Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering
Vol. 33, No. 3, pp.199－207, September 2010.

운용가용도 제약하에서 동류전용이 허용될 때 소모성 동시조달부품의 적정구매량 결정

오근태† · 나윤균 · 김명수

수원대학교 산업정보공학과

Provisioning Quantity Determination of Consumable Concurrent Spare Part Under Availability Constraint and Cannibalization Allowed

Geun-Tae Oh† · Yoon-Kyoon Na · Myung-Soo Kim

Dept. of Industrial Information Engineering, University of Suwon

In this paper considered is the provisioning quantity determination problem of consumable concurrent spare parts (CSP) of a new equipment system to minimize the procurement cost under the operational availability constraint. When a part fails, repair of the failed part is impossible and the part is replaced and cannibalization is allowed. The failure of a part is assumed to follow a Poisson process and the operational availability in CSP is defined. The solution procedure consists of two parts. Firstly, a heuristic algorithm is developed under the assumption that the failure rate is constant during the CSP period. Secondly, proposed is a simulation search procedure which improves the heuristic solution to the near optimal solution in a reasonable amount of time. An illustrative example is shown to explain the solution procedure.

Keywords : Concurrent Spare Part, Operational Availability, Cannibalization, Heuristic Algorithm

1. 서 론

해외에서 고가 장비나 모듈(module)을 구매할 경우에는 처음 얼마 동안 필요한 부품을 국내에서 조달할 수 없거나 수리가 불가능한 경우가 많기 때문에 국내 조달이 가능하거나 수리 능력을 확보할 때까지의 일정 기간 동안 부품의 재보급 없이 장비를 정상적으로 운용하기 위하여 신규 장비를 도입할 때 장비와 함께 예비부품(spare part)을 구입하게 된다. 이를 특히 군에서는 동시조달부품(concurrent spare part : CSP)이라 하며, 초도 배치되는 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 운용시 발생되는 문제는 부품소요량 예측을 잘못하여 운용기간이 끝난 후에도 상당히 많은 수량의 부품 재고가 남게 되어 경제적인 손실을 초래하거나, 반대로 재고 부족으로 신규 장비의 운용에 지장을 초래하는 경우가 빈번하게 발생한다는 점이다. 운용기간이 끝난 후에도 과다한 수량이 남아 있게 되는 경우는 장비 공급업체에서 제공하는 고장률을 바탕으로 개별부품 소요량을 "고장률×CSP 운용기간×장비대수"로 단순히 계

논문접수일 : 2010년 08월 09일　　게재확정일 : 2010년 08월 23일
† 교신저자 gtoh@suwon.ac.kr

산하였기 때문이다. 일반적으로 장비 제공업체가 제공하는 고장률은 실험실에서 측정된 개별부품의 고장률이거나 장비에 장착되었을 때를 감안하여 보정계수를 고려한 고장률이다. 그러나, 실제로는 고장을 발생시킬 수 있는 모집단의 수(장비의 수)는 한정되어 있으며 시간이 지남에 따라 각 장비의 각 부품별로 고장이 발생하여 장비 구입시에 같이 구입한 예비부품을 사용하게 되는데, 예비부품의 재고가 품절된 부품이 고장나면 그 장비는 그 부품의 고장으로 인해 가동이 중단되기 때문에 전체 모집단의 크기(가동되는 장비의 수)는 점차 작아지게 되어 장비체계 전체에 대한 각 부품별 고장수(각 예비부품의 소모율)는 점차 줄어들게 된다. 따라서, 시간이 지남에 따라 가동중인 장비대수가 줄어들게 되어 처음에 추정했던 소요량은 실제 필요한 양보다 과도한 물량이 된다. 한편, 더 큰 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.

CSP 총구매비용 최소화와 장비 운용가용도의 최대화는 서로 상충되기 때문에 대부분 하나는 목적함수, 다른 하나는 제약조건으로 하여 CSP 구매량을 결정하는 방법으로 많은 연구가 되어 있다. 보급체계내의 계단(echelon)과 단계(indenture)를 다중(multiple)으로 보지 않고 단일(single)로 보는 모델 중에서 가장 기본이 되는 Russel과 Mcmaster[10]의 Wholesale Provisioning Models는 미 해군에서 개발한 모델로서 재고부족량모델, 시간가중재고부족량모델, 가용도모델 등으로 구성되었다. 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, 동류전용(同類轉用: cannibalization) 등은 고려하지 않고 모든 부품들을 고장시 교체를 하는 소모성부품(consumable part)으로 간주했다. 이후 이 모델들을 기반으로 한 이 분야의 연구들 중에는 김재원[1], 오근태[4], Daeschner[8], Everett Hugh[9]는 모두 비용상한이 주어져 있을 때 가용도를 최대로 하는 모델을 다루었으며, 특히 오근태[4]는 부품을 수리하여 재사용하는 수리순환부품(repairable part)의 경우를 분석하였다. 이와는 달리 박삼준[2]은 모든 정보, 예를 들면 계단, 단계, *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, 오근태, 김명수[6]는 소모성부품과 수리순환부품을 혼재하여 구매하는 경우의 CSP 구매량을 구하는 절차를 개발하였다.

그러나, 실제 현장에서는 한 장비의 특정부품이 고장났는데 그 부품의 재고가 없어서 장비를 사용할 수 없게 되면 이미 다른 부품의 재고 부족으로 가동되지 않고 있는 타장비에 탑재된 그 특정부품을 탈거해서 장비를 정상가동시키는 동류전용이 허용되는 경우가 대부분이며, 실제로 동류전용이 허용되면 부품재보급시점까지 많은 장비를 가동시켜 높은 운용가용도를 유지할 수 있다. 오근태, 나윤균[7]은 소모성부품을 대상으로 동류전용을 허용하는 경우 총구매비용의 제약하에서 가용도를 최대화시키는 CSP 구매량을 찾는 휴리스틱 알고리듬(heuristic algorithm)을 제안하였다. 그러나, CSP 운용기간동안 각 부품별 고장발생수가 시간에 관계없이 일정하다는 가정하에서 개발된 휴리스틱 알고리듬이기 때문에 이 기법으로 도출한 적정구입량은 실제 필요한 양보다 더 많게 된다. 앞에서 언급한대로 현실에서는 시간이 흘러 CSP 운용기간 후반부로 갈수록 재고가 바닥난 부품수가 증가하면서 운용가능한 장비의 수가 줄어들게 되어 각 부품별 고장발생수가 감소하게 되기 때문이다. 그 고장수의 감소는 동류전용이 없는 경우보다 훨씬 복잡하여 예측하기 어렵다. 한편, 보급량이 부족하여 신규장비의 운용에 지장을 초래하는 것은 큰 문제가 되기 때문에 탐색적 기법을 통해 도출된 구매량은 안전재고를 포함한 구매량으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 CSP가 소모성부품으로 구성되고 동류전용이 허용되었을 때 [7]과 달리 목표운용가용도를 만족하면서 구매비용을 최소화시켜주는 CSP 구매량을 구하는 방법을 제안한다.

이 문제도 결국 고장발생수 감소 문제가 발생하기 때문에 이를 근본적으로 극복하기 위해서는 시뮬레이션을 이용하는 것이 좋겠지만 이 또한 모든 가능한 경우를 탐색해야 되기 때문에 만일 고속전철 같이 수많은 부품

들로 구성된 장비를 대상으로 한다면 최적구입량을 도출하기 위해서는 적지 않은 시간을 요하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 소모성부품을 대상으로 목표 운용가용도 제약하에서 동류전용을 할 경우 투자비용을 최소화하는 구입량을 구하기 위해 먼저 운용기간동안 고장률이 일정하다는 전제하에서 적정구입량을 구할 수 있는 휴리스틱 알고리듬을 개발하고, 그 결과를 시뮬레이션의 초기해로 설정하여 빠른 시간내에 현실적으로 최적해에 근사한 해를 찾는 탐색절차를 개발하였다.

2. 기본 가정 및 기호의 정의

본 논문에서 기본적으로 전제하고 있는 가정은 다음과 같다.

- 대상 CSP 품목들은 1개 이상의 소요가 예상되기 때문에 반드시 1개 이상은 구매한다.
- 부품 고장의 발생은 Poisson 과정을 따른다고 가정한다.
- 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 동류전용은 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 i에 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 i의 총고장수.

3. 운용가용도의 정의

운용가용도의 개념은 우리 군의 “합동·연합작전 군사용어사전”에 정의되어 있는 ‘가동률(稼動率 : Available Rate)’에 해당하는 개념으로 ‘해당 장비의 총 운용시간에 대해서 불가동시간을 제외한 가동시간의 백분율’을 의미한다.

$$\text{운용가용도} = \frac{\text{가동시간}}{\text{총 운용시간}} \times 100\%$$

그러나, CSP의 운영목적을 고려한다면 CSP의 운용가용도는 일반적으로 정의되는 운용가용도와 별도로 정의하여야 할 것이다. CSP 운용기간 동안은 부품의 재보급이 허용되지 않기 때문에 CSP 대상 부품들이 소모성부품들로 구성되고 고장난 부품은 교환(replacement)을 원칙으로 하면 어떤 부품이든지 고장났을 때 사용 가능한 상태의 예비부품이 없으면 장비는 가동이 중지될 수밖에 없다. 일반적인 운용가용도는 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

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

으로 정의한다.

4. 운용가용도의 유도

CSP기간 동안 동류전용이 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> 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	…

<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.

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

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

1) $k=N$일 때

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

2) $k \leq N-1$일 때

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

따라서

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

그러므로, 운용가용도는

$$\frac{Y(T)}{NT} \tag{1}$$

가 된다.

그러나, 고장의 발생은 Poisson 과정을 따르지만 고장을 일으키는 발생원인이 되는 가동되고 있는 장비들의 수는 시간이 경과되어 CSP 구매량을 모두 소모하게 되면 점차로 줄어들기 때문에 부품의 고장발생빈도도 시간이 지남에 따라 감소하게 된다. 따라서, 부품 i의 t 시점까지의 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 $N\lambda_i$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

운용가용도를 목표값 이상으로 유지하면서 CSP 구매비용을 최소화하는 CSP 구매량을 산출하는 문제이므로 다음과 같이 정식화될 수 있다.

$$Minimize \quad \sum_{i=1}^{G} c_i S_i \tag{2}$$

$$s.t \quad \frac{Y(T)}{NT} \geq A$$

식 (2)는 비선형계획법의 형태를 가지고 있으며, 해석적인 방법으로 최적해를 구하기가 거의 불가능하기 때문에 휴리스틱 알고리듬을 이용해서 해를 구하여야 한다. 본 논문에서 적용하는 휴리스틱 알고리듬의 아이디어는 CSP 품목의 정의에 따라 우선 최초에 품목별로 1단위씩 구입을 한 후 이때의 $Y(T)$가 A를 넘지 않을 경우 품목별 보유가치를 산정하여 보유가치가 가장 높은 품목 1개를 추가 구매하는 과정을 $Y(T)$가 A를 넘을 때까지 반복하는 것이다. 이 과정은 다음과 같이 자세히 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

$$\frac{Y(S_1,\cdots,S_i+1,\cdots,S_G;T) - Y(S_1,\cdots,S_i,\cdots,S_G;T)}{c_i} \tag{3}$$

이며, 이 값은 $(S_1,\cdots,S_G)$ 값에 따라 변하게 된다. 만일 i 번째 품목을 m_i개 구매할 경우의 보유가치는

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

가 된다.

각 품목을 $(S_1,\cdots,S_G)$만큼 구매해도 $Y(T)$가 A를 초과하지 못할 경우에는 품목별 보유가치가 가장 큰 품목의 구매량을 증가시켜서 $Y(S_1,\cdots,S_G;T)$를 계산하고, 이때 A를 초과한다면 계산을 중지하고, 아닐 경우는 A를 초과할 때까지 이 과정을 반복하는 것이다.

이 해법절차를 계속 반복하면 어떤 단계에서 $Y(S_1,\cdots,S_G;T) \geq A$를 만족하는 여러 개의 $(S_1,\cdots,S_G)$가 도출되는데, 이때 구입비용을 최소화하는 구매량 $(S_1^*,\cdots,S_G^*)$를 최종해로 선정한다. 만일 품목별로 1단위씩만 구입을 했는데도 $Y(1,\cdots,1;T) \geq A$인 경우는 $(1,\cdots,1)$가 최종해가 된다.

5.2 해 탐색 휴리스틱 알고리듬

앞에서 언급된 해법으로 CSP 구매량을 결정하는 휴리스틱 알고리듬을 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 $Y(S_1,\cdots,S_G;T)$의 값으로 정의한다.

단계 1 : $\Delta_1^{\max} = \left\lfloor \frac{\max_i c_i}{c_1} \right\rfloor, \cdots, \Delta_G^{\max} = \left\lfloor \frac{\max_i c_i}{c_G} \right\rfloor$.

단계 2 : $k=1$.

단계 3 : 초기해를 $(S_1^k,\cdots,S_G^k)=(1,\cdots,1)$로 둔다.

단계 4 : $Y_0^k(1,\cdots,1;T)$를 구한다.

단계 5 : $Y_0^k(1,\cdots,1;T) \geq A$인 경우는 $(1,\cdots,1)$이 최종해가 되며, 그렇지 않을 경우는 단계 6으로 간다.

단계 6 : $k=k+1.\ i=0.$

단계 7 : $i=i+1.\ m_i=0.$

단계 8 : $m_i=m_i+1.$ $\begin{cases} SS_i^k = S_i^{k-1}+m_i, \\ SS_j^k = S_j^{k-1},\ \forall\, j \neq 1 \end{cases}$ 로 변경하고 $Y_i^k(SS_1^k,\cdots,SS_G^k;T)$와

$$\frac{Y_i^k(SS_1^k,\cdots,SS_G^k;T) - Y_0^{k-1}(S_1^{k-1},\cdots,S_G^{k-1};T)}{m_i\, c_i} \tag{5}$$

를 구한다.

단계 9 : $m_i < \Delta_i^{\max}$이면 단계 8로 가고, $m_i = \Delta_i^{\max}$이면 단계 10으로 간다.

단계 10 : $i < G$이면 $SS_i^k = SS_i^k - m_i$로 하고, 단계 7로 간다. $i=G$이면 단계 11로 간다.

단계 11 : 단계 7, 8, 9, 10을 통해 계산된 $Y_i^k(SS_1^k,\cdots,SS_G^k;T)$ 중에 A 이상의 값을 갖는 것들이 있으면 그 가운데 구매비용 $\sum_{i=1}^{G} c_i\, SS_i^k$를 최소로 해 주는 $(SS_1^k,\cdots,SS_G^k)$를 최종해 $(S_1^*,\cdots,S_G^*)$로 채택하고 종료한다. 만일 A 이상의 값을 갖는 해가 없으면 단계 12로 간다.

단계 12 : 식 (5)를 최대로 하는 $(SS_1^k,\cdots,SS_G^k)$를 $(S_1^k,\cdots,S_G^k)$로 하고, 이때의 운용가용도를 $Y_0^k(S_1^k,\cdots,S_G^k;T)$로 한다.

단계 13 : 단계 6으로 간다.

6. 최적해 탐색절차

운용가용도가 A_0 으로 주어졌다는 가정하에서 제 5장에 주어진 휴리스틱 알고리듬을 이용하여 구한 예비부품 구입량으로 시뮬레이션을 하면 실제 운용가용도는 A_0 을 초과하게 된다. 그 이유는 앞에서 언급한대로 해석적 모형을 구축할 때 장비운용기간 동안의 예비부품에 대한 수요가 과잉으로 예측되기 때문이다. 따라서 이와 같은 특성을 이용해 해석적 방법과 시뮬레이션을 결합하여 다음 순서로 "현실적으로 최적해에 근사한 해"를 도출한다. 본 논문에서는 이 해를 "근사최적해(near optimal solution)"로 명한다

[Phase I]

단계 1 : 초기해를 $(S_1^0,\cdots, S_G^0)=(1,\cdots,1)$ 로 하고 시뮬레이션하여 운용가용도 B_0 를 구한다. 만일 $B_0 \ge A_0$ 이면 $(1,\cdots,1)$ 가 최종해가 되며 종료한다. $B_0 < A_0$ 이면 Step 2로 간다.

단계 2 : $k=1$, $A_1=A_0$로 한다.

단계 3 : 가용도 A_k 조건에서 5.2 해 탐색절차를 이용하여 구매량 $(S_1^k, S_2^k, \ldots, S_G^k)$를 계산한다.

단계 4 : 구매량 $(S_1^k, S_2^k, \cdots, S_G^k)$가 주어졌을 때의 실제가용도 B_k 를 시뮬레이션으로 구한다.

단계 5 : $k=k+1$.

단계 6 : $A_k=A_{k-1}-\dfrac{B_{k-1}-A_0}{2}$ 로 변환한 후, 단계 4까지의 과정을 통해 구한 구매량들 중 운용가용도가 A_k 이상이면서 전단계 구매량인 $(S_1^{k-1},\cdots, S_G^{k-1})$를 구매하는데 필요한 비용보다 작은 비용을 발생시키는 해들을 찾는다. 이 중에서 가장 작은 비용을 발생시키는 해를 $(S_1^k,\cdots, S_G^k)$로 선정하고 운용가용도 B_k를 구한다. 만족하는 해가 존재하지 않거나 $B_k \le A_0$이면 단계 7로 가고, $B_k > A_0$이면 단계 5로 간다.

[Phase II]

단계 7 : $k=k+1$, $i=1$로 하고,

$$\begin{cases} S_1^k = S_1^{k-1}-1, \\ S_j^k = S_j^{k-1}, \ \forall j \ne 1 \end{cases}$$

로 변경한 후 시뮬레이션하여 B_k를 구한다. 단, $S_1^k=0$인 경우는 단계 8로 간다.

단계 8 : $k=k+1$, $i=i+1$로 하고,

$$\begin{cases} S_{i-1}^k = S_{i-1}^{k-1}+1, \\ S_i^k = S_i^{k-1}-1, \\ S_j^k = S_j^{k-1}, \ \forall j \ne (i-1, i) \end{cases}$$

로 변경한 후 시뮬레이션하여 B_k를 구한다. 단, $S_i^k=0$인 경우는 단계 9로 간다.

단계 9 : i 값에 따라

① $i<N$이면 단계 8로 간다.

② $i=N$이면 단계 6의 최종해와 단계 8, 9를 거쳐 구한 해들 중에 $B_k \ge A_0$이면서 구매비용이 가장 작은 값을 주는 해가 근사최적해가 되며 탐색절차를 종료한다.

7. 수치예제

장비운용기간이 1,000이고, 구성 부품의 수가 10개인 장비를 15대 도입하는 경우 부품품번, 고장률, 단가의 자료가 다음 <표 2>와 같이 주어졌을 때 최소의 비용으로 CSP 구매량을 결정하기 위하여 위의 탐색절차를 적용하였다. 사용한 소프트웨어는 운용가용도와 시뮬레이션을 위해서 각각 Maple과 ARENA를 사용하였다.

<표 2> CSP 품목 자료

품번	고장률	단가
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

원하는 운용가용도가 0.80(80%)일때 제 6장의 탐색절차를 이용해 구한 결과가 <표 3>과 <표 4>에 주어져 있다.

<표 3>은 [Phase I]의 결과를 보여준다. 단계 3을 14회 반복하여 $(S_1^1,\cdots, S_{10}^1)$로 $(2,1,1,4,5,3,1,3,2,1)$를 구했다. 이때 총구매비용은 4,420이며 운용가용도는

$$\frac{12006.251}{15\times 1{,}000}=0.8004$$

〈표 3〉 목표운용가용도 80%에서 [Phase Ⅰ] 탐색 결과

계산 순서		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	소모 비용	운용 가용도	품목별 보유가치	시뮬레이션 가용도	비고
$k=1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2170	0.6936	-		
	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2320	0.6957	0.2065		
		3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2470	0.6964	0.1365		
		1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2570	0.6948	0.0839		
		1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2300	0.6951	0.0530		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2270	0.7054	1.7577		
		1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2370	0.7117	1.3518		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2320	0.6942	0.3069		
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2470	0.6943	0.0544		
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	10	2	1	1	3	4	2	1	2	2	1	3670	0.7729	0.5866		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		1	1	1	5	4	2	1	2	2	1	3780	0.7730	0.3426		
		1	1	1	6	4	2	1	2	2	1	3910	0.7738	0.2625		
		1	1	1	3	5	2	1	2	2	1	3620	0.7700	0.4516		
		1	1	1	3	6	2	1	2	2	1	3720	0.7715	0.3386		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	11	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		2	1	1	4	4	2	1	2	2	1	3800	0.7772	0.5004		
		2	1	1	5	4	2	1	2	2	1	3930	0.7793	0.3718		
		2	1	1	6	4	2	1	2	2	1	4060	0.7803	0.2853		
		2	1	1	3	5	2	1	2	2	1	3770	0.7761	0.4862		
		2	1	1	3	6	2	1	2	2	1	3870	0.7778	0.3652		
		2	1	1	3	7	2	1	2	2	1	3970	0.7785	0.2825		
		2	1	1	3	8	2	1	2	2	1	4070	0.7789	0.2253		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	12	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		2	1	1	4	4	2	1	3	2	1	3920	0.7814	0.5178		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	13	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		2	1	1	4	5	2	1	3	2	1	4020	0.7850	0.5488		
		2	1	1	4	6	2	1	3	2	1	4120	0.7869	0.4144		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		2	1	1	4	4	3	1	3	2	1	4320	0.7961	0.5535		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	14	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		2	1	1	6	4	3	1	3	2	1	4580	0.8001	0.2270		
		2	1	1	7	4	3	1	3	2	1	4710	0.8006	0.1732		
		2	1	1	4	5	3	1	3	2	1	4420	0.8004	0.6435	0.8278	단계 3, 4
		2	1	1	4	6	3	1	3	2	1	4520	0.8026	0.4884		
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
$k=2$		2	1	1	4	6	2	1	3	2	1	4120	0.7869	0.4144	0.8169	단계 5, 6
$k=3$		2	1	1	3	7	2	1	2	2	1	3970	0.7785	0.2825	0.8099	단계 5, 6
$k=4$		2	1	1	3	5	2	1	2	2	1	3770	0.7761	0.4862	0.8084	단계 5, 6
$k=5$		2	1	1	3	4	2	1	2	2	1	3670	0.7729	0.5866	0.8061	단계 5, 6
$k=6$		1	1	1	3	5	2	1	2	2	1	3620	0.7700	0.4516	0.8032	단계 5, 6

<표 4> 목표운용가용도가 80%일 때의 탐색 결과

k	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	소모 비용	운용 가용도	품목별 보유가치	시뮬레이션 가용도
1	2	1	1	4	5	3	1	3	2	1	3490	0.8004	0.6435	0.8278
2	2	1	1	4	6	2	1	3	2	1	4120	0.7869	0.4144	0.8169
3	2	1	1	3	6	2	1	2	2	1	3870	0.7778	0.3652	0.8094
4	2	1	1	3	5	2	1	2	2	1	3770	0.7761	0.4862	0.8084
5	1	1	1	3	5	2	1	2	2	1	3620	0.7700	0.4516	0.8032
6	1	1	1	2	5	2	1	2	2	1	3490			0.7967
⑦	**1**	**1**	**1**	**3**	**4**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**3520**			**0.8011**
8	1	1	1	3	5	1	1	2	2	1	3220			0.7865
9	1	1	1	3	5	2	1	1	2	1	3500			0.7961
10	1	1	1	3	5	2	1	2	1	1	3350			0.7935
10	1	1	1	3	5	2	1	2	1	1	3350			0.7935

가 된다. 이 해는 시간이 지나도 장비의 고장률이 일정한 것으로 가정하고 구한 것이기 때문에 실제 상황을 고려한 시뮬레이션으로 운용가용도를 추정하면 0.8278로 이는 예상대로 0.8004보다 더 크게 나왔다. 여기서, 단계 5와 6을 반복 수행해서 $(S_1^5, \cdots, S_{10}^5)$로 $(1,1,1,3,5,2,1,2,2,1)$를 구했다. 이후 좀더 개선된 해를 찾기 위해 [Phase II]를 수행했다.

<표 4>는 [Phase II]까지 진행한 최종결과이다. 일단 [Phase II] 단계를 수행하게 되면 예외 없이 최대 G(구성부품수)회를 탐색해야 하는데, 가용도는 같더라도 비용이 더 작은 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 여기서 5회만 수행하게 된 것은 $S_j^k = 0$가 발생하는 경우는 제외하기 때문이다.

이 예에서는 $k=7$번째 해 $(1,1,1,3,4,2,1,2,2,1)$가 최종해가 된다. 이때의 총구매비용은 3,520, 가용도는 0.8011(80.1%)이다.

이 예에서처럼 [Phase I]만으로, 즉 품목별 보유가치를 기준으로 선택 우선순위를 매기는 방식을 반복 적용해서 최종적으로 구한 해가 가장 좋은 운용가용도를 보여주는 해가 아닐 수 있기 때문에 [Phase II] 탐색절차가 필요하다.

8. 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 모형화된다. 본 논문은 전자의 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 동류전용이 허용되었을 경우에 장비운용가용도를 구할 수 있는 계산식을 유도하였다. 실제로 현장에서는 CSP 부품일수록 동류전용을 해야 더 경제적이다. 또한 운용가용도의 정의가 다를 경우에는 본 논문에서 개발된 방법과는 다른 방법으로 탐색절차를 구해야 할 것이다.

시간이 흐름에 따라 운용가능한 장비의 수가 줄어들게 되는 점을 반영하여 부품 i의 구입량이 S_i 일 때 임의의 t시점까지 누적하여 k개의 부품이 고장날 확률을 정확하게 유도할 수 없기 때문에 실제 상황을 완벽하게 반영하여 각 부품별 소모량을 구할 수 있는 해석적인 방법을 개발하기는 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 각 부품별 고장발생률이 시간에 관계없이 일정하다고 가정하고 휴리스틱 알고리듬으로 구입량을 구하는 방법을 개발한 후 이 결과를 시뮬레이션의 초기해로 사용하여 현실적으로 최적해에 근접하는 해를 찾는 탐색절차를 제시하였다. 이와 같이 해석적인 방법과 시뮬레이션의 결합없이 처음부터 시뮬레이션으로만 최적해를 찾으려고 한다면 많은 시간을 필요로 하게 되지만 제시한 방법을 이용하면 단시간내에 최적해에 근접할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 부품고장이 Poisson process를 따른다고 가정했는데 만일 고장발생이 독립증분(independent increment)과 정상증분(stationary increment)의 성격을 갖는 일반적인 계수과정(counting process)을 따른다면 본 논문에서

제시한 최적해 탐색절차를 적용하여도 되지만 추후 정수이론 등을 이용하면 최적해 탐색절차를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

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, 11 : 7-15, 1996.

[4] 오근태; "자금 제약하에서의 동시조달부품의 최적 구매량 결정", 한국공업경영학회지, 20(41) : 123-134, 1997.

[5] 오근태, 김명수; "운용가용도 제약하에서의 소모성 동시조달부품의 최적구매량 결정", 한국공업경영학회지, 21(48) : 113-122, 1998.

[6] 오근태, 김명수; "운용가용도 제약하에서의 소모성 부품과 수리순환부품이 혼재된 동시조달부품의 최적구매량 결정", 한국공업경영학회지, 23(59) : 53- 67, 2000.

[7] 오근태, 나윤균; "부품재활용이 허용될 때 소모성 동시조달부품의 적정구매량 결정", 한국산업경영시스템학회지, 28(1) : 97-104, 2005.

[8] Daeschner, William E. Jr.; "Models for Multi-item Inventory Systems with Constraints," *Doctoral Dissertation, Naval Postgraduate School*, 1975.

[9] Everett Hugh; "Generalized Lagrange Multiplier for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources," *Operations Research*, 11 : 399- 417, 1963.

[10] Russell, F. R. and Mcmaster, A. W.; "Wholesales Provisioning Models : Model Development," NPS 55-83-026, Naval Postgraduate School, 1983.