

信賴性應用研究

제2권, 제2호, pp. 85-98, 2002

운용가용도제약하에서 일정 비율 수리가능한 동시조달부품의
구매량 결정

오근태, 김명수

수원대학교 산업정보공학과

*Provisioning Quantity Determination of Partially Repairable Concurrent
Spare Parts under the Availability Limitation*

Geuntae Oh, Myungsoo Kim

Department of Industrial Information Engineering, University of Suwon

Abstract

In this paper, partially repairable concurrent spare parts requirement determination problem of newly procured equipment systems is considered. "partially repairable" means that a portion of damaged parts can be recover their function and reused after repairs. A mathematical model is derived for making an CSP requirement determination subject to the constraint of satisfying any given operational availability limitation. We assume that the failure of a part follows a Poisson process and the repair time has an exponential

distribution. Using the generalized Lagrange multipliers method, the solution procedure is derived.

1. 개요

일반적으로 해외 고가 장비를 도입할 경우에는 처음 몇 년 동안은 부품을 국내 생산할 수 없거나 수리가 불가능한 경우가 많기 때문에 부품의 국내 생산이 가능하거나 수리 능력을 확보할 때까지의 일정 기간 동안 부품의 재보급 없이 장비를 정상적으로 운용하기 위하여 신규 장비를 도입할 때 장비와 함께 수리 및 예비부속품을 구입하게 된다. 이를 동시조달부품(Concurrent Spare Part : CSP)이라 한다.

CSP문제는 CSP대상부품을 선정하는 문제와 선정된 부품의 소요량을 산정하는 문제로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 소요량을 산정하는 문제를 다룬다. 소요량 산정 문제는 운용경험이 있는 장비를 대상으로 하는 경우와 운용경험이 없는 최신장비를 대상으로 하는 경우로 구분할 수 있다. 전자는 어느 정도 자료가 축적되어 있어서 소요량 산정이 용이하나, 두 번째 경우는 공급자로부터 보안 또는 사업상의 이유로 CSP 소요산출에 필요한 자료(고장률, 단가, 정비개념 등)의 확보가 곤란하기 때문에 대부분의 경우 공급자 측에서 제시한 추천목록을 기준으로 예산 범위 안에서 조정하여 구매하는 경우가 일반적이다. 이런 경우에 업체이익이 반영된 자료가 주어지므로 과소 또는 과다구입 문제가 발생하게 된다.

구입 부품의 종류는 일반적으로 소모성부품(consumable item)과 수리순환부품(repairable item)으로 구분된다. 전자는 고장이 나면 교체(replacement)를 하여야 하는 부품이고, 후자는 수리(repair)하여 재사용하는 부품이다. 수리순환부품은 우선 정상가동되는 부품으로 교체하고 탈거한 고장부품은 수리할 수 있으면 수리하여 재사용한다. 수리순환부품도 수리기간이 필요하고 100% 수리가능한 것이 아니기 때문에 적절한 예비물량을 확보해야만 고장난 부품수리중에 장비를 지속적으로 가동시킬 수 있다.

본 논문에서는 운용경험이 없는 최신장비이지만 유사한 장비를 운용해 본 경험이 있어서 고장난 부품을 수리해서 재활용할 수 있는 능력을 갖고 있을 경우를 대상으로 비록 CSP 소요산출에 필요한 자료(RAM data, 정비개념 등)의 확보가 곤란하더라도 공급업체로부터 부품의 단가, MTBF, 부품의 구분 정도의 기본적인 기술자료(technical data)는 확보할 수 있다는 가정 하에서 경제적인 측면과 장비체계의 운용성 측면을 동시에 고려하여 수리순환부품의 합리적 CSP소요량을 산출할 수 있는 모델을 제시하고자 한다.

이 분야의 연구 중 김재원(1987), 오근태(1997), Daeschner(1975), Everett Hugh(1963)는 모두 비용상한이 주어져 있을 때 가용도를 최대로 하는 모델을 다루었으며, 특히 오근태(1997)는 부품을 수리하여 재사용하는 경우를 분석하였다. 이와는 달리 박삼준(1994)은 모든 정보, 예를 들면 echelon, indenture, MTTR, MTBF, 수리능력, 단가, 부품별 중요도 등이 제공되었을 때 사용할 수 있는 모델을 다루었다. 운용가용도에 제약이 주어져 있는 경우에 대해서 오근태(1996)는 수리순환부품의 CSP 물량을 구하는 문제를 분석하였고, 오근태와 김명수(1998)는 소모성부품의 CSP 물량을 구하는 문제를 다루었으며, 오근태와 김명수(2000)

는 소모성부품과 수리순환부품을 모두 구매하는 경우의 CSP 물량을 구하는 절차를 개발하였다.

2. 운용가용도의 정의

일반적으로 장비의 운용가용도는

$$\frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLDT}$$

로 정의된다. 여기서 $MTTR$ (Mean Time to Repair)은 평균수리시간, $MLDT$ (Mean Logistic Delay Time)는 평균보급지연시간을 나타낸다.

그러나, 위의 운용가용도는 하나의 장비에 대해서만 성립하는 것이며 다수의 같은 장비들로 구성된 체계의 운용가용도를 표현하기에는 적절하지 않다. 더욱이 CSP 운용기간 동안은 재고가 고갈된 부품의 재보급이 허용되어 있지 않기 때문에 해당 부품의 재고가 없으면 그 장비는 CSP 운용기간 종료시까지 가동이 중지되며, 시간이 흐를수록 정상가동 상태에 있는 장비의 수는 감소하기 때문이다. 또한 일반적인 운용가용도는 기본적으로 long run을 가정하는데 반해 CSP 기간은 일정기간으로 한정되어 있으므로 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 장비 운용가용도 대신 “CSP 기간동안 단위시간당 전체 장비에 대한 정상가동중인 장비의 평균비율”, 즉

$$\frac{E[\text{CSP 기간동안 단위시간당 정상가동중인 장비수}]}{\text{전체 장비수}}$$

를 운용가용도로 정의한다.

3. 기본 가정 및 기호의 정의

본 논문에서 기본적으로 전제하고 있는 가정은 다음과 같다.

- 본 논문에서 언급하는 “부품”은 “수리순환부품”을 의미한다.
- 부품 고장의 발생은 Poisson process를 따른다고 가정한다.
- 고장의 발생은 부품 상호간에 독립적으로 발생하며, 부품을 교체하거나 수리하는 동안에는 고장이 발생하지 않는다.
- 부품별로 하나의 전문수리부서가 한번에 하나의 부품을 수리한다.
- 부품의 수리시간은 평균 $1/\mu_j$, ($j = 1, 2, \dots, K$)인 지수분포를 따른다.

- 고장난 부품의 재사용 여부는 일단 수리한 후 부품이 정상기능을 회복할 경우에 한하며, p_j ($j = 1, 2, \dots, K$)의 비율로 폐기되고, $1 - p_j$ 만 재활용된다.
- 하나의 부품은 한 장비에 한 개씩만 부착되어 있다고 가정한다.
- CSP 운용기간 동안은 부품을 재보급 받지 못한다. 따라서, 고장난 부품의 교체용 재고가 결손되면 해당 장비는 가동이 중지된다. CSP 기간중 고갈된 부품은 CSP 기간이 종료되는 시점에서 모두 보충된다.
- 장비는 CSP 기간 초에 동시에 전체가 도입배치된다.
- 장비가 가동중지 상태로 될 때 하나의 장비에 둘 이상의 결손 부품은 발생하지 않는다. 즉, 장비의 가동중지는 단 하나의 부품결손으로 발생한다.
- CSP 완료시점에 수리중인 장비는 가동할 수 있는 장비로 간주한다.

이후 본 논문에서 사용될 기호는 다음과 같다.

N : 장비의 총 수.

K : 부품 종류의 총 수.

R_j : 부품 j 에 할당된 CSP 물량, 결정해야 할 값.

R : (R_1, R_2, \dots, R_K) 를 의미.

c_j : 부품 j 의 단가.

T : CSP 기간.

λ_j : 부품 j 의 단위시간당 고장률.

R_j^{\max} : 부품 j 의 최대구입량(구매예산이나 공급업체에 의해 제한된 양).

4. 실질고장률(Effective Failure Rate)

장비 제공업체로부터 제공해주는 부품별 고장률은 일반적으로 부품이 단독으로 계속 사용될 경우에 적용될 수 있는 고장률이다. 그러나 장비가 사용되는 현장에서는 이 부품이 다른 부품과 함께 장비에 부착되었기 때문에 어느 부품이 고장나서 부품을 교체중이면 다른 부품들도 가동이 정지되어 일정시간 동안은 고장이 발생하지 않는다. 이러한 지연효과를 고려한 개별 부품의 고장률이 실질고장률이다.

K 개의 수리순환부품으로 구성된 장비의 개별 부품의 실질고장률은 간단한 형태를 갖고 있다. D_k 를 부품 k 의 고장에 의하여 장비가 정지되어 있는 시간, 즉 부품 k 를 교체하는데 걸리는 시간이라고 하면, 그 장비에서의 부품 k 의 실질고장률은

$$\overline{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{1 + \sum_{j=1}^K \lambda_j D_j} \quad (1)$$

이다[오근태(1997)].

5. 모형의 정식화

모형을 정의하고 이의 해법절차를 개발하는데 있어서 부품의 교체시간은 $\overline{\lambda}_k$ 에 포함되어 있으므로 분석대상에 포함되지 않는다.

5.1 가용도의 정립

$E[\text{CSP 기간동안 단위시간당 정상가동중인 장비수}]$ 는 최초 배치된 장비의 총수 N 에서 $E[\text{CSP 기간동안 단위시간당 부품 고장 때문에 비가동중인 장비수}]$ 를 뺀 것이다.

$R(T)$ 를 $E[\text{CSP 기간동안 단위시간당 부품 고장 때문에 비가동중인 장비수}]$ 라 하면, 가용도는

$$\frac{N - R(T)}{N}$$

가 된다.

5.2 정식화

목표운용가용도를 A_0 라 할 때 최적 R 을 구하기 위한 모형을 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{j=1}^K c_j R_j \\ & \text{subject to } \frac{N - R(T)}{N} \geq A_0 \end{aligned} \quad [\text{모형 1}]$$

단, R_j 는 음이 아닌 정수,

이는 다시

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{j=1}^K c_j R_j \\ & \text{subject to } R(T) \leq (1 - A_0)N \end{aligned} \quad [\text{모형 2}]$$

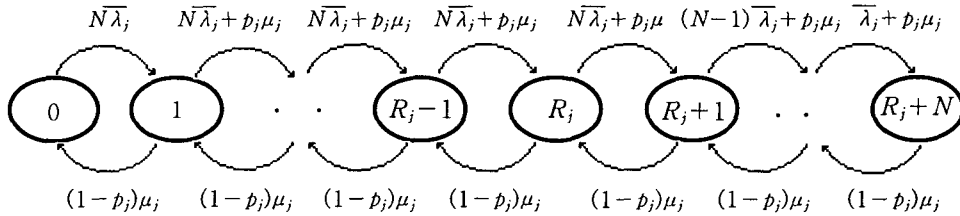
단, R_j 는 음이 아닌 정수,

로 표현할 수 있다.

이 모형은 제약조건을 하나 가지고 있는 분리가능한 비선형 최적화 문제로 정리됨으로써 라그랑주 승수법(Lagrange Multiplier Method)을 사용하여 최적해를 찾을 수 있는 계산절차를 유도할 수 있다.

6. CSP 구매량 R 의 유도

장비가 임의의 수리순환부품 1개로 구성되어있다고 할 때 고장이 발생하고 이를 교체한 후 수리를 통하여 순환시키는 과정은 대기행렬모형으로 표현된다. 임의의 부품 j 의 고장, 교체, 수리과정은 R_j 개 예비부품과 N 대의 장비에 부착되어 가동 중인 N 개의 부품 중 R_j 개 이상이 수리중이면 (수리중인 부품의 수 - R_j) 만큼의 장비가 부품의 고장으로 가동을 정지하는 일종의 Machine Repair Type의 대기행렬 모형이 된다. 수리 후 폐기율 p_j 를 감안한 전이율다이아그램(rate-flow diagram)으로 표현하면 다음 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 수리순환부품에 대한 전이율다이아그램

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

$$q_n(R_j) = \begin{cases} \frac{N\bar{\lambda}_j (N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j)^{n-1}}{(1-p_j)^n \mu_j^n} q_0(R_j), & n = 1, \dots, R_j + 1, \\ \frac{N\bar{\lambda}_j (N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j)^{R_j} \prod_{i=1}^{n-R_j-1} [(N-i)\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j]}{(1-p_j)^n \mu_j^n} q_0(R_j), & n = R_j + 2, \dots, R_j + N, \end{cases}$$

$$q_0(R_j) = \left[\sum_{m=1}^{R_j+1} \frac{N\bar{\lambda}_j (N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j)^{m-1}}{(1-p_j)^m \mu_j^m} + \sum_{m=R_j+2}^{R_j+N} \frac{N\bar{\lambda}_j (N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j)^{R_j} \prod_{i=1}^{m-R_j-1} [(N-i)\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j]}{(1-p_j)^m \mu_j^m} \right]^{-1}$$

이 되므로, 부품 j 에 의하여 평균적으로 가동정지된 장비의 수는

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

이다.

그러나 실제로는 E [CSP 기간동안 단위시간당 부품 고장 때문에 비가동중인 장비수]인 $R(T)$ 는 K 개의 부품으로 구성되어 있는 N 대의 장비들을 대상으로 그 값이 구해져야 하는데, 이 경우에는 K 종류의 개별 부품재고 현황이 현재 가동 중인 장비의 대수를 결정해 주기 때문에 각 부품별 전이율다이아그램에서 각 노드의 출력방향의 전이율이 장비 한 대에 하나의 부품만이 있다는 전제하에 작성된 전이율다이아그램인 <그림 1>과는 다르게 된다. 예를 들어 <그림 1>에서 부품 j 의 (R_j-1) 노드에서 (R_j) 노드로의 전이율은 $N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j$ 이지만 장비가 다수의 부품으로 구성되어 있다면 부품 j 의 고장 이외에도 다른 부품의 고장으로 인해 가동이 정지되는 장비의 수가 늘어나게 되므로 전이율은 $N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j$ 보다 작을 것이다. 이를 수식으로 표현하기가 어렵기 때문에 임의의 부품 j 의 전이율을 <그림 1>과 같다고 가정하면 $R(T)$ 는 다음과 같이 개략적으로 표현된다.

$$R(T) \approx \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) \tag{2}$$

가 된다.

식 (2)를 [모형 2]에 적용해서 구한 해는 실제보다 부품고장률을 더 크게 감안하여 구한 해가 된다. 하지만 고장률의 상대적인 크기를 반영하면서 실제보다 약간 더 많은 예비부품을 구매하게 되기 때문에 최적해는 아니더라도 합리적인 해가 된다. 추가로 구매한 예비부품은 부품불량 등을 감안하면 안전재고로 간주될 수 있다. 따라서 식 (2)를 이용해서 합리적인 해를 찾을 수 있는 알고리즘을 도출한다.

식 (2)를 이용하여 [모형 2]를 라그랑즈 승수기법으로 표현하면

$$\begin{aligned} & \text{minimize } E(R; \theta) \\ &= \sum_{j=1}^K c_j R_j \\ & \quad - \theta \left[N(1 - A_0) - \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) \right] \\ &= \sum_{j=1}^K \left[c_j R_j + \theta \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) \right] - \theta N(1 - A_0) \end{aligned}$$

가 된다. 여기서 R 은 (R_1, R_2, \dots, R_K) 를 의미한다.

윗식에서

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

라 하면

$$\text{minimise } E(R; \theta) = \sum_{j=1}^K D_j(R_j; \theta) - \theta N(1 - A_0)$$

로 다시 표현할 수 있다. 그러므로, $E(R; \theta)$ 의 최적 R 은 각 $D_j(R_j; \theta)$ 를 최적화시키는 R_j 의 집합으로 이루어진다.

θ 가 주어져 있을 때 $\Delta D_j(R_j; \theta)$ 를 $D_j(R_j + 1; \theta) - D_j(R_j; \theta)$ 라고 하면

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

이므로

$$\begin{aligned} & \Delta D_j(R_j + 1; \theta) - \Delta D_j(R_j; \theta) \\ &= \theta \left[\left\{ \sum_{n=R_j+3}^{R_j+2+N} (n - R_j - 2) q_n(R_j + 2) - \sum_{n=R_j+2}^{R_j+1+N} (n - R_j - 1) q_n(R_j + 1) \right\} \right. \\ & \quad \left. - \left\{ \sum_{n=R_j+2}^{R_j+1+N} (n - R_j - 1) q_n(R_j + 1) - \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) \right\} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

가 된다. 식 (3)의 오른쪽 항의 { }부분은 예비용 수리순환부품 j 를 $R_j + 1$ 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 (4)의 값은 0보다 크다. 따라서, 임의 θ 가 주어졌을 때 $D_j(R_j; \theta)$ 도 R_j 에 대해 볼록(convex)이다.

θ 가 주어졌을 때 $D_j(R_j; \theta)$ 는 R_j 에 대해 볼록이므로 최적 R_j 는 임의의 θ 에 대해 2개의 조건식, 즉

$$\Delta D_j(R_j - 1; \theta) \leq 0 \leq \Delta D_j(R_j; \theta) \quad (5)$$

$$N(1 - A_0) \geq \sum_{j=1}^K \sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) \quad (6)$$

를 동시에 만족하는 최소의 R_j 값이 된다. 여기서 식 (6)은 가용도조건이다.

또한 식 (3)에서 $\Delta D_j(R_j; \theta)$ 는 $c_j + \theta \sum_{n=1}^N n \{q_{R_j+n+1}(R_j + 1) - q_{R_j+n}(R_j)\}$ 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

$$Q_j(R_j) = - \frac{\Delta D_j(R_j; \theta) - c_j}{\theta} \geq 0$$

이고,

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

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

$$\begin{aligned} Q_j(0) &= - \frac{\Delta D_j(0; \theta) - c_j}{\theta} \\ &= - \sum_{n=1}^N n \{q_{n+1}(1) - q_n(0)\} \end{aligned}$$

와 최소값으로

$$Q_j(R_j^{\max}) = -\frac{\Delta D_j(R_j^{\max}; \theta) - c_j}{\theta}$$

를 갖는다.

θ 가 주어졌을 때 관계식 (5)의 조건을 만족하는 최적의 R_j 를 $R_j^*(\theta)$ 라 하면 $Q_j(R_j)$ 를 이용하여 $R_j^*(\theta)$ 와 c_j 와의 관계를 표현하면

$$\theta Q_j(R_j^*(\theta)) \leq c_j \leq \theta Q_j(R_j^*(\theta) - 1) \quad (7)$$

이고, 다시 $R_j^*(\theta)$ 와 θ 와의 관계로 표현하면

$$\frac{c_j}{Q_j(R_j^*(\theta) - 1)} \leq \theta \leq \frac{c_j}{Q_j(R_j^*(\theta))} \quad (8)$$

가 된다.

가용도조건 (6)을 무시했을 때 식 (8)로부터 부품 j 에 대해 $R_j^*(\theta)$ 와 θ 는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{i) } \theta \leq \min \left\{ \frac{c_j}{Q_j(0)} \right\} \text{ 일 때 } R_j^*(\theta) = 0, \\ \text{ii) } \min \left\{ \frac{c_j}{Q_j(0)} \right\} < \theta < \frac{c_j}{Q_j(R_j^{\max})} \text{ 일 때 } 0 \leq R_j^*(\theta) \leq R_j^{\max}, \\ \text{iii) } \theta \geq \frac{c_j}{Q_j(R_j^{\max})} \text{ 일 때 } R_j^*(\theta) = R_j^{\max}. \end{array} \right. \quad (9)$$

다음에 가용도조건인 식 (6)의 특성은 다음과 같다. $V(R)$ 과 $V_j(R_j)$ 를 각각 $\sum_{j=1}^K \left[\sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j) \right]$ 와 $\sum_{n=R_j+1}^{R_j+N} (n - R_j) q_n(R_j)$ 라고 하면

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

가 된다. 여기서,

$$\begin{aligned} \Delta V_j(R_j) &= V_j(R_j+1) - V_j(R_j) \\ &= \sum_{n=1}^N n \{ q_{R_j+n+1}(R_j+1) - q_{R_j+n}(R_j) \} \leq 0 \end{aligned}$$

이고,

$$\begin{aligned} \Delta V_j(R_j+1) - \Delta V_j(R_j) &= \sum_{n=1}^N n \{ q_{R_j+n+2}(R_j+2) - 2q_{R_j+n+1}(R_j+1) + q_{R_j+n}(R_j) \} \\ &\geq 0, \end{aligned}$$

$$\lim_{R_j \rightarrow \infty} \{ \Delta V_j(R_j+1) - \Delta V_j(R_j) \} = 0$$

이 성립하므로, $V_j(R_j)$ 는 R_j 가 커짐에 따라 처음에는 작아지다가 일정한 값에 수렴하게 된다.

따라서, $V_j(R_j)$ 의 특성과 식 (9)로부터 임의의 θ 에 대한 최적 R_j 를 R_j^* 라 할 때 $V(R)$ 을 크게 하기 위해서는 각 R_j^* 를 작게 하고, 각 R_j^* 를 작게 하기 위해서는 θ 를 작게 하여야 함을 알 수 있다.

이상의 여러 특성들로부터 R_j^* 를 다음과 같은 절차를 이용하여 구할 수 있다.

Step 1: 모든 R_j 를 0으로 두고 $\sum_{j=1}^K V_j(0) \leq N(1-A_0)$ 이면 모든 R_j^* 는 0이 되며 계산을 중지한다. 그렇지 않으면 Step 2로 간다.

Step 2: 모든 R_j 를 R_j^{\max} 로 두고 $\sum_{j=1}^K V_j(R_j^{\max}) \geq N(1-A_0)$ 이면 모든 R_j^* 는 R_j^{\max} 가 되며 계산을 중지한다. 그렇지 않으면 Step 3으로 간다.

Step 3: $\theta_M = \min \left\{ \frac{c_j}{Q_j(R_j^{\max})} \right\}$ 로 둔다.

Step 4: $\theta = \theta_M$ 으로 하여 식 (7)을 만족하는 최소의 R_j 를 구한다.

Step 5: $\left| \sum_{j=1}^K V_j(R_j) - N(1-A_0) \right|$ 가 주어진 허용범위(매우 작은 수)와 같거나 작으면 반복계산을 중지하고, 이때의 R_j 가 R_j^* 가 된다. 허용범위보다 크면서 $\sum_{j=1}^K V_j(R_j) < N(1-A_0)$ 이면 Step 6으로 가고, 그렇지 않으면 Step 12로 간다.

Step 6: θ 의 초기 하한(θ_L)과 상한(θ_U)을 다음과 같이 적용한다.

$$\theta_L = \min \left\{ \frac{c_j}{Q_j(0)} \right\}, \quad \theta_U = \theta_M.$$

Step 7: $n = 1$ 로 둔다.

Step 8: $\theta_n = \frac{\theta_L + \theta_U}{2}$ 로 하여 식 (7)을 만족하는 최소의 R_j 를 구한다.

Step 9: 현재의 θ_n 에 대한 $\left| \sum_{j=1}^K V_j(R_j^*(\theta_n)) - N(1-A_0) \right|$ 가 주어진 허용범위보다 작으면 반복계산을 중지하고, 이때의 R_j 가 R_j^* 가 된다. 그렇지 않으면 Step 10을 수행한다.

Step 10: $\sum_{j=1}^K V_j(R_j^*(\theta_n)) < N(1-A_0)$ 이면 $\theta_U = \theta_n$ 으로 놓고,
 $\sum_{j=1}^K V_j(R_j^*(\theta_n)) > N(1-A_0)$ 이면 $\theta_L = \theta_n$ 으로 놓는다.

Step 11: $n = n+1$ 로 하고 Step 8을 수행한다.

Step 12: θ 의 초기 하한(θ_L)과 상한(θ_U)을 다음과 같이 적용하고 Step 7로 간다.

$$\theta_L = \theta_M, \quad \theta_U = \max \left\{ \frac{c_j}{Q_j(R_j^{\max})} \right\}.$$

7. 수치예

CSP기간이 300일이고, 소모성부품 15종, 수리순환부품 15종으로 구성된 개인 장비를 15대 도입하는 경우 최대구입량, 부품 단가, 고장률, 평균부품교체시간, 수리시간 및 부품폐기율 자료가 다음 <표 1>과 같이 주어졌을 때 목표운용가용도의 변화에 따른 CSP 구입량을 위의 알고리즘을 적용하여 계산해 본 결과가 <표 2>에 요약되어 있다. <표 3>은 폐기율을 변화시켜서 폐기율의 영향을 비교한 결과를 보여준다.

<표 2>의 계산 결과 예상대로 목표운용가용도의 수준이 높을수록 전체 구입비용이 증가함을 볼 수 있으며, 고장률 λ_j 의 값이 크고 단가 c_j 가 싼 부품일수록 구입량이 많고, 같은 부품이라도 목표운용가용도가 커짐에 따라 구입량이 많아짐을 알 수 있다. 단가 c_j 가 10인 1, 2, 3번 부품을 보면 λ_j 의 크기에 따라 1, 2, 3번 부품 순으로 구입량이 많게 나타났으며, 목표운용가용도가 커짐에 따라 구입량이 증가함을 보여준다. λ_j 가 0.03으로 같은 3, 6, 9, 12, 15번 부품들의 경우에 목표운용가용도의 수준에 관계없이 c_j 의 크기가 커짐에 따라 3, 6, 9, 12, 15번 부품 순으로 구입량이 적게 나타났으며, 같은 단가에서 고장률이 커지면 구입량이 커지지만 단가가 비싸질수록 그 차이는 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편 목표운용가용도 수준이 낮아짐에 따라 단가가 비싼 부품일수록 고장률이 낮은 부품의 구매량에 비해서 높은 부품의 구매량이 더 크게 작아진다. 예를 들어 목표운용가용도 0.99수준에서 단가가 30, 고장률이 0.01인 부품의 구매량은 4개, 고장률이 0.03인 부품의 구매량은 5개인데, 목표운용가용도가 0.75로 낮아지면 2개, 3개로 구매량이 작아진다. 반면 단가가 50인 부품의 구매량은 3개, 4개에서 2개, 3개로 작아짐을 알 수 있다.

<표 3>의 계산 결과는 폐기율이 감소하면 구매량이 크게 줄어드는 것을 보여주고 있다. 따라서 초기 도입장비에 대한 정비능력의 확보의 중요성을 잘 보여주는 예라할 수 있다.

<표 1> 목표운용가용도에 따른 부품 구입량 변화를 보기 위한 자료(단위 생략)

부품번호 항목	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
수리순환부품 최대구입량 R_j^{\max}	70	46	66	67	26	33	48	71	40	15	89	55	29	19	30
수리순환부품 단가 d_j	10	10	10	20	20	20	30	30	30	40	40	40	50	50	50
수리순환부품 고장률 λ_j	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03
수리순환부품 교체시간 D_j	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
수리순환부품 수리시간 $1/\mu_j$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
고장부품 폐기율 p_j	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2

<표 2> 목표운용가용도에 수준에 따른 CSP 구입량의 변화

최적부품구입량 목표가용도	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	총구입 비용
0.99	4	5	5	4	4	5	4	4	5	3	4	5	3	4	4	1820
0.95	3	4	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	2	3	3	1410
0.90	3	4	4	3	3	4	3	3	4	2	3	3	2	3	3	1330
0.85	3	3	4	2	3	3	2	3	3	2	2	3	2	2	3	1130
0.75	2	3	3	2	3	3	2	2	3	2	2	3	2	2	2	1030

<표 3> 폐기율의 크기에 따른 CSP 구입량의 변화

최적부품구입량 폐기율	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	총구입 비용
0.30	9	11	13	8	10	12	8	10	11	8	9	10	7	9	10	4180
0.20	5	6	7	5	6	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	2320
0.10	3	4	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	2	3	3	1410

8. 결 론

본 논문은 CSP 대상부품이 선정되었다는 가정 하에 수리순환부품의 소요량을 산정하는 문제를 다루었으며, 운용가용도를 “CSP 기간동안 단위시간당 전체 장비에 대한 정상가동중인 장비의 평균비율”로 정의하고, 제한된 목표운용가용도를 만족시키는 범위내에서 부품구입비용을 최소화하는 각 부품별 최적소요량을 구할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

앞에서도 언급하였듯이 본 논문에서 개발한 절차로 산출한 구입량은 각 부품별 최적소요량이라고 할 수는 없다. 각 부품의 고장상태를 표현하는 전이율다이아그램에서 고장난 부품의 수가 R_j 일 때까지는 위 상태로의 전이율이 $N\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j$ 이고 R_j 를 초과하면 $(R_j + N - \text{고장난 부품의 수})\bar{\lambda}_j + p_j\mu_j$ 로 다른 부품과 연관성을 무시한 채 시간에 관계없이 일정하다고 가정했지만 실제로는 여러 종류의 부품들이 장비의 고장에 서로 연결되어 있고 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, 실제로는 후자가 더 문제가 되며, 위 알고리즘으로부터 계산된 소요량은 안전재고를 포함한 소요량으로 볼 수 있다.

본 논문의 내용은 앞으로 cannibalization 문제 등으로 확장되거나 시뮬레이션을 적용하여 좀더 현실적인 해를 도출하는데 기반이 되는 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김재원(1987), SYMD-515-87228, 국방과학연구소.
- [2] 박삼준(1994), 동시조달수리부속(CSP)소요산출 모델연구, 국방과학연구소.
- [3] 오근태(1996), 목표운용가용도제약하에서의 수리순환 동시조달부품의 최적 구매량 결정, 수원대학교 산업기술연구소 논문집, 제11집, 7-15.
- [4] 오근태(1997), 자금 제약하에서의 동시조달부품의 최적 구매량 결정, 한국공업경영학회지, 제20권, 제41집, 123-134.
- [5] 오근태, 김명수(1998), 운용가용도 제약하에서의 소모성 동시조달부품의 최적구매량 결정, 한국공업경영학회지, 제21권, 제48집, 113-122.
- [6] 오근태, 김명수(2000), 운용가용도 제약하에서의 소모성부품과 수리순환부품이 혼재된 동시조달부품의 최적구매량 결정, 한국산업경영시스템학회지, 제23권, 제59집, 113-122.
- [7] Daeschner, William E. Jr(1975). Models for Multi - item Inventory Systems with Constraints, *Doctoral Dissertation*, Naval Postgraduate School.
- [8] Everett Hugh(1963), Generalized Lagrange Multiplier for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources, *Operations Research*, Vol. 11, 399-417.