Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol, 28, No. 1, pp.97－104, March 2005.

부품재활용이 허용될 때 소모성 동시조달부품의 적정구매량 결정

오근태 · 나윤균

수원대학교 산업정보공학과

Provisioning Quantity Determination of Consumable Concurrent Spare Part under Cannibalization Allowed

Geun-Tae Oh · Yoon-Kyoon Na

Dept. of Industrial Information Engineering, University of Suwon

Considered is the concurrent spare part(CSP) requirements problem of new equipment system. In the considered system, when a part fails, the part cannot be repaired and should be replaced. In addition, cannibalization is allowed. It is assumed that the failure of a part follows a Poisson process. The operational availability concept in CSP is defined, and a formula is derived to calculate the operational availability using expected machine operating time during CSP period. The problem is formulated as the operational availability maximization problem with available budget constraint and a heuristic solution search procedure is developed. An illustrative example is shown to explain the solution procedure.

Keywords : Concurrent Spare Part, Operational Availability, Cannibalization

1. 서 론

일반적으로 해외 고가 장비를 도입할 경우에는 처음 얼마 동안 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 하며, 특히 군에서는 초도 배치되는 체계/장비에 대하여 목표전투준비태세 보장 및 원활하고 효율적인 운용/유지를 위해 일정한 CSP 운용기간을 설정하고 일정 수량의 CSP를 획득하여 장비 배치와 동시에 보급하도록 규정하고 있다.

CSP 운용에서 자주 제기되는 문제는 부품소요량을 지나치게 과다 책정함으로서 운용기간이 끝난 후에도 상당히 많은 수량의 재고가 사용되지 않고 남게 되어 경제적인 손실을 초래하거나, 반대로 소요부품을 너무 적게 구매하여 보급량 부족으로 신규장비의 운용에 지장을 초래하는 경우가 빈번하게 발생한다는 점이다. 사실 더 크게 문제가 되는 것은 소요부품을 적게 구매하여 부품부족으로 장비를 세워둘 수밖에 없는 경우다. 부품이 남으면 CSP 운용기간 동안 장비가 정지하는 일은 없지만 부품재고가 부족하면 CSP 운용기간이 끝나야만 부품공급을 받을 수 있기 때문에 전투장비나 활용도가 매우 높은 장비를 가동하지 못하는 등 장비체계의 운용에 치명적인 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 경제적인 측면과 장비체계의 운용성 측면을 동시에 고려한 최적 소요량을 산출할 수 있는 다양한 모델들이 많이 제시되었다.

일반적으로 고장률 자료를 근거로 하여 보급대상품목의 수요를 예측하고 수리적인 기법을 적용하여 CSP 총구매비용이나 장비의 운용가용도를 척도로 CSP 구매량을 결정하는 방법을 찾는 분야로 많은 연구가 되어 있다. 부품 보급체계내의 계단(Echelon)과 단계(Indenture)를 다중(multiple)으로 보지 않고 단일(single)로 보는 모델 중에서 가장 기본이 되는 Russel과 Mcmaster[9]의 Wholesale Provisioning Models는 미 해군에서 개발한 모델로 재고

부족량모델, 시간가중재고부족량모델, 가용도모델 등으로 구성되어 주로 고장나면 수리하지 않고 교체를 하는 소모성품목에 적합한 모델로 제시되었다. 재고부족량모델은 주어진 예산범위내에서 예상되는 재고부족량을 최소화시키는 모델이고, 시간가중재고부족량 모델은 CSP 기간동안 발생되는 재고부족량과 재고부족량이 지속된 시간까지 고려한, 즉 '재고부족량 · 시간'의 기대치를 최소화시키는 모델이며, 가용도모델은 제한된 예산범위내에서 무기체계의 운용가용도를 최대화하는 소요량을 CSP 구매수량으로 결정하는 것이다. 이 세가지 모델들은 각 예비부속의 고장형태나 정비의 수리능력, 부품재활용(cannibalization) 등은 고려하지 않고 모든 부품들을 소모성으로 간주했다. 이후 이 모델들을 기반으로 많은 연구가 진행되었는데 김재원[1], 오근태[4], Daeschner[7], Everett Hugh[8]는 모두 예산범위의 상한이 주어져 있을 때 가용도를 최대로 하는 모델을 다루었으며, 특히 오근태[4]는 부품을 수리하여 재사용하는 수리순환부품의 경우를 분석하였다. 이와는 달리 박삼준[2]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[3]는 수리순환부품의 CSP 물량을 구하는 문제를 분석하였고, 오근태와 김명수[5]는 소모성부품의 CSP 구매량을 구하는 문제를 다루었으며, 오근태와 김명수[6]는 소모성부품과 수리순환부품을 모두 구매하는 경우의 CSP 구매량을 구하는 절차를 개발하였다.

그러나 실제 현장에서는 한 장비의 특정 부품이 고장났을 때 그 부품의 재고가 없어서 장비를 사용할 수 없게 되면 이미 고장이 나서 가동하지 못하고 있는 타장비의 그 특정부품을 조사해서 만일 정상이라면 그 특정부품을 탈거해서 장비에 장착하여 정상가동시키는 부품재활용이 허용되는 경우가 대부분이며, 실제로 부품재활용이 허용되면 부품재보급시점까지 많은 장비를 가동시켜 높은 운용가용도를 유지할 수 있지만 앞서 언급된 연구에서는 부품재활용이 허용되는 경우를 다룬 것은 없었다.

본 논문에서는 CSP가 소모성부품으로 구성되고 부품재활용이 허용되었을 때 예산제약하에서 운용가용도를 최대화시켜주는 CSP 구매량을 구하는 방법을 제안한다.

2. 운용가용도의 정의

일반적인 운용가용도는 장비가 가동되어야할 시간에 대한 실제 가동할 수 있는 상태의 시간과의 평균비율로 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.

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

그러나, CSP의 운영목적을 고려한다면 CSP의 운용가용도는 일반적으로 정의되는 운용가용도와 별도로 정의하여야 할 것이다. 왜냐하면, CSP 운용기간 동안은 부품의 재보급이 허용되지 않기 때문에 CSP 대상 부품들이 소모성부품들로 구성되고 교환(replacement)을 원칙으로 하면 어떤 부품이든지 고장났을 때 사용 가능한 상태의 예비부품이 없으면 장비는 가동이 중지될 수밖에 없다. 일반적인 운영가용도는 재고 부족이 발생하면 언제든지 조달기간을 거쳐 고장난 부품이 조달되는 것으로 가정하지만 CSP의 경우는 일단 어떤 부품의 재고결손이 발생하면 CSP 운용기간 만료시까지 장비의 가동이 중지되며, 시간이 흐를수록 정상가동 상태에 있는 장비의 수는 감소한다. 더욱이 장비의 순간가동률은 "어느 순간에 정상상태에 있는 장비의 수/정상상태에 있어야 하는 장비의 수"로 표시되는 것이 현실적이다. 따라서, 일정기간 동안의 가동률은 이 개념을 확대하여 "어느 기간 동안에 정상상태에 있는 장비 · 시간(machine · hour)/어느 기간 동안 정상상태에 있어야 하는 장비 · 시간(machine · hour)"으로 변형하여 적용할 수 있을 것이다. 즉, 본 논문에서는 장비체계의 운용가용도를

$$\frac{E[\text{CSP 기간 중 실제 장비를 사용한 장비} \cdot \text{시간}]}{\text{CSP 기간 중 모든 장비가 정상가동되었을 때의 장비} \cdot \text{시간}}$$

으로 정의한다.

3. 기본 가정 및 기호의 정의

본 논문에서 기본적으로 전제하고 있는 가정은 다음과 같다.

- 부품 고장의 발생은 Poisson 과정을 따른다.
- 고장의 발생은 부품 상호간에 독립적으로 발생하며, 부품의 교체시간은 무시한다.
- CSP 운용기간 동안은 부품을 재보급하지 못한다. 따라서, 고장난 부품의 교체용 재고가 결손되면 장비는 가동이 중지된다. CSP 운용기간중 고갈된 부품은 CSP 운용기간이 종료되는 시점에서 모두 보충된다.
- 부품의 수리는 불가능하지만 부품재활용은 허용된다.
- 장비의 배치일정(CSP 운용기간 동안의 시기별 배치 대수)은 알려져 있으며, 특별한 언급이 없는 한 동시에 전체 장비가 배치된다.
- 장비가 가동중지 상태로 될 때 하나의 장비에 둘 이상의 결손 부품은 발생하지 않는다. 즉, 장비의 가동중지는 단 하나의 부품결손으로 발생한다.
- 하나의 장비에 같은 종류의 부품이 둘 이상 장착되지 않는다.

이후 본 논문에서 사용될 기호는 다음과 같다.

N : 장비의 총 수.
G : 부품종류의 총 수.
S_i : 부품 i 에 할당된 CSP 물량.
$(S_1, \cdots, S_G)$: CSP 전체 구매량.
T : CSP 운용기간.
t : $(0,\ T]$ 기간 동안 고장이 발생되는 시점.
$D_i(t)$: t 시점까지 발생된 부품 i 의 총고장수.

4. 운용가용도의 유도

CSP기간 동안 부품재활용이 허용되었을 때 최초의 장비수 N이 3, 부품 종류의 수 G는 3, 부품별 CSP 구매량은 S_1이 3, S_2이 2, S_3이 1인 경우에 가동 중인 장비수와 부품의 고장이 어떤 관계를 갖고 있는지를 <표 1>에 묘사하였다.

<표 1>로부터 임의의 t 시점에 가동 중인 장비수는 $\min\{N,\ N+S_1-D_1(t),\ \cdots,\ N+S_G-D_G(t)\}$가 된다.

이를 이용하여 "CSP기간 동안 실제 장비를 사용한 장비 · 시간"의 기대치, $Y(T)$를 구할 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

<표 1> 부품고장과 정상가동 중인 장비수의 관계

고장난 부품 /해당 장비		①/1	①/1	③/3	①/1	②/2	①/1	③/3	②/2	①/3	③/2	②/2	②/2	…
누적고장수		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	…
부품 품번	부품수 $(N+S_i)$	남은 부품수												
1	3+3	3+2	3+1	3+1	3	3	2	2	2	1	1	1	1	…
2	3+2	3+2	3+2	3+2	3+2	3+1	3+1	3+1	3	3	3	2	1	…
3	3+1	3+1	3+1	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	…
정상 가동 장비수	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	…

$$Y(T) = E[\text{CSP 기간 중 실제 장비를 사용한 장비·시간}]$$
$$= \sum_{k=0}^{N} k\{(0,\ T]\ \text{동안 } k\text{개의 장비가 가동 중인 상태에 있는 시간의 기대치}\}$$

임의의 시점 t 에 k 대의 장비가 가동 중일 확률을 $\phi_k(t)$ 라 하면

1) $k=N$일 때

$$\phi_N(t) = P[\min\{N, N+S_1-D_1(t), \cdots, N+S_G-D_G(t)\} = N]$$
$$= P[N+S_1-D_1(t) \ge N] \cdots P[N+S_G-D_G(t) \ge N]$$
$$= \Pi_{i=1}^{G} P[D_i(t) \le S_i].$$

2) $k \le N-1$ 일 때

$$\phi_k(t) = P[\min\{N, N+S_1-D_1(t), \cdots, N+S_G-D_G(t)\} = k]$$
$$= P[N+S_1-D_1(t) \ge k] \cdots P[N+S_G-D_G(t) \ge k]$$
$$- P[N+S_1-D_1(t) \ge k+1] \cdots P[N+S_G-D_G(t) \ge k+1]$$
$$= \Pi_{i=1}^{G} P[D_i(t) \le N+S_i-k]$$
$$- \Pi_{i=1}^{G} P[D_i(t) \le N+S_i-k-1].$$

따라서

$$Y(T) = \sum_{k=0}^{N} k \int_0^T \phi_k(t)\,dt.$$

그러므로 운용가용도는

$$\frac{Y(T)}{N \cdot T} \quad \cdots\cdots (1)$$

가 된다.

그러나, 고장의 발생은 Poisson 과정을 따르지만 고장을 일으키는 발생원인이 되는 가동되고 있는 장비들의 수는 시간이 경과되어 CSP 구매량을 다 소모하게 되면 점차로 줄어들기 때문에 부품의 고장발생빈도도 시간이 지남에 따라 감소하게 된다. 따라서, 부품 i의 t시점까지의 누적고장수 $D_i(t)$의 정확한 분포를 구하기 어렵기 때문에 CSP 운용기간이 끝날 때까지 각 부품의 고장률을 $N\lambda_i$로 일정하다고 가정한다. 이 경우 CSP 운용기간이 시작된 후 어느 정도 기간까지는 고장발생률이 평균적으로 $N\lambda_i$로 일정하다가 시간이 종료시점에 가까워질수록 $N\lambda_i$보다 작아지므로 이런 가정하에서는 CSP 기간동안의 부품소요를 약간 과장하게 된다.

5. CSP 소요모델

5.1 CSP 소요모델 정식화 및 해법

위 문제는 주어진 예산범위내에서 운영가용도를 최대화시키는 CSP 구매량을 산출하는 문제이므로 다음과 같이 정식화될 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} \quad \frac{Y(T)}{N \cdot T} \\ &s.t \quad \sum_{i=1}^{G} c_i S_i \le B \end{aligned} \quad \cdots\cdots (2)$$

N과 T가 주어지기 때문에 식 (2)는

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} \quad Y(T) \\ &s.t \quad \sum_{i=1}^{G} c_i S_i \le B \end{aligned} \quad \cdots\cdots (3)$$

로 고칠 수 있다. 식 (3)은 비선형계획법의 형태를 가지고 있으므로 해석적인 방법으로 최적해를 구하기가 거의 불가능하기 때문에 발견적기법(heuristic method)을 이용해서 해를 구하고자 한다. 본 논문에서 적용하는 발견적기법의 아이디어는 CSP 품목의 정의에 따라 우선 최초에 품목별로 1단위씩 구입을 한 후 이의 총구매비용이 가용예산을 넘지 않을 경우 품목별 보유가치를 산정하여 보유가치가 높은 품목을 추가 구매토록 하는 과정을 가용예산을 모두 사용할 때까지 반복하는 것이다. 반면, 품목별로 1단위씩만 구입을 했는데도 예산을 초과했을 경우에는 품목별 보유가치가 낮은 순위대로 제거하여 총구매비용이 가용예산을 넘지 않도록 한다. 이 과정은 다음과 같이 설명된다.

먼저 한 품목의 보유가치는 현재의 구입물량에서 1개를 추가로 더 구입함으로써 얻을 수 있는 운영가용도의 증가량을 의미한다. 즉, 품목들의 구매량이 $(S_1, \cdots, S_G)$일 때의 $Y(T)$를 $Y(S_1, \cdots, S_G; T)$라고 하면 i 번째 품목의 보유가치는

$$\frac{Y(S_1, \cdots, S_i+1, \cdots, S_G; T) - Y(S_1, \cdots, S_i, \cdots, S_G; T)}{c_i} \quad \cdots (4)$$

이며, 이 값은 $(S_1, \cdots, S_G)$ 값에 따라 변하게 된다.

각 품목을 $(S_1, \cdots, S_G)$ 만큼 구매해도 가용예산이 남는 경우에는 품목별 보유가치가 가장 큰 품목의 구매량을 1개 증가시켜서 $Y(S_1, \cdots, S_G; T)$를 계산하고, 이때 가용예산을 초과하지 않는다면 다시 품목별 보유가치를 계산하여 품목별 보유가치가 가장 큰 품목의 구매량을 1개 증가시키는 과정을 총구매비용이 가용예산에 이를 때까지 반복한다. 구입량을 1개 증가시켰을 때 가용예산을 초과하지 않는 품목 중에서 품목별 보유가치가 가장 큰 품목을 구매하는 방식으로 진행한다.

이 해법절차를 계속 반복하면 보면 어떤 단계에서 가용예산을 초과하지 않으면서 품목별 보유가치가 가장 큰 구매량$(S_1^*, \cdots, S_G^*)$를 도출하고 이때 남은 예산 $B - \sum_{i=1}^{G} c_i S_i^*$ 가 $\min\{c_1, \cdots, c_G\}$보다도 작은 경우에 도달하게 된다. 가장 싼 품목 1개를 추가구입하려해도 주어진 예산을 초과하게 되어 더 이상 탐색을 진행할 수 없는 최종단계에 도달했지만 이때의 구매량 $(S_1^*, \cdots, S_G^*)$가 반드시 최종해가 되지는 않는다. 사실 이 단계에서는 어떤 구매대안을 선택해도 더 이상 추가구매를 할 수 없는 상태이기 때문에 가장 좋은 해를 선택하는 기준으로 품목별 보유가치를 비교하는 것은 의미가 없고 예산제약을 만족하면서 $Y(S_1, \cdots, S_G; T)$를 최대로 하는

구매대안이 원하는 최종해가 된다.

한편 품목별로 1단위씩만 구입을 했는데도 가용예산을 초과했을 경우, 즉 $\sum_{i=1}^{G} c_i > B$ 인 경우는 품목별 보유가치가 낮은 순위대로 제거하여 총비용이 최초로 가용예산을 넘지 않을 때 계산을 중지하고 이때의 해를 CSP 구매량으로 선택하면 된다.

5.2 해 탐색절차

앞에서 언급된 해법으로 CSP 구매량을 결정하는 탐색절차를 다음과 같이 제시한다. 단, $Y_i^k(S_1^k, \cdots, S_G^k; T)$ 는 k 번째 계산에서 도출된 구매량이 $(S_1^k, \cdots, S_G^k)$일 경우의 $Y(S_1, \cdots, S_G; T)$로 정의한다.

단계 1 : $k = 1$.

단계 2 : 초기해를 $(S_1^1, \cdots, S_G^1) = (1, \cdots, 1)$로 둔다.

단계 3 : $Y_0^1(1, \cdots, 1; T)$를 구한다.

단계 4 : $\sum_{i=1}^{G} c_i > B$ 인 경우는 식 (4)의 방식으로 품목별 보유가치를 계산한 후 품목별 보유가치가 낮은 순위순으로 먼저 제거하여 총비용이 최초로 예산제약조건을 넘지 않을 때 계산을 중지하고 그때의 해를 최종해로 선택한다.

단계 5 : $k = k + 1$.

단계 6 : $i = 1$로 하고

$$\begin{cases} SS_1^k = S_1^{k-1} + 1, \\ SS_j^k = S_j^{k-1}, \ \forall j \neq 1 \end{cases}$$ 로 변경하고

$(SS_1^k, \cdots, SS_G^k)$가 예산제약조건

$\sum_{j=1}^{G} c_j SS_j^k \leq B$를 만족하면 이 조건에서의

$Y_1^k(SS_1^k, \cdots, SS_G^k; T)$를 구한다.

단계 7 : $i = i + 1$로 하고

$$\begin{cases} SS_i^k = S_i^{k-1} + 1, \\ SS_j^k = S_j^{k-1}, \ \forall j \neq i \end{cases}$$ 로 변경하고

$(SS_1^k, \cdots, SS_G^k)$가 예산제약조건

$\sum_{j=1}^{G} c_j SS_j^k \leq B$를 만족하면 이 조건에서의

$Y_i^k(SS_1^k, \cdots, SS_G^k; T)$를 구한다.

단계 8 : $i < G$ 이면 단계 7로 가고 $i = G$이면 단계 9로 간다.

단계 9 : 예산제약조건을 만족하는 경우가 없을 때에는 단계 12로 간다.

단계 10 : 단계 6과 7에서 계산된

$Y_i^k(SS_1^k, \cdots, SS_G^k; T)$에 대해

$$\frac{Y_i^k(SS_1^k, \cdots, SS_G^k; T) - Y_0^{k-1}(S_1^{k-1}, \cdots, S_G^{k-1}; T)}{c_i}$$

를 구한 후 이 값을 최대로 하는

$(SS_1^k, \cdots, SS_G^k)$를 $(S_1^k, \cdots, S_G^k)$로

하고 이때의 운용가용도를

$Y_i^0(SS_1^k, \cdots, SS_G^k; T)$로 한다.

단계 11 : 단계 5로 간다.

단계 12 : $k = k - 1$.

단계 13 : 주어진 예산제약조건을 만족하는

$(SS_1^k, \cdots, SS_G^k)$ 중에서

$Y_i^k(SS_1^k, \cdots, SS_G^k; T)$를 최대로 해 주는 구입방안 $(SS_1^k, \cdots, SS_G^k)$를 최종해

$(S_1^*, \cdots, S_G^*)$로 채택한다.

6. 수치예제

장비운용기간이 1,000이고, 할당된 구매예산이 5,500, 구성 부품의 수가 10개인 장비를 15대 도입하는 경우 부품품번, 고장률, 단가의 자료가 다음 <표 2>와 같이 주어졌을 때 운용가용도를 최대로 하는 CSP 구매량을 결정하기 위하여 위의 탐색절차를 적용하였다. 부품의 고장발생이 Poisson 과정을 따른다고 가정했다. 5장의 해 탐색절차와 시뮬레이션을 병행하여 발견적방법의 타당성을 검증하였다. 결과가 <표 3>에 주어져 있으며 사용한 소프트웨어는 Maple 8, Excel 2003과 ARENA 7.0이다.

<표 2> CSP 품목 자료

품 번	고 장 률	단 가
1	0.00030	150
2	0.00025	200
3	0.00010	400
4	0.00045	130
5	0.00050	100
6	0.00050	400
7	0.00015	250
8	0.00035	120
9	0.00040	270
10	0.00020	150

<표 3>을 보면 초기해로 대상 품목을 모두 1단위씩 구매하더라도 총구매비용이 2,170이기 때문에 예산제약 5,500에 못 미치므로 계속 탐색절차를 진행한다. 20번째 반복계산 결과인 $(S_1^{20}, \cdots, S_{10}^{20})$는 $(3, \cdots, 2)$이 된다. 그런데 21번째 해를 구하기 위해 추가구매품목을 선택하려해도 이때까지의 총구매비용이 5,420이기 때문에 가

<표 3> 구매예산이 5,500일 때의 해 탐색과정

계산순서	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	소모비용	$Y(S_1,\cdots,S_{10})$	품목별 보유가치	Simulation $Y(S_1,\cdots,S_{10})$	해 선택
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2170	10404.647		10451	1번째 해
2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2320	10435.629	0.2065	10871	
	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2370	10421.436	0.0839	10859	
	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2570	10405.774	0.0028	10842	
	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2300	10528.233	0.9507	10940	
	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2270	10580.415	1.7577	10971	2번째 해
	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2570	10580.415	0.4394	10991	
	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2420	10408.064	0.0137	10838	
	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2290	10457.111	0.4372	10892	
	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2440	10487.508	0.3069	10927	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2320	10412.804	0.0544	10843	
3	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2420	10617.035	0.2441	11008	
	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2470	10600.548	0.1007	10999	
	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2670	10581.824	0.0035	10975	
	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2400	10721.319	1.0839	11087	3번째 해
	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2370	10675.010	0.9460	11052	
	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2670	10778.936	0.4963	11139	
	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2520	10584.634	0.0169	10975	
	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2390	10641.604	0.5099	11049	
	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2540	10675.902	0.3537	11062	
	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2420	10590.344	0.0662	10978	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	4	2	1	4	5	3	1	3	3	2	5340	12387.773	0.1785	12590	
	3	3	1	4	5	3	1	3	3	2	5390	12402.002	0.2050	12615	
	3	2	2	4	5	3	1	3	3	2	5590	12375.899	0.0372		예산초과
	3	2	1	5	5	3	1	3	3	2	5320	12419.673	0.4513	12625	19번째 해
	3	2	1	4	6	3	1	3	3	2	5290	12406.093	0.4509	12590	
	3	2	1	4	5	4	1	3	3	2	5590	12539.839	0.4471		예산초과
	3	2	1	4	5	3	2	3	3	2	5440	12398.509	0.1500	12601	
	3	2	1	4	5	3	1	4	3	2	5310	12409.660	0.4055	12605	
	3	2	1	4	5	3	1	3	4	2	5460	12441.373	0.2977	12637	
	3	2	1	4	5	3	1	3	3	3	5340	12381.006	0.1334	12574	
20	4	2	1	5	5	3	1	3	3	2	5470	12448.287	0.1908	12657	
	3	3	1	5	5	3	1	3	3	2	5520	12463.279	0.2180		예산초과
	3	2	2	5	5	3	1	3	3	2	5720	12435.447	0.0394		예산초과
	3	2	1	6	5	3	1	3	3	2	5450	12448.528	0.2220	12649	
	3	2	1	5	6	3	1	3	3	2	5420	12467.476	0.4780	12663	20번째 해
	3	2	1	5	5	4	1	3	3	2	5720	12607.192	0.4688		예산초과
	3	2	1	5	5	3	2	3	3	2	5570	12459.334	0.1586		예산초과
	3	2	1	5	5	3	1	4	3	2	5440	12471.384	0.4309	12675	
	3	2	1	5	5	3	1	3	4	2	5590	12504.654	0.3147		예산초과
	3	2	1	5	5	3	1	3	3	3	5470	12441.051	0.1425	12645	
21	4	2	1	5	5	3	1	3	3	2	5470	12448.287	0.1908	12657	
	3	2	1	6	5	3	1	3	3	2	5450	12448.528	0.2220	12649	
	3	2	1	5	6	3	1	3	3	2	5420	12467.476	0.4780	12663	
	3	2	1	5	5	3	1	4	3	2	5440	12471.384	0.4309	12675	최종해
	3	2	1	5	5	3	1	3	3	3	5470	12441.051	0.1425	12645	

장 단가가 낮은 5번 품목을 추가구매하려해도 가용예산의 상한인 5,500을 초과하게 된다. 따라서 20번째 추가구입대안들 중 예산제약을 만족하는 대안 5가지를 을 비교하여 그 중 $Y(S_1, \cdots, S_G; T)$를 최대로 해주는 구입방안 $(3,2,1,5,5,3,1,4,3,2)$가 최종해가 된다. 이때의 총구매비용은 5,440이며 운용가용도는

$$\frac{12471.384}{15 \times 1,000} = 0.8314$$

가 된다.

발견적방법으로 구한 해로 시뮬레이션 해 보면 $Y(S_1, \cdots, S_{10})$이 커지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 발견적방법을 구하기 위해 CSP기간 동안 부품의 고장률이 일정하다는 가정했기 때문이다. 그 결과 실제보다 수요가 과장되므로 발견적방법으로 구한 해로 시뮬레이션을 하게 되면 당연히 $Y(S_1, \cdots, S_{10})$는 커지게 된다. 그러나 두 값은 서로 비례함을 알 수 있다.

21번째 단계에 나타나 있듯이 발견적방법으로 구한 최종해가 시뮬레이션에서도 가장 좋은 해가 되기 때문에 시뮬레이션까지 할 필요없이 "발견적방법으로 구한 최종해"를 최적구입량으로 사용해도 실용상 문제가 되지 않으리라 생각된다. 이와 같은 이유로 본 논문에서 제안하는 알고리듬은 새로 조달되는 장비의 CSP부품의 예산을 책정하는 분야에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

또한 이 예에서처럼 품목별 보유가치를 기준으로 선택 우선순위를 매기는 방식을 반복해서 적용해서 최종적으로 구한 20번째 해인 $(S_1^{20}, \cdots, S_{10}^{20})$가 예산범위 내에서 가장 좋은 운용가용도를 보여주는 최종해가 아닐 수 있기 때문에 탐색절차의 단계 12, 13이 필요하다.

7. 결 론

CSP 구매량을 산정하는 문제는 먼저 관련된 운용가용도를 정의한 후 운용가용도를 조건으로 했을 때는 투자비용을 최소화하고, 투자비용을 조건으로 했을 때는 운용가용도를 최대화시키는 CSP 구매량을 도출하는 과정으로 이루어진다. 본 논문에서는 후자의 방법을 택하였다.

이 가운데 최적해를 결정하는 척도의 역할을 하는 운용가용도는 정의하기에 따라 다양한 형태를 나타낸다. 본 논문에서는 CSP운용의 특성을 반영하여 운용가용도를 "어느 기간 동안에 정상상태에 있는 장비·시간 / 어느 기간 동안 정상상태에 있어야 하는 장비·시간"으로 정의하고, CSP 운용기간이라도 부품의 부품재활용이 허용되었을 경우에 장비운용가용도를 구할 수 있는 계산식을 유도하였다. 실제로 현장에서는 CSP 부품일수록 부품재활용을 해야 더 경제적이다.

본 논문에서 개발한 적정구입량은 실제 상황에서 완벽하게 각 부품별 적정소요량이 되지는 못한다. 왜냐하면 본 논문에서는 각 부품별 고장발생률이 시간에 관계없이 일정하다고 가정했지만 실제로는 시간이 흘러 CSP 운용기간 후반부로 갈수록 재고가 바닥난 부품수가 증가하면서 가동불능상태의 주장비가 증가하여 운용가능한 장비의 수가 줄어들게 되어 각 부품별 고장발생률은 감소하기 때문이다. CSP 운용기간 후반부의 수요를 다소 과장되게 취급한다는 점을 고려해 볼 때 실제소요량보다 약간 많이 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 신규 장비의 운용에 지장을 초래한 점을 들 수 있는데, 실제는 후자가 더 문제가 되며, 위 알고리듬으로부터 계산된 구매량은 안전재고를 포함한 구매량으로 볼 수 있다.

운용가용도를 계산하는 식 (1)은 고장분포가 지수분포를 따를 경우를 가정하고 구한 식이기 때문에 시스템이나 모듈 수준에는 잘 적용되지만 실제로 기계류 부품 수준의 수명분포에 잘 적용되는 Weibull분포나 대수정규분포에도 적용할 수 있도록 해야 활용도를 더 넓힐 수 있다고 생각된다.

본 논문의 결과는 운용가용도의 하한이 주어지고 구매비용을 최소화하는 문제로 확장할 수 있을 것이고, 장비시스템 개발시 그 장비가 적용될 환경에서의 부품의 신뢰도와 유지보수비용을 연계해 부품의 적정신뢰도를 예측하는 경우에도 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 김재원; "SYMD-515-87228," 국방과학연구소, 1987.

[2] 박삼준; "동시조달수리부속(CSP) 소요산출 모델연구, 국방과학연구소, 1994.

[3] 오근태; "목표운용가용도제약하에서의 수리순환동시조달부품의 최적 구매량 결정," 수원대학교 산업기술연구소 논문집, 제11집, 7-15, 1996.

[4] 오근태; "자금 제약하에서의 동시조달부품의 최적 구매량 결정," 한국공업경영학회지, 제20권, 제41집, 123-134, 1997.

[5] 오근태, 김명수; "운용가용도 제약하에서의 소모성 동시조달부품의 최적구매량 결정," 한국공업경영학회

지, 제21권, 제48집, 113-122, 1998.
[6] 오근태, 김명수; "운용가용도 제약하에서의 소모성부품과 수리순환부품이 혼재된 동시조달부품의 최적구매량 결정," 한국산업경영시스템학회지, 제23권, 제59집, 113-122, 2000.
[7] Daeschner, William E. Jr.; "Models for Multi - item Inventory Systems with Constraints," Doctoral Dissertation, Naval Postgraduate School, 1975.
[8] Everett Hugh; "Generalized Lagrange Multiplier for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources," Operations Research, Vol. 11, 399-417, 1963.
[9] Russell, F. R., and Mcmaster, A. W.; "Wholesales Provisioning Models : Model Development," NPS55-83-026, Naval Postgraduate School, 1983.