IE Interfaces
Vol. 14, No. 3, pp. 286-295, September 2001.

예산제약하에서의 동시조달수리부속의 적정소요 산출†

김영호[1] · 정일교[2] · 전치혁[2]

[1]공군대학교 전쟁모의처/[2]포항공과대학교 산업공학과

Determining the Proper Level of Concurrent Spare Parts under Budget Constraint

Young-Ho Kim[1] · Il-gyo Chong[2] · Chi-Hyuck Jun[2]

This paper addresses the problem of determining the proper level of concurrent spare parts(CSP) for a system consisting of multi-item parts under an available budget constraint. Initial provisioning of spare parts plays a major role in the acquisition of a new equipment system. Therefore, the proper level of spare parts should be on hand to maintain the availability of the system. This paper proposes a new CSP model and solution procedure that determines the proper level of spare parts satisfying the item priority and simultaneously available budget constraint.

1. 서 론

기업 및 군 자원의 효율적 운영측면에서 수명주기 전체기간 동안에 기존의 장비체계가 목표기능을 경제적으로 수행하도록 관리하는 것도 중요하지만 장비체계가 배치되는 초기 기간 동안 장비체계의 목표가용도 유지 및 원활한 임무수행을 위한 적정수준의 수리부속 확보가 필요하다. 특히, 고가의 신규 장비체계 배치시 고장현상이 집중되는 초기 일정기간 동안의 적정 가용도 유지를 위한 수리부속 보급 및 장비체계 배치완료 후 정상적인 재고정책에 의한 재보급과의 연계가 중요한 문제이다. 따라서 초기 일정기간 동안의 예비부속 운영관리를 위한 적합한 문제 해결 방법이 요구되며 이와 같이 신규 장비체계 배치시 장비와 함께 보급되는 예비부속을 동시조달 수리부속 또는 초도 소요 수리부속(concurrent spare part; CSP)이라고 한다. 이 부속은 장비체계 배치 후 초기 일정기간 동안 재보급 없이 장비체계의 주어진 운용 임무를 수행하기 위하여 사용되는 지원 품목이다. 새로운 장비 도입시 함께 보급되는 예비수리부속은 장비체계 운용에 중요한 역할을 한다. 적정수준의 예비부속을 확보할 경우 추후의 재보급 활동으로 원활히 이어질 수 있다. 그러나 적정수준 이상의 예비부속을 확보하는 경우 예비부속의 재고가 필요 이상으로 많아져 경제적 낭비를 초래할 수 있고 부족한 경우는 장비체계 가용도 유지에 심각한 문제를 초래하게 된다. 따라서 장비체계가 주어진 임무를 수행하는 동시에 정상상태를 유지하기 위한 적정수준의 예비부속 확보가 필요하며 최소의 비용으로 장비의 가동률을 극대화함으로써 정비정책 수립에 활용할 수 있도록 하여야 한다.

각 군은 업체가 제시한 CSP 목록과 수량을 조정, 통제 할 수 있는 논리적 근거가 없으므로 단지 규정에 제시된 일정예산 범위에서 업체가 제시한 CSP 목록과 수량을 거의 그대로 인수하여 신규배치 장비를 운용하고 있는 실정이다. 또한 기존의 연구 역시 정비부서의 수리능력이나 부품별 중요도를 고려하고 있지 않기 때문에 실제 소요보다 많은 양의 CSP 소요를 제기하고 있다. 한편, 예산제약이 있는 경우 중요도를 고려한 소요량이 가용예산을 초과하는 경우 어떤 부품의 구매를 축소할 것인지, 가용예산에 미치지 않는 경우 예산을 최대한 활용하기 위하여 어떤 부품을 추가로 구매하여야 할 것인지에 대한 방안이 부재한 실정이다.

본 논문은 2절에서 기존 CSP 소요모델의 개념과 문제점을 3절에서는 문제를 풀기 위한 기본 가정사항을 언급한다. 그리고 4절에서 예비부속의 고장특성 및 수리능력을 고려한 고장분포함수와 수리 및 고장횟수를 제시하며 5, 6절에서는 고장분포함수를 이용하여 각 예비부속별 중요도를 만족시키는 초기 수리부속 소요 결정모형과 해 산정기법, 가용예산 제약에 따른 소요조정방법 및 수치예제를 제시한다. 마지막으로 7절에서는 결론 및 향후 연구방향에 대하여 논한다.

---

† 본 연구는 부분적으로 서울대학교 복잡계통계연구센터를 통한 한국과학재단의 지원에 의하여 수행되었음.

2. 기존 CSP 소요 모델 분석

CSP 소요를 산출하는 대부분의 모형들은 장비를 구성하는 구성품 및 부품의 고장률, 수리율 자료를 근거로 대상품목의 소요를 예측하고 CSP 구매비용이나 장비의 운용 가용도를 척도로 보급소요를 결정하고 있다. 가장 일반적으로 적용되는 Wholesale Provisioning 모형(Richard and McMasters, 1983)은 미 해군에서 개발한 모형으로 재고 부족량 극소화 모형(units short model), 시간가중 재고 부족량 극소화 모형(time weighted units short model), 가용도 모형(availability model)으로 구성되어 있다. 재고 부족량 극소화 모형은 예산 범위 내에서 예상되는 수요와 재고량의 차이, 즉 예상 재고 부족치를 극소화 시키는 모형이고, 시간가중 재고 부족 극소화 모형은 CSP 운용기간 동안 발생되는 재고 부족량 뿐만 아니라 재고 부족량이 지속되는 시간을 동시에 고려하는 모형으로 시간요인을 가중치로 한 재고 부족량의 기대치를 최소화 시키는 조건에서 CSP 수량을 결정한다. 그리고 가용도 모형은 제한된 비용범위 내에서 무기체계의 운용 가용도를 최대화 하는 소요량을 CSP 수량으로 결정하고 있다. 이들 모형의 문제점은 각 예비부속의 고장형태나 정비의 수리능력을 고려하지 않고 CSP 운용기간 동안에 정비가 불가능한 것으로 간주하여 재고량을 결정하는 데에 있다. 즉, 장비배치 초기에는 결합체나 구성품(component) 단위의 교환에 해당하는 정비업무만이 가능하다는 것을 전제로 한 CSP 산출 모형이라고 볼 수 있다. 따라서 장비 운용시 정비업무를 통하여 재사용 될 수 있는 예비부속인 경우 실 소요보다 상당히 많은 재고량을 할당하게 되며, 각 예비부속의 중요도를 고려치 않았기 때문에 중요 예비부속의 재고 부족 또는 중요치 않은 예비부속의 과잉재고를 초래할 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제의 근본적인 해결을 위하여 부품의 고장특성 및 수리능력을 고려한 수리부속 소요 결정모형과 해 산정기법을 제시하며 가용예산 제약에 따른 소요조정을 통해 적정수준의 예비부속 재고수준을 결정한다.

3. 기본 가정사항

고장률은 CSP 대상품목 및 수량 결정시 가장 중요한 요소이다. 일반적으로 고장의 형태는 초기고장, 우발고장 및 마모고장으로 분류되며 고장률의 기본적인 형태는 감소형, 증가형, 그리고 일정형의 3가지가 있다. 감소형은 고장률이 시간이 지남에 따라 감소하는 형태를, 증가형은 점차로 고장률이 상승하는 형태를 보이는 것이다. 한편, 일정형은 많은 구성부분, 부품으로 이루어지는 제품에서 볼 수 있는 전형적인 형태이며 고장률이 시간과 관계없이 일정한 값이 된다. 일반적으로 CSP의 경우 그 대상품목이 부분품(part) 보다는 결합체(assembly)나 구성품(component)으로 이루어져 있기 때문에 고장률을 일정형으로 가정한다. 본 연구에서 사용하는 기본 가정사항은 다음과 같다.

(1) 각각의 품목은 작동, 수리(또는 교체)의 과정을 독립적으로 반복한다.
(2) CSP 운용기간중에는 기 확보된 예비부속만을 사용하며 추가 발주는 없다.
(3) 모든 품목은 부품특성상 수리가능품목과 교체품목으로 나누어진다.
(4) 각 품목의 작동시간, 수리시간 및 교체시간의 확률분포는 다음과 같다.
  ① 품목 i의 작동시간은 평균이 $1/a_i$인 지수분포를 따른다.
  ② 수리가능품목 i의 수리시간은 평균이 $1/b_i$인 지수분포를 따른다.
  ③ 교체품목 i의 교체시간은 d_i로 일정하다.

교체품목은 대상품목의 특성에 따라 부대 및 창에서 교체작업이 이루어지며 수리가능 품목 역시 그 고장형태나 정도에 따라 부대 또는 창에서 수리작업이 이루어진다. 통상적으로 교체품목의 교체시간 및 수리가능품목에 대한 평균 수리기간은 <표 1>과 같은 시간으로 분해할 수 있다. 수리가능 품목의 경우 β는 부대에서 품목이 수리될 확률을 나타낸다.

4. 품목의 가용도 함수 유도

임의의 한 CSP 품목에 대하여 고장까지의 시간(time to failure), 수리시간(또는 교체시간)을 보다 일반적으로 각각 분포함수 F

표 1. 품목별 수리시간 내역

	정비단계	교체시간 또는 평균수리시간
교체품목	부대정비	교체시간 = 해당품목을 교체수리 하는데 소요되는 평균시간
	창정비	교체시간 =해당품목을 교체수리 하는데 소요되는 평균시간 + 부대에서 창으로의 평균 이송시간 + 창에서 부대로의 평균 이송시간
수리가능품목	부대 또는 창	평균수리시간 ={해당품목을 부대에서 수리하는 데 소요되는 평균시간} × β +{부대에서 창으로의 평균 이송시간 + 품목을 창에서 수리하는 데 소요되는 평균시간 + 창에서 부대로의 평균 이송시간} $(1-\beta)$

* β는 부대에서 품목이 수리될 확률

와 G를 갖는 확률변수로 정의할 때 각각의 품목은 작동, 수리(또는 교체)의 과정을 반복한다. 수리 또는 교체작업은 CSP 품목 고장시 즉각적으로 이루어지며 수리 또는 교체작업 후의 상태는 초기 정상상태로 돌아간다고 가정한다. 각각의 고장 및 수리시간을 독립이라고 가정할 때 고장 및 수리가 반복되는 과정은 작동-수리의 재생 사이클을 갖는 Alternating Renewal Process로 표현할 수가 있다(Barlow and Hunter, 1961; Kenichi and Yosimoto, 1994). 따라서 하나의 작동-수리 사이클에 대한 분포함수 H는 분포함수 F와 G의 Convolution 형태로 표현할 수 있으며 다음 식과 같다.

$$H(t) = F * G(t) = \int_0^t G(t-x)\, dF(x) \tag{1}$$

임의의 한 품목에 대해서 시간 t까지의 고장 횟수를 $N(t)$라 하면 이 품목의 예비부속 개수가 n일 때 품목의 가용도 함수 $W(t, n)$는 시간 t까지 고장횟수가 n 보다 작거나 같을 확률이므로 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} W(t, n) &= P\{N(t) \le n\} \\ &= \sum_{k=0}^{n} P[N(t) = k] \\ &= 1 - F(t) + \sum_{k=1}^{n} [F * H^{(k-1)}(t) - F * H^{(k)}(t)] \\ &= 1 - F * H^{(n)}(t) \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에서 $H^{(k)}(t)$는 분포함수 H의 k-fold convolution을 나타내며 $H^{(0)}(t)$는 다음과 같이 정의된다.

$$H^{(0)}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \le 0 \\ 1 & \text{if } t > 0 \end{cases}$$

그리고 함수 $F(t)$에 대한 Laplace-Stieltjes Transform을 $F^*(s)$ 등으로 나타낼 때, 식 (2)의 가용도 함수에 대한 Laplace-Stieltjes Transform은 다음과 같이 표현된다.

$$W^*(s, n) = \int_0^\infty e^{-st} d_t W(t, n) = -F^*(s)[H^*(s)]^n \tag{3}$$

총 k개의 CSP 품목에 대하여 S_1을 수리가능 품목의 집합, S_2를 교체 품목의 집합이라 하자. 수리가능 품목 $i(i \in S_1)$의 경우 고장까지의 시간 및 수리시간의 분포함수가 각각 다음과 같으므로,

$$F_i(t) = 1 - e^{-a_i t} \quad t \ge 0$$
$$G_i(t) = 1 - e^{-b_i t} \quad t \ge 0$$

이에 대응하는 식 (3)을 구하고 이를 역변환하면 가용도 함수는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$W_i(t, n) = \sum_{j=1}^{n+1} \frac{A_{ij} t^{j-1}}{(j-1)!} e^{-a_i t} + \sum_{j=1}^{n} \frac{B_{ij} t^{j-1}}{(j-1)!} e^{-b_i t}, \quad i \in S_1 \tag{4}$$

여기에서

$$A_{ij} = a_i^{j-1} + \sum_{k=1}^{n} (-1)^{n+1-j} \binom{n+k-j}{k-1} \frac{b_i^{k-1} a_i^{n+1}}{(b_i - a_i)^{n+k-j+1}}$$

$$B_{ij} = b_i^{j-1} + \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^{k} \binom{n+k-j+1}{k-1} \frac{a_i^{k-1} b_i^{n+2k-2j}}{(b_i - a_i)^{n+k-j}}$$

교체품목 $i(i \in S_2)$의 경우 F_i는 위와 동일하며 교체시간이 d_i로 일정하다고 하면 G_i가 아래와 같으므로

$$G_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < d_i \\ 1 & \text{if } t \ge d_i \end{cases}$$

역시 식 (3)을 이용하고 역변환하면 가용도함수는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$W_i(t, n) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n+1} \dfrac{a_i^{j-1}(t - nd_i)^{j-1} e^{-a_i(t-nd_i)}}{(j-1)!} & \text{if } nd_i < t \\ 1 & \text{if } nd_i \ge t \end{cases}, \quad i \in S_2 \tag{5}$$

5. 적정 CSP 소요 모델

기본적인 CSP 소요산정의 개념은 각 품목을 독립적으로 간주하여 운용기간 동안에 예상되는 고장발생 횟수에 따라 품목별 중요도를 나타내는 보호수준을 만족시킬 수 있는 최소의 CSP 수량을 결정하는 것이다. 여기서 보호수준 α_i는 품목 i의 특성에 따라 만족하여야 할 최소의 가용도로 부품의 중요도를 반영하는 척도로 사용할 수 있는데, 예를 들어 미군의 품목별 보호수준에 의거 <표 2>와 같이 적용한다.

한편, 전체 품목에 대하여 가용예산 제약(B라고 하자)이 있으므로 이를 만족하여야 한다. 이 가용예산 B는 위에서 언급한 각 품목의 보호수준을 만족하는 수준을 확보하는 총 액수보다는 통상 크게 된다. 적다면 각 품목의 보호수준을 만족시킬 수 없기 때문이다. CSP 조달 및 군의 특성상 가용예산을 최대한 사용하여야 하는 데 이를 위해서는 어떤 품목의 소요를 최소

표 2. 각 품목의 특성을 반영한 보호수준

보호수준	적용 기준
75%	고가이면서 서서히 마모되는 부품에 적용
85%	초도 보급소요 산출시 일반적 부품에 적용
95%	저가의 부품 고장으로 인해 고가의 체계에 대한 정지시간이 길어지는 것을 방지하기 위한 목적으로 적용하며 체계 조립수준이 낮은 수리부속품에 적용
99%	비용이 들더라도 예비부품을 저장해 두고자 하는 매우 긴요한 부품에 적용

수준 이상으로 증가시킬 필요가 있다. 따라서 적정 CSP 소요 산정을 위하여 다음과 같이 각 품목의 가용도 합을 최대로 하는 모델을 제시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{i=1}^{k} W_i(t, n_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{k} c_i n_i \le B, \quad i=1, \cdots, k \\ & W_i(t, n_i) \ge \alpha_i \end{aligned} \tag{6}$$

위에서 c_i는 품목 i의 구매단가를 나타낸다. 한편, (6)의 모형은 비선형계획법의 형태를 가지므로 일반적으로 최적해를 구하기가 거의 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 이의 해결을 위한 휴리스틱을 제안한다. 본 휴리스틱의 아이디어는 우선 품목별 보호수준을 만족시키는 최소 수량을 산정한 후 이의 총 비용이 가용 예산을 넘으면 가능해가 존재하지 않음을 밝히고, 예산을 넘지 않는 경우 품목별 보유가치를 산정하여 보유가치가 높은 품목을 추가 구매토록 하는 과정을 가용예산을 모두 사용할 때까지 반복하는 것이다. 한편, 품목별 최소수량에 대한 총비용이 가용 예산을 넘는 경우에도 보호수준이 엄격하지 않을 때는 가용도에 영향을 작게 미치는 품목의 수량을 최소량 이하로 조정하는 과정을 가용예산이 만족할 때까지 반복한다. 다음에 이의 과정을 보다 자세히 설명코자 한다.

5.1 부품별 보호수준에 따른 최소 CSP 소요 결정

CSP 품목 i에 대한 최소 소요 결정문제는 기간 t가 주어질 때 다음과 같은 최적화 모형으로 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & n_i \\ \text{s.t.} \quad & W_i(t, n_i) \ge \alpha_i \end{aligned} \tag{7}$$

위의 문제는 n_i를 하나씩 증가시키면서 제약식을 만족시키는 최소 수준을 결정함으로써 해결할 수 있다. 이때 산정한 품목 i의 최소 소요를 n_i^0라 하자. 수리가능 품목의 경우는 운용기간 동안 고장이 발생하더라도 부대 또는 창에서 수리능력을 고려하여 운용기간 내에 수리가 이루어진다면 다음 고장시 재사용이 가능하므로 수리횟수 만큼을 기본 재고로 고려할 수가 있다. 결국 실제 구매해야 할 CSP 최소 소요량 s_i^0는 수리가능횟수를 r_i라 할 때 다음과 같이 조정된다.

$$s_i^0 = \begin{cases} n_i^0 - r_i & i \in S_1 \\ n_i^0 & i \in S_2 \end{cases}$$

위에서 r_i는 다음과 같이 기간 t가 주어질 때 이 때까지의 수리횟수의 기대치로 산출할 수 있다(유도과정은 부록에서 설명).

$$r_i = -\frac{a_i b_i}{(a_i+b_i)^2} + \frac{a_i b_i t}{a_i + b_i} + \frac{a_i b_i e^{-(a_i+b_i)t}}{(a_i+b_i)^2} \tag{8}$$

따라서 식 (6)의 최적화모형은 다음과 같이 변한다고 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{i=1}^{k} W_i(t, s_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{k} c_i s_i \le B - \sum_{i \in S_1} c_i^r r_i \\ & s_i \ge s_i^0, \quad i=1, \cdots, k \end{aligned} \tag{9}$$

위에서 s_i는 실제 구매할 CSP 품목 i의 수량이며 다음과 같다.

$$s_i = \begin{cases} n_i - r_i & i \in S_1 \\ n_i & i \in S_2 \end{cases}$$

그리고 수리가능 품목의 경우 운용기간중 수리 가능횟수 만큼의 수량이 CSP 총구매 수량에서는 줄었지만 수리에 드는 비용(c_i^r)이 있으므로 전체비용을 CSP 구매비용과 수리비용의 합으로 표현하여 예산제약이 수정된 것이다.

5.2 예산제약하 CSP 소요조정

이상에서와 같이 구한 최소 CSP 수량에 대한 소요예산이 가용예산보다 적을 경우 CSP 구매량을 증대시켜 가용예산을 최대한 사용하도록 하는 방법이 필요하다. 즉, 예산제약을 만족하면서 전체 보급효과를 최대화 하는 방법으로 품목서열 결정법(이규선, 박상수, 1996)을 이용하여 품목별 보유가치를 구한 후 품목에 대한 최종 수량을 조정한다. 즉, 품목 i의 단가가 c_i이며 n개 보유하고 있을 때 보유가치 $V_i(n)$를 다음과 같이 정의한다.

$$V_i(n) = \frac{P[N_i(t) > n]}{c_i} = \frac{1 - W_i(t, n)}{c_i} \tag{10}$$

식 (10)에서 구한 $V_i(n)$는 i번째 품목에서 n을 넘는 수요가 발생할 확률(품목 i에 의해 시스템이 고장을 일으킬 확률을 의미함)을 품목의 단가로 나눈 값으로 단위비용당 보유 CSP 수량을 초과해 수요가 발생할 확률을 의미하는 것이다. 따라서 이는 비용에 대한 각각의 품목 1개의 보급효과를 나타내므로 품목별로 보유할 가치가 있는가를 나타내는 척도로 사용할 수 있다. 품목 i의 수준이 $s_i (i=1, \cdots, k)$이고 가용예산이 남는 경우에는 각각의 CSP 소요량 s_i+1에 해당하는 $V_i(s_i+1)$가 가장 큰 품목부터 1개씩 수량을 증가시켜 최종적으로 가용예산을 만족하는 CSP 소요수량을 결정할 수 있다.

한편, 식 (6)의 모형에서 보호수준의 제약조건이 유동적이라고 하면(즉, 품목 보유량을 최소량 미만으로 유지함을 허용한다고 할 때) 앞에서 구한 최소 CSP에 대한 소요예산이 가용예산을 초과하는 경우에는 각각의 CSP 소요량 s_i에 해당하는 $V_i(s_i)$가 가장 작은 품목부터 1개씩 수량을 감소시켜 가용예산 범위 내로 소요예산을 접근시킬 수 있다.

5.3 해법 절차

예산제약 조건하에서 각 부품별 중요도를 고려하는 CSP 소요결정 모형을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

Step 1. CSP 대상품목 선정
 Step 1.1 수리가능품목 및 교체 품목 분류
 Step 1.2 각 부품별 특성에 따른 수리장소 분류(부대정비, 창 정비)
 Step 1.3 수리 장소에 따른 수리기간 계산

Step 2. 부품별 보호수준을 고려한 최소 CSP 수량 결정
 Step 2.1 각 부품별 보호수준(중요도)을 만족하는 최소의 CSP 수량(n_i^0) 결정

Step 3. 수리가능횟수 및 수리능력을 고려한 구매량 재계산
 Step 3.1 수리가능 품목의 운용기간 중 수리가능횟수(r_i) 계산
 Step 3.2 수리가능 품목의 실제 구매량(s_i^0) 재계산

Step 4. 가용예산과 소요예산 비교
 Step 4.1 Step 3에서 구한 CSP 구매수량에 따른 총 구매비용과 가용예산 비교
 – 소요예산이 가용예산보다 적다면 Step 4.2.
 – 소요예산이 가용예산보다 크다면 infeasible. (단, 최소구매량 이하를 허용하는 경우는 Step 4.3 진행)
 Step 4.2 소요예산이 가용예산보다 적은 경우 : 각각의 CSP 소요량 s_i+1에 해당하는 V_i가 가장 큰 품목부터 가용예산을 만족할 때까지 1개씩 수량 증가
 Step 4.3 소요예산이 가용예산보다 많은 경우 : 각각의 CSP 소요량 s_i 에 해당하는 V_i 가 작은 품목부터 가용예산을 만족할 때까지 1개씩 수량 감소

Step 5. 가용예산을 만족하는 최종CSP 소요량(s_i) 결정

6. 수치예제

본 논문에서 제시한 CSP 적정소요 산출모형 입력자료는 군의 운영정책 자료와 기존문헌의 CSP 소요산출 입력자료 중 일부를 사용하였다. 적정수준의 CSP 소요산정과 해는 Matlab 5.2와 Excel 2000을 이용하여 구하였다.

6.1 입력자료

입력자료는 CSP품목, 고장률, 수리시간, 정비단계, 부품별 보호수준을 포함 13개 항목으로 이루어져 있으며 <표 3>과 같이 24개의 CSP품목에 대하여 운용시험을 실시하였다. 관련 가정사항으로 총예산 B는 \$165,000, CSP의 운용시간 t는 2080 시간 그리고 교체품목 i의 교체시간 d_i는 1시간으로 동일하게 가정하였다.

6.2 결 과

부품별 보호수준을 만족하는 최소 CSP 수량을 산출하고 수리가능 품목을 고려하여 실제 구매량을 산출한 결과 총소요예산이 가용예산보다 적은 \$150,718로 되었다. 가용예산을 최대한 소비하기 위하여 입력자료를 바탕으로 본 논문에서 제시한 해법절차를 적용한 결과는 <표 4>와 같다. 소요조정 결과 CSP 품목 1, 2, 8, 9, 17, 23 항목은 각 단계별로 CSP 소요가 하나 이상씩 증가하였으며 최종적으로 부품별 중요도 및 가용예산(\$165,000)을 만족하는 CSP 소요를 산출하였다. <표 4>의 가용도는 각각의 품목에 대한 만족수준을 의미한다. 즉, 1번 항목의 경우 CSP로 5개를 보유할 경우 운용기간중 5번 이하로 고장이 발생할 확률이 95%라는 것을 의미한다.

<표 5>는 예산제약에 따른 CSP 소요조정 과정을 보여주는데, 최종 CSP 소요량을 결정하기 위해서 8번의 반복과정을 수행한 것이다. <표 5>의 열은 알고리듬의 각 반복에서 CSP 소요량 s_i와 s_i+1에 해당하는 보유가치 V_i로 구성되고 s_i는 이전 단계의 V_i가 제일 큰 항목의 소요량을 한 개 증가시킨 것이 된다. 예를 들어서 반복 (6)에서 항목 2의 보유가치 V_i가 3.10×10^5으로 가장 큰 값을 가졌기 때문에 반복(7)에서 항목2의 CSP 소요량은 이전 단계보다 한 개가 증가한 4개가 된다. 한편, 반복 (8)의 경우 반복 (7)에서 가장 큰 보유가치를 갖는 항목10의 CSP 소요량을 한 개 증가시켜야 하나 구매예산(\$169,775.6)이 가용예산(\$165,000)을 초과한다. 따라서 반복(7)에서 두 번째로 큰 보유가치를 갖는 항목17의 CSP 소요량을 한 개 증가시켜 가용예산에 최대로 근접하는 최종 CSP 소요를 결정한다.

7. 결 론

본 연구에서는 우선 CSP 각 품목에 대하여 고장 간 시간과 수리시간이 지수분포를, 교체시간은 일정하다는 가정하에 작동-수리(교체) 사이클에 대한 고장분포함수를 도출하였고 이를 이용하여 품목별 중요도를 만족하는 최소의 CSP 소요량을 결정하였다. 각 품목별 중요도를 만족하는 최소의 CSP 소요량과 수리가능품목은 수리되어 재고로 보충된다는 점을 감안하여 전 품목의 단위비용당 보급효과를 나타내는 품목 서열에 의해 가용예산을 만족 시키는 최종 CSP 소요량을 제시하였다.

한편, 본 연구를 현실적으로 보다 더 접근시키기 위해서는 다음과 같은 과제들이 발전되어야 할 것이다. 첫째, CSP 소요결정은 장비를 구성하는 구성품 및 부품의 고장률, 수리율, 운

표 3. 24개 CSP 품목의 입력자료

품목번호	단가	수리비용	작동시간	고장율	수리부호	정비단계	부대수리시간	창수리시간	부대수리확률	수리시간	수리율	보호수준
1	867		750	0.001333	1	부대	30		1	30.00	0.033333	0.85
2	355	35.5	1500	0.000667	0	부대창	25	70	0.85	31.75	0.031496	0.85
3	884		600	0.001667	1	부대	50		1	50.00	0.020000	0.95
4	1789	178.9	3500	0.000286	0	부대창	35	99	0.3	79.80	0.012531	0.75
5	570		850	0.001176	1	부대	30		1	30.00	0.033333	0.95
6	475		450	0.002222	1	부대	45		1	45.00	0.022222	0.99
7	2185		400	0.002500	1	부대	35		1	35.00	0.028571	0.95
8	2500	250	1000	0.001000	0	부대창	40	90	0.8	50.00	0.020000	0.75
9	3400	340	1700	0.000588	0	부대창	50	95	0.85	56.75	0.017621	0.75
10	5500	550	700	0.001429	0	부대창	20	90	0.9	27.00	0.037037	0.85
11	5100		1300	0.000769	1	부대	25		1	25.00	0.040000	0.85
12	4417		1900	0.000526	1	창		90	0	90.00	0.011111	0.95
13	469		600	0.001667	1	부대		85	0	85.00	0.011765	0.95
14	1374		3800	0.000263	1	창		95	0	95.00	0.010526	0.95
15	2664		700	0.001429	1	부대	40		1	40.00	0.025000	0.85
16	8467	846.7	15000	0.000067	0	부대창	40	80	0.6	56.00	0.017857	0.85
17	626	62.6	4000	0.000250	0	부대창	45	110	0.85	54.75	0.018265	0.85
18	1730	173	3800	0.000263	0	부대창	30	80	0.85	37.50	0.026667	0.85
19	2218		7500	0.000133	1	부대	40		1	40.00	0.025000	0.85
20	502		1500	0.000667	1	부대	30		1	30.00	0.033333	0.85
21	3587	358.7	5000	0.000200	0	부대창	20	90	0.6	48.00	0.020833	0.85
22	5277		600	0.001667	1	부대	30		1	30.00	0.033333	0.85
23	3581	358.1	1500	0.000667	0	부대창	35	85	0.5	60.00	0.016667	0.85
24	432		600	0.001667	1	부대	30		1	30.00	0.033333	0.99

주 : 1. 수리부호에서 0은 수리가능품목, 1은 교체품목을 나타냄.
2. 창수리의 경우 이송시간을 포함한 것임.

표 4. 최소 CSP 소요 및 조정된 소요

항 목	수리 부호	중요도 (α_i)	품목별 보호수준에 따른 최소 CSP 소요 결정						예산제약하 CSP 소요조정			
			n_i^0	r_i	s_i^0	가용도[1]	수리 비용	구입 비용	s_i	가용도[2]	수리 비용	구입 비용
1	1	0.85	4	0	4	0.88	0	3468	5	0.95	0	4335
2	0	0.85	3	1	2	0.95	35.5	710	4	1.00	35.5	1420
3	1	0.95	6	0	6	0.97	0	5304	6	0.97	0	5304
4	0	0.75	1	0	1	0.89	0	1789	1	0.89	0	1789
5	1	0.95	5	0	5	0.97	0	2850	5	0.97	0	2850
6	1	0.99	9	0	9	1.00	0	4275	9	1.00	0	4275
7	1	0.95	8	0	8	0.96	0	17480	8	0.96	0	17480
8	0	0.75	3	1	2	0.87	250	5000	4	0.95	250	10000
9	0	0.75	2	1	1	0.89	340	3400	2	0.97	340	6800
10	0	0.85	5	2	3	0.94	1100	16500	3	0.94	1100	16500
11	1	0.85	3	0	3	0.93	0	15300	3	0.93	0	15300
12	1	0.95	3	0	3	0.93	0	13251	3	0.98	0	13251
13	1	0.95	6	0	6	0.98	0	2814	6	0.98	0	2814
14	1	0.95	2	0	2	0.99	0	2748	2	0.99	0	2748
15	1	0.85	4	0	4	0.86	0	10656	4	0.86	0	10656
16	0	0.85	0	0	0	0.87	0	0	0	0.87	0	0
17	0	0.85	1	0	1	0.91	0	626	2	0.99	0	1252
18	0	0.85	1	0	1	0.90	0	1730	1	0.90	0	1730
19	1	0.85	1	0	1	0.97	0	2218	1	0.97	0	2218
20	1	0.85	3	0	3	0.95	0	1506	3	0.95	0	1506
21	0	0.85	1	0	1	0.94	0	3587	1	0.94	0	3587
22	1	0.85	5	0	5	0.89	0	26385	5	0.89	0	26385
23	0	0.85	2	1	1	0.86	358.1	3581	2	0.96	358.1	7162
24	1	0.99	8	0	8	1.00	0	3456	8	1.00	0	3456
비용 합							2,083.6	148,634			2,083.6	162,818
CSP 예산 (구매비용+수리비용)								150,717.6				164,901.6

주: 1. 가용도[1] : $W_i(t,\ n_i^0) \geq \alpha_i$
2. 가용도[2] : $W_i(t,\ s_i + r_i) \geq \alpha_i$

표 5. CSP 소요조정 과정

반복 \ 항목	초기값		(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)		(8)
	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i	V_i	s_i
1	4	5.42	4	5.42	5	1.73	5	1.73	5	1.73	5	1.73	5	1.73	5	1.73	5
2	2	12.96	3	3.10	3	3.10	3	3.10	3	3.10	3	3.10	3	3.10	4	0.59	4
3	6	1.13	6	1.13	6	1.13	6	1.13	6	1.13	6	1.13	6	1.13	6	1.13	6
4	1	1.01	1	1.01	1	1.01	1	1.01	1	1.01	1	1.01	1	1.01	1	1.01	1
5	5	1.40	5	1.40	5	1.40	5	1.40	5	1.40	5	1.40	5	1.40	5	1.40	5
6	9	0.21	9	0.21	9	0.21	9	0.21	9	0.21	9	0.21	9	0.21	9	0.21	9
7	8	0.69	8	0.69	8	0.69	8	0.69	8	0.69	8	0.69	8	0.69	8	0.69	8
8	2	5.24	2	5.24	2	5.24	3	4.44	4	2.20	4	2.20	4	2.20	4	2.20	4
9	1	3.26	1	3.26	1	3.26	1	3.26	1	3.26	1	3.26	2	0.82	2	0.82	2
10	3	2.82	3	2.82	3	2.82	3	2.82	3	2.82	3	2.82	3	2.82	3	2.82	3
11	3	0.39	3	0.39	3	0.39	3	0.39	3	0.39	3	0.39	3	0.39	3	0.39	3
12	3	0.05	3	0.05	3	0.05	3	0.05	3	0.05	3	0.05	3	0.05	3	0.05	3
13	6	0.85	6	0.85	6	0.85	6	0.85	6	0.85	6	0.85	6	0.85	6	0.85	6
14	2	0.07	2	0.07	2	0.07	2	0.07	2	0.07	2	0.07	2	0.07	2	0.07	2
15	4	2.10	4	2.10	4	2.10	4	2.10	4	2.10	4	2.10	4	2.10	4	2.10	4
16	0	0.09	0	0.09	0	0.09	0	0.09	0	0.09	0	0.09	0	0.09	0	0.09	0
17	1	2.24	1	2.24	1	2.24	1	2.24	1	2.24	1	2.24	1	2.24	1	2.24	2
18	1	0.98	1	0.98	1	0.98	1	0.98	1	0.98	1	0.98	1	0.98	1	0.98	1
19	1	0.14	1	0.00	1	0.14	1	0.14	1	0.14	1	0.14	1	0.14	1	0.14	1
20	3	2.19	3	2.19	3	2.19	3	2.19	3	2.19	3	2.19	3	2.19	3	2.19	3
21	1	0.22	1	0.22	1	0.22	1	0.22	1	0.22	1	0.22	1	0.22	1	0.22	1
22	5	0.81	5	0.81	5	0.81	5	0.81	5	0.81	5	0.81	5	0.81	5	0.81	5
23	1	4.05	1	4.05	1	4.05	1	4.05	1	4.05	2	1.14	2	1.14	2	1.14	2
24	8	0.23	8	0.23	8	0.23	8	0.23	8	0.23	8	0.23	8	0.23	8	0.23	8
구매비용	150,717.6		151,072.6		151,939.6		154,439.6		156,939.6		160,520.6		163,920.6		164,275.6		164,901.6

* V_i의 단위 (1×10^5)

용시간 자료를 근거로 대상 품목의 소요를 예측하므로 이들에 대한 보다 정확한 자료가 확보되어야 한다는 것이다. 이를 위해서는 기존 장비/체계의 운용 재원에 대한 철저한 관리 및 전산화가 이루어져야 한다. 둘째, 각 품목의 특성을 고려하여 적절하게 중요도를 부여하여야 한다. 부품의 중요도에 의해 초기 CSP 수량이 결정되는 만큼 단편적인 기준에 의해 모든 품목의 중요도를 부여한다는 것은 합리적이지 못할 수가 있다. 따라서 유사장비 운용경험을 바탕으로 전문가 집단의 의사결정을 이용하는 것이 보다 현실적이고 합리적인 중요도를 부여할 수 있는 좋은 방법이라 생각된다. 셋째, 본 연구에서는 각 부품의 고장 간 시간과 수리시간을 지수분포로 가정하였으나 실제 상황에 적합한 보다 일반적인 분포를 적용하는 연구가 있어야 할 것이다. 또한 수리품목의 경우 수리에 따른 성능저하 역시 차후 연구에 고려되어야 할 것이다.

결론적으로 합리적이고 과학적인 CSP 대상품목 및 수량 결정방법을 발전시켜 경제적 군 운영에 기여할 필요가 있으며, 이를 이용하여 무기체계 개발자료, 유사장비 운영자료 및 무기체계 공급업체에 제시할 수 있는 자료로써 활용할 수 있어야 하겠다.

참고문헌

김종수, 허선, 신규철 (1998), 중앙창 재고를 가진 수리가능시스템의 최적해법, *대한산업공학회지*, 24(3), 387-396.

이규선, 박상수 (1996), *CSP 적정소요 산출방법 연구*, 육군사관학교 화랑대 연구소.

이성백, 우제웅 (1995), 동시조달 수리부속 적정소요 산출모형 개발, *국방논집*, 30, 52-79.

Barlow, R. E. and Hunter, L. C. (1961), *Reliability analysis of a one-unit system*, Operations Research, 9(2), 200-208.

Kaplan, A. and Orr, D. (1985), *An optimal multiechelon repair policy and stockage model*, Naval Research Logistics, 32, 551-566.

Kenichi, Funaki and Yosimoto, Kazuho (1994), Distribution of total uptime during a given time interval, *IEEE Transaction on Reliability*, 43(3), 489-492.

Richard, F. R. and McMasters, A. W. (1983), Wholesale Provisioning Models, NPS 55-83-026, Naval Postgraduate School.

부록(수리횟수의 기대치)

초기 각 부품이 작동상태에서 시작한다고 볼 때, 다음과 같은 과정에 의해서 수리횟수의 기대치를 산출할 수 있다. 우선, 수리횟수의 기대치를 산출하기 위해서 각 부품의 상태가 작동중일 때는 '1', 수리 및 교체작업 중일 때는 '0'으로 표시하고 다음과 같이 기호를 정의한다. 본 부록에서는 본문에서 사용하던 품목을 나타내는 첨자 i를 편의상 생략한다.

$N_{ij}(t)$: 부품이 초기상태 i에서 출발하여 t시간동안 상태 j를 방문한 횟수($i,\ j=0,1$)

$M_{ij}(t)=E[N_{ij}(t)]$: $N_{ij}(t)$의 기대값

CSP 운용기간중 어느 시점 t의 수리횟수 기대치는 t시점까지의 작동상태를 방문한 횟수의 기대치와 같고 Renewal Equation에 의해 식 (A1)과 같이 표현된다.

$$M_{11}(t)=\int_0^t M_{01}(t-x)\,dF(x) \tag{A1}$$

작동과 수리에 대한 분포함수를 알고있을 경우, Laplace-Stieltjes Transform에 의해서 수리횟수의 기대치 $M_{11}(t)$를 구할 수 있다. 식 (A2)는 식 (A1)에 Laplace-Stieltjes Transform을 적용한 결과이고 식 (A3)과 같이 간단하게 변환된다.

$$M_{11}^*(s)=M_{01}^*(s)F^*(s) \tag{A2}$$

$$M_{11}^*(s)=\frac{F^*(s)G^*(s)}{1-F^*(s)G^*(s)} \tag{A3}$$

만약, 수리가능품목의 작동시간이 평균 $1/a$인 지수분포를 따르고 수리시간이 평균 $1/b$인 지수분포를 따른다면, 수리가능품목에 대한 분포함수와 Laplace-Stieltjes Transform은 각각 식 (A4), (A5)와 같다.

$$F(t)=1-e^{-at} \text{ and } G(t)=1-e^{-bt} \tag{A4}$$

$$F^*(s)=\frac{a}{s+a} \text{ and } G^*(s)=\frac{b}{s+b} \tag{A5}$$

운용기간중 수리횟수의 기대치는 식 (A5)를 식 (A3)에 대입하고 역 변환함으로써 식 (A6) 같이 구한다.

$$M_{11}(t)=-\frac{ab}{(a+b)^2}+\frac{abt}{a+b}+\frac{abe^{-(a+b)t}}{(a+b)^2} \tag{A6}$$

김 영 호
공군사관학교 기계공학과 학사
포항공과대학교 산업공학과 석사
현재: 공군대학 전쟁모의처 워게임 교관
관심분야: 확률모형, Modeling & Simulation (Wargaming 분야), 신뢰성공학

전 치 혁
서울대학교 자원공학 학사
한국과학기술원 산업공학 석사
U.C. Berkeley 산업공학 박사
현재: 포항공과대학교 산업공학과 주임교수
관심분야: 응용통계 및 신뢰성공학, 확률모형

정 일 교
포항공과대학교 산업공학과 학사
포항공과대학교 산업공학과 석사
현재: 포항공과대학교 산업공학과 박사과정
관심분야: 6시그마, 데이터마이닝, 신뢰성공학