

자금 제약하에서의 동시조달부품의
최적 구매량 결정
- Optimal Provisioning Quantity Determination of
Concurrent Spare Part under the Funds Limitation -

오 근태*
Oh, Geun-Tae

Abstract

In this paper we consider the CSP requirements determination problem of new equipment system. The CSP we deal with in the paper are restricted to the demand-based spare parts. For the newly procured equipment systems, mathematical analyses are made for the system which is constructed with the repairable items to derive the associated CSP requirement determination model in mathematical expression, respectively. Based on these analyses, a mathematical model is derived for making an optimal CSP requirement determination subject to the constraint of satisfying any given funds limitation. We assume that the failure of a part follows a Poisson process. Firstly, the operational availability concept in CSP is defined and the relation between the general system availability and the operational availability is established. Secondly, the problem is formulated as the operational availability maximization problem that should satisfy the funds limitation, and then, using the generalized Lagrange multipliers method, the optimal solution procedure is derived.

1. 개요

동시조달부품(Concurrent Spare Part : CSP)이란 운수업이나 항공기 운항회사와 같은 기업이나 군에서 신규장비체계 배치시 주장비와 함께 보급되는 수리 및 예비부속품으로서 이는 주장비 배치 후 초기 일정기간 동안 재보급 없이 장비체계에 주어진 운영 임무를 수행하기 위하여 사용되는 지원부품이다. CSP 소요산정은 장비자체가 신개발품이어서 일정기간 동안 사용현장에 A/S용 부품을 지원 받기 어렵거나 주장비가 해외에서 들여옴으로 해서 일정기간 부품의 국산화가 어려운 경우에 장비체계의 효과적이고 경제적인 지원을 보장하기 위하여 필요하다. 특히 각군에서는 목표준비태세 보장을 위해서 초도 배치되는 체계/장비에 대해 일정수량의 CSP를 획득하여 주장비 배치와 동시에 보급하도록 규정하고 있다.

그러나, 지금까지 현장에서의 CSP 운용 결과에서 자주 지적된 사항으로는 불필요한 소요를 과다하게 책정하여 운용기간이 끝난 후에도 상당히 많은 수량의 재고가 사용되지 않고 남게

* 수원대학교 산업공학과

되어 경제적인 손실을 초래하거나, 반대로 소요부품이 CSP로 책정되지 않았거나 보급량이 부족하여 신규장비의 운용에 지장을 초래하는 경우가 빈번하게 발생하였다. 특히, 운용기간이 끝난 후에도 과다한 수량이 남아 있게 되는 경우가 많이 발생하여 문제점으로 지적되어 왔는데, 이는 수요가 발생되지 않은 부품이 CSP 대상부품으로 선정되거나, 수요가 발생한 부품인 경우에도 실소요보다 지나치게 보급량을 많이 책정했기 때문이었다. 이런 경우에는 CSP 운용기간이 상당히 경과한 뒤에도 소모되지 않고 계속 재고로 남게 되므로 경제적인 손실외에도 보급관리상에 많은 어려움이 있었던 것이다.

일반적으로 정비를 위해 소요되는 부품의 보급을 합리적이면서 경제적으로 수행하기 위하여 종합적인 재고관리 모델이 필요하다. 이 경우 수요에 따라 주문정책이 결정되며, 수요는 일반적으로 부품의 평균 수명과 소모성 부품인가 아니면 수리가 가능한 부품(수리순환 부품)인가에 의하여 결정된다. 또한 정비계단 및 정비정책에 따라서도 주문정책은 달라질 수 있으며, 이와 같은 모든 점을 고려하여 개발된 정규보급모형이 다계단 다단계(Multi-echelon Multi-indenture) 모델로 그 대표적인 모델이 미군에서 사용하고 있는 SESAME 모델이다. 이러한 모델은 현실을 충분히 감안하여 최적에 가까운 재고수준 및 이를 위한 보급정책을 제공하고 있다. 그러나, 이러한 모델이 갖게 되는 한계는 현실을 비교적 정확하게 반영하는 만큼 입력되는 data도 정밀하고 방대하여 실질적으로 재고관리 지원 분석자료와 정비능력, 정비정책에 관련된 자료가 완벽히 갖춰져 있지 않으면 사용이 어렵다.

실제로 CSP의 소요량은 운용경험이 없는 최신 장비인 경우와 주장비가 과거에 도입되어 운용경험이 있고 라이선스 생산이 되는 경우로 나누어 생각할 수 있다. 두번째 경우는 어느 정도 자료가 축적되어 있어서 소요량 산정이 용이하나, 첫번째 경우는 판매국가 및 공급업체로부터 보안 또는 사업상의 이유로 CSP 소요산출에 필요한 자료(고장률, 단가, 정비개념 등)의 확보가 곤란하여 SESAME와 같은 기존 모델을 적용할 수가 없기 때문에 대부분의 경우 업체에서 제시한 추천목록을 기준으로 예산 범위안에서 조정하여 구매하는 관행을 보이고 있다. 따라서, 각종 문제점이 CSP 기간중에 발생하게 된다.

본 논문에서는 첫번째 경우를 다루며, CSP 소요산출에 필요한 자료(RAM data, 정비개념 등)의 확보가 곤란하지만 공급업체로부터 부품의 신뢰도 자료, 부품의 구분 정도의 기본적인 technical data는 확보할 수 있다고 가정한다.

부족한 자료로부터 정확한 소요산출결과를 기대하는 것은 근본적으로 불가능하지만 본 논문에서는 CSP 규정상 수요부품에 속하는 부품을 대상으로 하고, 확보 가능한 정보가 단가, MTBF, indenture 정도이며, 부품이 고장났을 경우에는 교체만 하고 고장난 부품은 수리하여 재사용할 때, 즉, 부품이 모두 수리가 가능한 품목(repairable item)일 때 제한된 투자자금내에서 최대의 목표운용가용도를 달성할 수 있는 구입량을 결정하는 모델을 제시한다. 여기서 수요부품이라 함은 CSP 운용기간 중 적어도 1회 이상 수요가 발생할 확률이 특정값 P_L 이상일 부품들을 의미하며 이 값은 정책적으로 주어지는 값이다.

이 분야의 연구는 [1], [3]과 [5]를 대표적으로 들 수 있으며, [2]에서는 모든 정보, 예를 들면 echelon, indenture, MTTR, MTBF, 수리능력, 단가, 부품별 중요도 등이 제공되었을 때 사용할 수 있는 모델을 다루었다.

2. 운용가용도(Availability)의 정의

일반적인 운용가용도는 장비가 가동되어야 할 시간에 대한 실제 가동할 수 있는 상태의 시간과의 비율로 표현되며

$$\text{운용가용도} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLDT}$$

이다. 여기서 *MTBF*(Mean Time Between Failure)는 고장간 평균시간, *MTTR*(Mean Time to Repair)은 평균수리시간, *MLDT*(Mean Logistic Delay Time)는 평균보급지연시간을 나타낸다.

목표운용가용도는 주장비의 댓수, 정비 및 보급정책 및 능력 등에 의하여 결정된다. 따라서 목표운용가용도를 확보하기 위한 문제는 주장비의 선정 및 댓수 결정차원의 문제로 확대된다. 예를 들어 1개월에 한번씩 수리 및 정비를 요구하는 장비가 있고 수리 및 정비시간이 1개월 소요된다면 평균보급지연시간이 0이라 하더라도 시스템의 운용가용도는 0.5이고 평상시에 가동되는 장비가 100대가 되려면 200대의 장비를 구매하여야 한다.

그러나, CSP의 운영목적을 고려한다면 CSP의 운용가용도는 일반적으로 정의되는 시스템 운용가용도와 별도로 정의하여야 할 것이다. 왜냐하면, CSP 운용기간 동안은 추가적인 부품의 재보급이 허용되지 못한다. 따라서, 어떤 부품이든지 사용가능한 상태의 예비 부품이 없을 때에는 주장비는 가동이 중지된다. 일단 재고결손이 발생하면 사용가능한 상태의 예비 부품의 보급이 시작될 때까지 주장비의 가동이 중지되며 시간이 흐를수록 정상가동 상태에 있는 주장비의 수는 감소한다. 더우기 장비의 가동률은 "어느 순간에 정상상태에 있는 장비의 수/정상상태에 있어야 하는 장비의 수"로 표시되는 것이 일반적이다.

그러므로 본 연구에서는 임의 시점에서의 CSP 운용가용도를

$$\frac{E[\text{정상가동 상태에 있는 장비의 수}]}{\text{장비의 총 댓수}}$$

와 같은 "평균가동률"로 정의한다.

3. 모델의 정형화

3.1. 수식 기호

본 논문에서는 CSP 기간중 고갈된 부품은 CSP 기간이 종료되는 시점에서 모두 보충된다고 가정하며, 모델의 정의 및 CSP 소요량 산출을 위한 해법절차를 개발함에 있어서 필요한 기호들을 다음과 같이 정의하였다.

- K : 수리순환 부품의 총 수
- d_j : 수리순환 부품 j 의 단가
- T : CSP 운용기간(년)
- λ_i : field failure rate, 현장의 상황을 고려한 부품 i 의 연간 고장률
- N : CSP 운용기간말까지 배치되는 장비의 총 댓수
- B : 투자 자금 ($B \geq \min \{d_j\}$)

3.2. 기본가정

모델을 개발하기 위해 기본적으로 전제하고 있는 가정은 다음과 같다.

- 고장의 발생은 Poisson process를 따른다고 가정한다. 단, 고장이 발생하는 모집단의 수 (주장비의 수)가 한정되어 있지만 계산상 편의를 위해 무한(infinite)하다고 가정한다.
- 고장의 발생은 부품 상호간에 독립적으로 발생하며, 시스템(장비)을 수리하는 동안에는

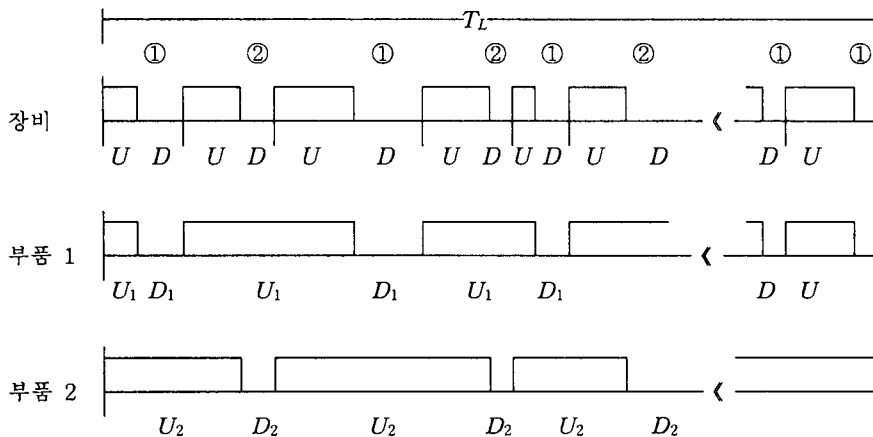
고장이 발생하지 않는다.

- CSP 운용기간 동안은 부품을 재보급하지 못한다. 따라서, 고장난 부품의 교체용 재고가 결손되면 주장비는 가동이 중지된다.
- 장비의 배치 스케줄(CSP 기간 동안의 시기별 배치갯수)은 알려져 있으며, 특별한 언급이 없는 한 동시에 전체 장비가 배치된다.
- 여러 종류의 부품이 결손되어 주장비가 가동중지 상태로 될 때 하나의 장비에 둘 이상의 결손 부품은 발생하지 않는다.
- CSP 완료시점에 수리중인 장비는 가동할 수 있는 장비로 간주한다.

4. 실질고장률(Effective Failure Rate) : λ_i^{eff}

일반적으로 장비 제공업체가 제공하는 고장률은 실험실에서 측정된 개별 부품의 고장률이거나 고장률 보정계수를 고려한 개별 부품의 고장률이다. 부품이 단독으로 사용될 경우에는 이러한 고장률에 의하여 고장이 발생하지만, 이 부품이 다른 부품과 함께 한 장비에 부착되었을 경우에는 어느 부품이 고장나서 장비가 수리중이면 다른 부품도 가동이 정지되어 일정시간 동안은 고장이 발생하지 않는다. 이러한 지연효과를 고려한 개별 부품의 고장률이 실질고장률이다. 하나의 장비가 두종류의 부품 1개씩으로 구성되어 있을 때 장비의 고장과 부품과의 관계가 [그림 1]에 주어져 있다. T_L 은 임의 사용 기간이고, 처음 그림은 장비의 고장을 설명하며, 아래 두 그림은 두 개부품의 고장을 설명하는 그림이다. U 와 D 는 각각 장비와 부품이 정상상태와 고장상태에 있음을 의미하고, 첫 번째 그림 위에 ①은 첫 번째 부품으로 인한 장비의 고장이며, ②는 두 번째 부품에 의한 장비의 고장을 의미한다.

여러 개의 부품으로 구성된 장비의 개별 부품의 실질고장률은 간단한 형태를 갖고 있다. D_i 를 부품 i 의 고장에 의하여 장비가 정지되어 있는 시간, 즉 부품 i 를 교체하는데 걸리는 시간이라고 하고, 그 장비가 총 M 개의 부품으로 구성되었다고 하면, 그 장비에서의 부품 i 의



[그림 1] 부품의 수가 2일 때 장비의 고장과 부품과의 관계

실질고장률은

$$\lambda_i^{eff} = \frac{\lambda_i^f}{1 + \sum_{j=1}^M \lambda_j^f D_j}$$

이다. 이 식은 다음과 같이 간단히 증명된다.

$N(T_L)$ 을 아주 긴 기간 T_L 동안에 발생한 장비의 고장횟수라 하고, $N_i(T_L)$ 을 T_L 동안에 부품 i 로 인하여 발생한 장비의 고장횟수라 하면

$$N(T_L) = \sum N_i(T_L),$$

$$\lim_{T_L \rightarrow \infty} \frac{N_i(T_L)}{N(T_L)} = \frac{\lambda'_i}{\sum \lambda'_j}.$$

장비의 고장간격 $U+D$ 의 평균은 다음과 같다.

$$E[U+D] = \sum \frac{\lambda'_k}{\sum \lambda'_j} \left(\frac{1}{\sum \lambda'_j} + D_k \right) = \frac{1 + \sum \lambda'_k D_k}{\sum \lambda'_j}$$

부품 i 의 고장횟수와 평균 고장간격의 곱은 장비의 고장횟수와 장비의 평균고장간격의 곱과 같다는 관계로부터 실질 고장률을 계산할 수 있다.

$$N_i(U_i + D_i) = NE[U+D]$$

$$U_i + D_i = \frac{N}{N_i} E[U+D] = \frac{\sum \lambda'_j}{\lambda'_i} \left(\frac{1}{\sum \lambda'_j} + \frac{\sum \lambda'_k D_k}{\sum \lambda'_j} \right) = \frac{1}{\lambda'_i} + \frac{\sum \lambda'_k D_k}{\lambda'_i}$$

$$\lambda_i^{eff} = \frac{\lambda'_i}{1 + \sum \lambda'_k D_k}$$

만일 $D_i = 0$ 이면 $\lambda_i^{eff} = \lambda'_i$ 와 같다.

부품교체시간은 장비고장시 마다 항상 불가피하게 발생하며, 그 기간동안 다른 고장은 발생하지 않는다. 그러므로 λ_i^{eff} 는 이러한 부품교체시간을 감안한 장비 전체의 입장에서 본 실질고장률이기 때문에 이를 평균고장발생빈도로 이용할 때는 부품교체시간을 고려하지 않아도 된다.

5. 모형의 정식화

일반적으로 신규 구입된 장비에 소요되는 수리순환 부품을 수리할 수 있는 능력의 확보가 거의 어렵다. 하지만 수리능력이 없다고 하더라도 공급업체에서 파견한 기술진에 의한 수리 또는 공급업체로 공수하여 이루어지는 수리 등을 고려한다면 수리순환 부품의 수리소요에 의한 시간이 장기간 소요될 수 있다는 점을 제외하고는 실제로 수리능력이 있어서 수리순환된다고 가정할 수 있다.

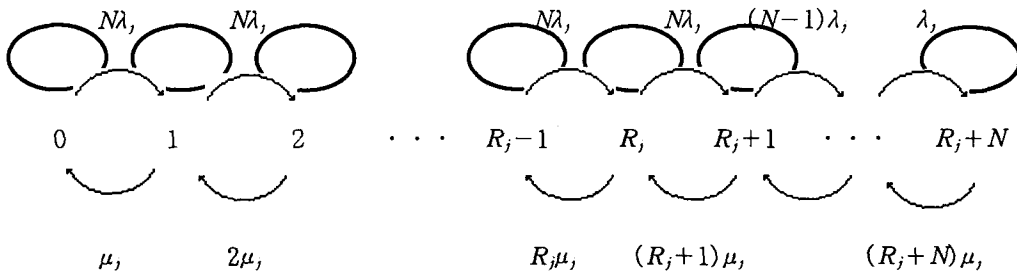
수리순환 부품 모델을 정의하고 이의 해법절차를 개발하는데 있어서 추가적으로 다음과 같은 사항들을 가정한다.

- 수리순환 부품의 수리시간은 평균 $1/\mu_j$, ($j = 1, 2, \dots, K$)인 지수분포를 따른다.
- 수리순환 부품의 교체시간은 λ_i^{eff} 에 포함되어 있으므로 분석대상에 포함되지 않는다.
- 수리순환 부품을 수리하기 위하여 필요한 장비/부품들은 충분히 준비되어 있다.
- 장비의 가동 정지는 한 종류 하나의 부품의 고장에 의하여 발생한다. 즉, 동시에 동종의

두개 이상의 부품, 또는 두 종류 이상의 부품이 고장나서 장비를 가동 정지 상태로 만들지는 않는다.

- 수리순환 부품을 수리하는 수리인력은 무한히 존재한다.
- 하나의 부품은 한 장비에 한개씩만 부착되어 있다고 가정한다.

위와 같은 전제하에서 수리순환 부품의 고장이 발생하고 이를 교체한 후 수리를 통하여 순환시키는 과정은 일종의 대기행렬 모형으로 이해할 수 있다. 임의의 부품 j 의 고장, 교체, 수리 과정은 R_j 개 예비부품과 N 대의 장비에 부착되어 가동 중인 N 개의 수리순환품 중 R_j 개 이상이 수리중이면 (수리중인 부품 - R_j) 만큼의 장비가 가동을 정지하는 일종의 Machine Repair Type의 대기행렬 모형이 된다. 이 모형을 Kendall의 표기법으로 표시하면 $(M/M/N+R_j):(GD/R_j/N+R_j)$ 로 표시되며, 전이율다이아그램(rate-flow diagram)으로 표현하면 다음 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 수리순환 부품에 대한 전이율다이아그램

따라서 이 모델에 있어서 평균가동률은 다음과 같다.

$$\text{평균가동률} = \frac{N - \text{평균적으로 정지상태에 있는 장비의 수}}{N}$$

$q_n(R_j)$ 를 수리순환 부품 j 가 총 R_j 개의 예비품을 갖고 있을 때 수리상태에 있는 부품 j 의 수가 n 일 확률이라고 정의하면

$$q_n(R_j) = \begin{cases} \frac{N^n}{n!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j} \right)^n q_0(R_j), & n=1, \dots, R_j, \\ \frac{N! N^{R_j}}{(R_j+N-n)! n!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j} \right)^n q_0(R_j), & n=R_j+1, \dots, R_j+N, \end{cases}$$

$$q_0(R_j) = \frac{1}{\sum_{m=0}^{R_j} \frac{N^m}{m!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j} \right)^m + \sum_{m=R_j+1}^{R_j+N} \frac{N! N^{R_j}}{(R_j+N-m)! m!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j} \right)^m}$$

이 되고, 부품 j 에 의하여 평균적으로 가동정지된 장비의 수는

$$\sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j)$$

가 되어 평균가동률은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{N - \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j)}{N}$$

이상의 결과를 이용하여 수리순환 부품 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{maximize } \frac{N - \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j)}{N}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^K d_j R_j \leq B$$

단, R_j 는 자연수.

이는 다시

$$\text{minimize } \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^K d_j R_j \leq B$$

단, R_j 는 자연수,

(1)

로 변형시킬 수 있다.

(1)을 라그랑즈 승수기법(Lagrange multipliers method)으로 표현하면

$$\begin{aligned} \text{minimize } D(R; \theta) &= \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) - \theta \left[B - \sum_{j=1}^K d_j R_j \right] \\ &= \sum_{j=1}^K \left[\sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) + d_j R_j \right] - \theta B \end{aligned}$$

가 된다. 여기서 R 은 (R_1, R_2, \dots, R_N) 을 의미한다.

윗식은

$$D_j(R_j; \theta) = \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) + \theta d_j R_j$$

라 하면

$$\text{minimise } D(R; \theta) = \sum_{j=1}^K D_j(R_j; \theta) - \theta B$$

로 다시 표현할 수 있다. 그러므로, $D(R; \theta)$ 의 최적 R 은 각 $D_j(R_j; \theta)$ 를 최소화시키는 R_j 의 집

합으로 이루어진다.

$\Delta D_j(R_j; \theta)$ 를 $D_j(R_j+1; \theta) - D_j(R_j; \theta)$ 라고 하면

$$\Delta D_j(R_j; \theta) = \left\{ \sum_{n=R_j+2}^{R_j+1+N} (n-R_j-1) q_n(R_j+1) - \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n-R_j) q_n(R_j) \right\} + \theta d_j \quad (2)$$

이므로

$$\begin{aligned} \Delta D_j(R_j+1; \theta) - \Delta D_j(R_j; \theta) &= \sum_{n=R_j+3}^{R_j+2+N} (n-R_j-2) q_n(R_j+2) - \sum_{n=R_j+2}^{R_j+1+N} (n-R_j-1) q_n(R_j+1) \\ &\quad - \left\{ \sum_{n=R_j+2}^{R_j+1+N} (n-R_j-1) q_n(R_j+1) - \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n-R_j) q_n(R_j) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다. 식 (2)의 오른쪽 항의 { } 부분은 예비용 j 부품을 R_j+1 개 확보했을 경우에 예상되는 가동정지된 장비 수의 기대치와 R_j 개 확보했을 경우에 예상되는 가동정지된 장비 수의 기대치와의 차이로 그 값은 당연히 0보다 작으며, R_j 값이 커질수록 그 차이는 작아지기 때문에 식 (3)의 값은 0보다 크다. 따라서, 임의 θ 가 주어졌을 때 $D_j(R_j; \theta)$ 는 R_j 에 대해 볼록(convex)이며, 최적 R_j 는 다음 두개의 식을 동시에 만족하는 최소의 R_j 값이다.

$$\begin{cases} \Delta D_j(R_j-1; \theta) \leq 0, \\ \Delta D_j(R_j; \theta) \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^K d_j R_j \leq B \quad (5)$$

$\Delta D_j(R_j; \theta)$ 는 다시 $\sum_{n=1}^N n \{ q_{R_j+n+1}(R_j+1) - q_{R_j+n}(R_j) \} + \theta d_j$ 로 표현할 수 있으며, 여기서

$Q_j(R_j)$ 를 $\sum_{n=1}^N n \{ q_{R_j+n}(R_j) - q_{R_j+n+1}(R_j+1) \}$ 라고 하면

$$Q_j(R_j) = -\Delta D_j(R_j; \theta) + \theta d_j$$

이고,

$$Q_j(R_j+1) - Q_j(R_j) = -\{ \Delta D_j(R_j+1; \theta) - \Delta D_j(R_j; \theta) \} \leq 0$$

가 되어 $Q_j(R_j)$ 는 R_j 에 대해 단조감소함수가 되며, 최대값으로

$$\begin{aligned}
 Q_j(0) &= -\Delta D_j(0; \theta) + \theta d_j \\
 &= \sum_{n=1}^N n \{a_n(0) - a_{n+1}(1)\} \\
 &= \sum_{n=1}^N \frac{N!}{(N-n)!(n-1)!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j}\right)^n \times \left[\frac{1}{\sum_{m=0}^N \frac{N!}{(N-m)! m!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j}\right)^m} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j}\right)}{(n+1) \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{N+1} \frac{N! N}{(N+1-m)! m!} \left(\frac{\lambda_j^{eff}}{\mu_j}\right)^m \right\}} \right]
 \end{aligned}$$

를 갖는다.

$Q_j(R_j)$ 를 이용하여 (4)를 다시 표현하면

$$\begin{cases} Q_j(R_j - 1) \geq \theta, \\ Q_j(R_j) \leq \theta. \end{cases} \tag{6}$$

식 (6)의 조건을 만족하는 최적 R_j 를 R_j^* 라 할 때, R_j^* 와 θ 와의 관계를 표현하면

$$Q_j(R_j^*) \leq \theta \leq Q_j(R_j^* - 1)$$

이 되므로, 식 (5)에 주어진 가용도 조건을 무시하면 부품 j 에 대해

$$\begin{cases} \text{i) } \max \{Q_j(0)\} \leq \theta \text{ 일 때} \\ \quad R_j^* = 0, \\ \text{ii) } 0 \leq \theta < \max \{Q_j(0)\} \text{ 일 때} \\ \quad R_j^* \geq 0. \end{cases} \tag{7}$$

그러나, (7)의 i)은 $B \geq \min \{d_j\}$ 이기 때문에 무시될 수 있다.

$V(R)$ 와 $V_j(R_j)$ 를 각각 $\sum_{j=1}^K d_j R_j$ 와 $d_j R_j$ 라고 하면

$$V(R) = \sum_{j=1}^K V_j(R_j)$$

가 된다. 따라서, $V_j(R_j)$ 의 특성과 식 (6)으로부터 임의 θ 에 대한 최적 R_j 를 R_j^* 라 할 때 $V(R)$ 을 크게 하기 위해서는 각 R_j^* 를 크게 하고, 각 R_j^* 를 크게 하기 위해서는 θ 를 작게 하여야 함을 알 수 있다.

이상의 여러 특성들로부터 최적 R_j 를 다음과 같은 방법을 이용하여 구할 수 있다.

Step 1 : $\theta_M = \min\{Q_i(0)\}$ 로 둔다.

Step 2 : $\theta = \theta_M$ 으로 하여 식 (6)을 만족하는 최소의 $R_j(j = 1, 2, \dots, K)$ 를 구한다.

Step 3 : $\sum_{j=1}^K V_j(R_j) \leq B$ 이면 Step 4로 가고, 그렇지 않으면 Step 10으로 간다.

Step 4 : θ 의 초기 하한(θ_L)과 상한(θ_U)을 다음과 같이 적용한다.

$$\theta_L = 0, \quad \theta_U = \min\{Q_i(0)\}.$$

Step 5 : $k = 1$ 로 둔다.

Step 6 : $\theta_k = \frac{\theta_L + \theta_U}{2}$ 로 하여 식 (6)을 만족하는 최소의 $R_j(j = 1, 2, \dots, K)$ 를 구한다.

Step 7 : 현재의 θ_k 에 대한 $V(R)$ 를 $\hat{V}(\theta_k)$ 라 할 때, $|\hat{V}(\theta_k) - B|$ 가 주어진 허용범위보다 작으면 반복계산을 중지하고 이때의 R_j 가 최적 R_j 가 된다. 그렇지 않으면 Step 8을 수행한다.

Step 8 : $\hat{V}(\theta_k) < B$ 이면 $\theta_U = \theta_k$ 로 놓고, $\hat{V}(\theta_k) > B$ 이면 $\theta_L = \theta_k$ 로 놓는다.

Step 9 : $k = k + 1$ 로 하고 Step 6을 수행한다.

Step 10 : θ 의 초기 하한(θ_L)과 상한(θ_U)을 다음과 같이 적용하고 Step 5로 간다.

$$\theta_L = \min\{Q_i(0)\}, \quad \theta_U = \max\{Q_i(0)\}.$$

6. 수치예

구성 부품의 수가 10인 장비를 8대 도입하는 경우 고장률, 수리율 및 단가의 자료가 다음 <표 1>과 같이 주어졌을 때 투자한도의 변화에 따른 CSP 구입량을 위의 알고리즘을 적용하여 계산해 본 결과가 <표 2>에 요약되어 있다. 계산의 편의를 위해 λ_i^{eff} 는 주어졌다고 가정한다.

계산 결과 예상대로 “고장률/수리율”, 즉 $\lambda_j^{eff} / \mu_j (= \rho_j)$ 의 값이 크고 단가가 작은 부품일수록 구입량이 많고, 같은 부품이라도 예산액이 커짐에 따라 구입량이 많아짐을 알 수 있다. 예를 들면 단가가 15인 3, 6, 8번 부품을 보면 ρ_j 의 크기에 따라 6, 3, 8 부품 순으로 구입량이 많게 나타났다. 또, 예산과 총투자금액이 클수록 평균가동률이 커짐을 알 수 있으며, 1과 6번 부품의 경우와 2와 5번 부품을 경우를 각각 비교하면 두 경우 모두 ρ_j 값과 단가가 앞의 것이 작은 경우인데 부품 구입량은 후자가 많은 것으로 미루어 보아 ρ_j 의 변화가 단가의 변화보다 부품 구입량에 더 영향을 미치는 것으로 보인다.

7. 결론

CSP에 관련된 문제는 크게 대상부품을 선정하는 문제와 소요량을 산정하는 문제로 나뉘어진다. 본 논문은 대상부품이 선정되었다는 가정 하에 소요량을 산정하는 문제를 다루었으며, 제한된 투자 금액 내에서 평균가동률을 최대로 하는 각 부품별 최적 소요량을 구할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

만일 운용가용도의 정의가 다를 경우, 예를 들면 무기체계를 구성하는 모든 부품은 신뢰도 측면에서 직렬구조를 취한다는 가정을 하여 운용가용도를 부품 하나의 가용도의 곱으로 표현한다면 지금까지 개발한 방법과는 다른 방법으로 알고리즘을 구해야 할 것이다.

<표 1> 부품별 고장률, 수리율, 단가

부품번호 자료	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
고장률 λ_j^{eff}	2.0	2.2	1.8	3.1	2.5	1.9	3.8	2.3	1.6	2.7
수리율 μ_j	3.0	2.7	3.1	3.3	2.9	2.8	1.9	4.3	3.9	3.5
$\rho_j = \lambda_j^{eff} / \mu_j$	0.667	0.815	0.581	0.939	0.862	0.679	2.000	0.535	0.410	0.771
단가 d_j	10	20	15	25	30	15	20	15	10	30

<표 2> 예산제한에 따른 부품구입량 변화

부품 예산	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	총투자 비용	평균 가동률
1,000	5	6	4	6	6	5	6	4	3	5	995	0.99648
1,100	5	6	4	7	6	5	8	4	4	6	1,100	0.99842
1,200	5	6	5	7	7	6	10	4	4	6	1,200	0.99929
1,300	6	7	6	7	7	6	12	5	4	6	1,300	0.99968
1,400	6	7	6	8	7	6	14	5	4	7	1,395	0.99986
1,500	6	8	6	9	8	6	15	5	5	7	1,500	0.99991

본 논문에서 개발한 최적 구입량은 실제 상황에서는 완벽하게 각 부품별 최적 소요량이 되지는 못한다. 왜냐하면 본 논문에서는 각 부품별 고장발생률이 시간에 관계없이 일정하다고 가정했지만 실제로는 시간이 흐를수록 재고가 바닥난 부품수가 증가하면서 가동불능상태의 주장비가 증가하여 운용가능한 장비의 수가 줄어들게 되어 각 부품별 고장발생률은 감소하기 때문이다. 그러므로, 이점을 고려해 볼 때 실제소요량보다 약간 더 책정될 수 있다. 그러나, 과거의 CSP 운용 결과에서 자주 지적된 사항으로 불필요하게 소요를 과다 책정함으로써 많은 부품이 미사용되어 경제적인 손실을 초래한 점과 그 반대로 보급량이 부족하여 신규장비의 운용에 지장을 초래한 점을 들 수 있는데, 실제로 후자가 더 문제가 되며, 위 알고리즘으로부터 계산된 소요량은 안전재고를 포함한 소요량으로 볼 수 있다.

세 가지 모델에서 최적 구입량을 구하는데는 Everett[4]의 방법을 이용하여 구할 수도 있지만 이 경우에는 θ 의 초기치를 임의로 정해야 하기 때문에 반복계산을 불필요하게 여러 번 수행해야 할 가능성이 높다. 또한 매 반복시 마다 새로운 θ 를 정해 주는 확실한 방법이 없으므로 매번 임의로 θ 를 정해 주어야 하는 불편함이 있다.

반면에 우리의 알고리즘을 이용하면 위와 같은 문제가 해결되어 쉽게 최적해를 구할 수 있다. 한가지 유의할 점은 최적해에 대한 총 사용가능한 예산액이 주어진 예산한도액을 넘을 수는 있으나, 초과액수는 예산 범위에 비해 충분히 작은 값이므로 큰 문제가 되지 않는다.

이제까지 살펴본 모델에서는 장비가 동시에 배치된 경우를 가정하고 있다. 하지만 실제적으로는 장비의 배치시점이 서로 다를 수 있다. 이러한 경우에 고장률을 정의하기 위하여

TWAMP(Time Weighted Average Month's Program)에 의하여 고장률을 계산하며 자세한 내용은 [1]에 정리되어 있다.

참 고 문 헌

1. 김 재원, "SYMD-515-87228," 국방과학연구소, 1987.11.
2. 박 삼준, "동시조달수리부속(CSP)소요산출 모델연구," 국방과학연구소, 1994.3.
3. Daeschner, William E. Jr., "Models for Multi-item Inventory Systems with Constraints," Doctoral Dissertation, *Naval Postgraduate School*, 1975. 6.
4. Everett Hugh, "Generalized Lagrange Multiplier for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources," *Operations Research*, Vol. 11, pp. 399-417, 1963.
5. Richards, F. Russell, and McMasters, Alan W., "Wholesale Provisioning Models : Model Development," *Naval Postgraduate School*, 1983. 9.