 수 있는 가용도 중심의 보급개념을 적용하고, 각 품목의 단가와 각 품목이 체계의 운용가용도에 미치는 효과의 질중분석을 통하여 품목들간의 재고수량을 결정하는 효과적인 해법을 제시하였다.

본 연구의 특징은 고장률과 수리율이 시간에 의존적일 때 수리함수를 비정상 지수분포를 가정하여 부품의 수리대기 소요 함수를 유도하였고, 이것으로부터 부재고, 가용도 간의 관계를 규명하고 수식화하였다. 동적 확률모형으로 접근하여 기존의 정상상태 연구들을 일반화하였다. 아울러 최적해에 근접한 해의 도출을 위한 효율적인 해법 개발로 더욱 정확하게 소요를 산정하였다.

본 연구는 항공기, 반도체 장비 등 적정 가용도 유지가 필수적이며, 고장발생시 수리부속 부족으로 인한 치명적인 손실을 가져올 가능성이 있는 고가 장비체계의 초기 배치시에 필요한 수리부속의 효과적인 관리기법으로 유용하게 사용할 수 있다.

추후 연구 과제로는 수리능력 제약하에서의 수리대기 소요분포 유도과 최적의 수리부품 소요산정을 위한 효율적인 알고리즘에 대한 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- [1] 김철환, "CSP 적정소요 산출 방법," 국방대 학원 안보문제연구소, 정책연구보고서 90-2, 1990.
- [2] 박창범, 강성진, "가용도를 고려한 장비의 최적 예비부품수 결정에 관한 연구," 한국군사운영분석학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 83-95, 1990.
- [3] Abboud, N. E., "The Markovian Two - Echelon Repairable Item Provisioning Problem," *J. Opl. Res. Soc.*, Vol. 47, No.2, pp. 284-296, 1996.
- [4] Albright, S. C. and A. Soni, "Markovian Multiechelon Repairable Inventory System," *Naval Research Logistics*, Vol. 35, pp. 49-61, 1988.
- [5] Cohen, M. A., P. R. Kleindorfer, H. L. Lee, and D. F. Pyke, "Multi-Item Service Constrained (s, S) Policies for Spare Parts Logistics Systems," *Naval Research Logistics*, Vol. 39, pp. 561-577, 1992.
- [6] Graves, S. C., "A Multiple-Item Inventory Model with a Job Completion Criterion," *Management Science*, Vol. 28, No. 11, pp. 1334-1337, 1982.
- [7] Hillestad, R. J., "Dyna-METRIC : Dynamic Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control," R-2785-AF, Rand, Santa Monica, CA 90406, 1982.
- [8] Kaplan, A., and D. Orr, "An Optimum Multiechelon Repair Policy and Stockage Model," *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 32, pp. 551-566, 1985.

[1] 김철환, "CSP 적정소요 산출 방법," 국방대

- [9] Muckstadt, J. A., "A Model for Multi-Echelon Multi-Indenture Inventory System," *Management Science*, Vol. 20, No. 4, pp. 472-481, 1973.
- [10] Richards, F. R. and A. W. McMasters, "Wholesale Provisioning Models: Model Development," NPS 55-83-026, Naval Postgraduate School, Sep., 1983.
- [11] Sherbrooke, C. C., "METRIC: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control," *Operations Research*, Vol. 16, pp. 122-141, 1968.
- [12] Sherbrooke, C. C., "VARI-METRIC: Improved Approximations for Multi-Indenture, Multi-Echelon Availability Models," *Operations Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 311-319, 1986.
- [13] Smith, S. A., J. C. Chambers, and E. Shlifer, "Optimal Inventory Based on Job Completion Rate for Repairs Requiring Multiple Items," *Management Science*, Vol. 28, No. 8, pp. 849-852, 1980.