

예산 제약에 따른 최적 부품구매수량 결정모델

홍인섭, 정석재, 김경섭

연세대학교 정보산업공학과 inseob_hong@hotmail.com

Abstract

The purpose of this study is finding a solution to optimal quantities of concurrent spare parts(CSP) which are acquired for using considerably long time. To solve the problem, this paper proposes a new CSP model which can be used in permitting backorder flexibly. Through the simple experiment, we validate the mathematical model which is suggested in this paper. Also, we determine the purchasing quantities of each item minimizing total system costs under an available budget constraints.

1. 서론

기업이나 군에서는 고가의 장비나 무기체계를 구입하면서 동시에 그 장비를 일정기간동안 수리하면서 운영할 수 있도록 수리부속품을 동시에 구입을 하게 된다. 특히 군에서는 대부분의 무기체계를 해외에서 도입하게 됨으로써 무기체계 도입 후 일정기간동안 재보충 없이 운영할 수 있도록 해당 부속품을 주장비 구입비의 일정비율만큼 일괄 구매하게 되는데 이를 동시 조달수리부속 또는 초도소요수리부속(concurrent spare part ; CSP)이라고 한다.

본 논문에서는 장기간 운영을 계획으로 고가의 장비를 구입할 때 이에 따르는 수리부속품목의 적정 소요량을 구하는 것으로써 기업에서 투자환경의 변화나 군의 국방예산의 삭감 등으로 인하여 투자예산이 제약될 때 각 부품의 구매가 전체 시스템에 미치는 영향을 고려하여 최적의 CSP 구매량을 결정하는 모형을 제시하고자 한다.

2. 연구방법론

본 논문에서는 전체 시스템의 비용을 최소화 시키는 최적의 CSP 구매량을 구하려고 하므로 주어진 예산내에서 구매비용과 별과비용의 합을 최소화시키는 수리모형을 개발하였다. 기본적으로 구매비용과 별과비용은 Trade-off 관계에 있으며, 별과비용은 각 품목이 시스템에 미치는 영향과 운용기간 기대재고 부족량과의 곱으로써 나타내지는 정성적인 개념이므로 본 논문의 별과비용은 전체시스템에 미치는 효과를 분석하는데 사용되었다.

본 연구는 기존의 기대재고부족량모형(Wholesale Provisioning Models : Richards, F. Russell, et al, 1983)에서 다루지 못했던 부족한 예산하에서 최적의 CSP 부품의 구매량을 결정하는 방법을 제시하였고,

Vari-METRIC(Craig C . Sherbrooke : 1986)의 소요량 계산방법을 응용하여 기대재고부족량으로 인해 발생하는 별과비용을 품목별 보호수준을 적용한 별과율계수를 도입하여 전체시스템 비용으로 계산하였다. 이는 점에서 의의가 있다고 하겠다. 또한 각 품목별 구매비용에 대한 일정한 비율내에서 별과비용 발생을 제약시킴으로서 부족한 예산내에서 부품구매시 시스템 비용에 영향력이 큰 일부품목에만 구매수량 변화가 편중되는 것을 방지하였다.

본 논문에서 궁극적으로 구하고자 하는 것은 최대의 기대소요량 내에서 예산의 제약으로 인해 부득이하게 backorder를 발생시킬 수밖에 없는 상황에서 최적의 구매수량을 결정하는 방법을 찾는 것이기 때문에, 각 품목이 전체 시스템에 미치는 영향을 조소별로 곱하고 여기에 실험적 방법으로 얻은 가중치계수를 곱하여 해를 구하였다.

3. 수리모형

최적의 CSP량을 산출하기 위한 수리모형에 앞서 다음사항을 가정한다.

- 1) 부품고장의 발생은 Poisson process를 따른다.
- 2) 각각의 품목의 고장발생은 상호 독립적이며, 부품을 교체하거나 수리하는 동안에는 고장이 발생하지 않는다
- 3) 예비부품운용기간 동안은 부품을 재보급하지 못한다.
- 4) 장비는 CSP기간 초에 동시에 전체가 도입된다.
- 5) 부품별 보호수준은 군에서 운영하는 장비에 적용하는 계수를 이용한다.

<표1> 각 품목의 특성을 반영한 보호수준

보호수준	적용기준
0.99	비용이 들더라도 예비부품을 저장해 두어야 하는 매우 중요한 부품에 적용
0.95	저가의 부품고장으로 인해 고가의 체계에 대한 정지시간이 길어지는 것을 방지하기 위한 목적으로 적용하며 체계의 조립수준이 낮은 수리부속품에 적용
0.85	초도 보급소요 산출시 일반적 부품에 적용
0.75	고가이면서 서서히 마모되는 부품에 적용

본 논문에서 사용될 기호는 다음과 같다.

- i : 품목색인
- G_i : 구매단가
- s_i : 구매수량
- x_i : 기대소요량
- K : 장티대수
- B : 구매예산
- τ_i : 보호수준
- k : 별과비용계수
- α : 허용한계계수
- d_i : 운용기간
- t_i : 창수리시간
- λ_i : 고장율
- r_i : 수리율
- R_i : 부대수리시간
- T_i : 연간작동시간
- h_i : i 번째 품목의 연간 고장횟수
- $E[B(S_0)_i]$: depot에서 backorder될 확률
- b : 분배센터(비행기지)

각 품목의 기대소요량은 Vari-METRIC(Craig C. Sherbrooke : 1986)에서 소개된 수식을 이용하여 아래와 같이 정의하였다.

$$x_i = E(h_i) = \lambda_i [(1-r_i)t_i + r_i R_i] d_i T_i + \lambda_i (1-r_i) / \sum_{j=1}^b \lambda_j (1-r_j) \cdot E[B(S_0)_j] \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

where $f_i = \lambda_i (1-r_i) / \sum_{j=1}^b \lambda_j (1-r_j)$
: depot에서의 재보급율

①식의 앞부분은 각 Base에서 부품의 고장발생과 수리능력을 고려한 소요량을 나타내는 것이고, 뒷부분은 depot에서의 재보급율과 depot에서의 backorder 확률의 곱으로서 depot에서 발생하는 소요량이다.

본 연구에서는 depot에서의 부품의 공급은 무한정 이루어지는 것으로 가정하였으므로 depot의 backorder 확률은 0으로 간주한다.

각 품목의 연간 고장횟수 h_i 는 $\lambda_i T_i$ 이고, 부품의 고장은 poisson process를 따르므로 고장밀도함수 $f(h_i)$ 는 다음과 같다.

$$f(h_i) = \frac{(\lambda_i T_i)^{h_i} e^{-\lambda_i T_i}}{h_i!} \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

각 품목에 발생하는 기대재고 부족량 y_i 는 $y_i = \begin{cases} x_i - s_i, & x_i > s_i \\ 0, & otherwise \end{cases}$ 이므로,

각 품목별 연간기대재고부족량 $E(B_i)$ 는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$E(B_i) = \sum_{x_i > s_i}^n (x_i - s_i) \cdot p_i(h_i) \cdot \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

따라서, 전체 운용기간 중 기대재고부족량 $E(TB_i)$ 은 $d_i \times E(B_i)$ 로 나타낼 수 있다.

본 수리모형에서 비용으로 계산하고자하는 별과비용은 품목별로 주어진 보호수준을 고려하여, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{별과비용} = \sum_{i=1}^n E(B_i) \cdot d_i \cdot \tau_i$$

결론적으로 시스템비용은 구매비용과 별과비용의 합이므로 아래와 같이 정의한다.

$$\text{Min TC} = \sum_{i=1}^n c_i s_i + \sum_{i=1}^n E(B_i) \cdot d_i \cdot \tau_i$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^n c_i s_i \leq B$$

$$k \tau_i E(B_i) \leq \alpha c_i s_i$$

$$1 \leq s_i \leq x_i, \quad s_i: \text{정수}$$

위 식의 제약조건에서 별과비용발생을 개별품목의 총 구매금액의 일정비율 이내로 제한한 것은 시스템 비용에 영향력이 큰 일부품목에만 구매수량 변화가 편중되는 것을 방지하기 위함이다.

위 목적식 TC는 ①,②,③식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{TC} &= \sum_{i=1}^n c_i s_i + \sum_{i=1}^n \left(\sum_{x_i > s_i}^n (x_i - s_i) \times p_i(h_i) \right) \\ &= \sum_{i=1}^n c_i s_i + \sum_{i=1}^n \left(K \sum_{x_i > s_i}^n k (\lambda_i [(1-r_i)t_i + r_i R_i] d_i T_i - s_i) \right. \\ &\quad \left. \times \frac{(\lambda_i T_i)^{h_i} e^{-\lambda_i T_i}}{h_i!} \right) \end{aligned}$$

위 식은 다수의 제약조건을 갖는 LP-hard 문제이면서 별과율계수와 별과허용한계 계수에 직접적인 영향을 받는 문제로써, 전체시스템 비용이 주어진 예산한도내에서 최대가 되는 최소의 TC를 갖는 개별품목 구매수량 조합을 찾는 것이다.

4. 실험결과

본 연구에서는 최종해를 찾기 위해서 반복적인 실험을 통해서 구한 최적의 계수값을 적용하여 휴리스틱 방법으로 해를 구하였다.

실험에 사용된 계수는 $\alpha=0.15$, $k=100$ 으로 하였다.

입력변수는 군에서 사용 중인 항공기의 수리부속품을 대상으로 하여 군의 운영정책 자료와 기존문헌의 CSP 소요산출 입력자료 중 일부를 임의로 24품목 선정하였다.

본 연구의 수리모형을 계산하기 위한 Tool로서는 solver를 사용하였다.

<표2> 입력변수값

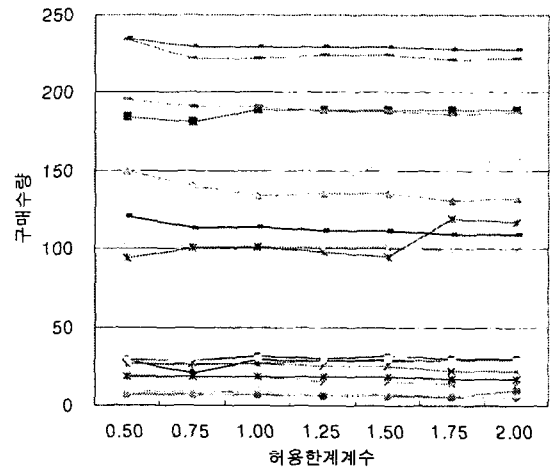
품목 번호	단가 (\$)	장비 대수	보호 수준	운용 기간	연간 작동 시간	고장율	수리율	부대 수리 시간	창 수리 시간
1	867	100	0.75	3	750	0.001333	0.99	30	10
2	478	100	0.75	3	1,500	0.000667	0.85	25	70
3	884	100	0.99	1	600	0.001667	0.99	50	10
4	1,789	100	0.85	1	1500	0.000286	0.30	35	99
5	1,570	100	0.99	2	850	0.001176	0.99	30	10
6	870	100	0.75	3	450	0.002222	0.99	45	10
7	2,185	100	0.99	3	390	0.002500	0.99	35	10
8	2,500	100	0.99	2	890	0.001000	0.80	40	90
9	2,700	100	0.99	3	1,700	0.000588	0.85	50	95
10	1,980	100	0.99	2	700	0.001429	0.90	20	90
11	1,400	100	0.75	3	1,300	0.000769	0.99	25	10
12	2,650	100	0.99	2	1,900	0.000526	0.10	90	90
13	1,469	100	0.99	2	600	0.001667	0.10	90	85
14	1,374	100	0.99	2	2,400	0.000263	0.10	90	95
15	2,664	100	0.75	1	700	0.001429	1.00	40	10
16	3,020	100	0.75	1	1,500	0.000673	0.60	40	80
17	626	100	0.99	3	3,300	0.000250	0.85	45	110
18	1,730	100	0.85	3	3,800	0.000263	0.85	30	80
19	2,217	100	0.99	1	2,500	0.000133	0.90	40	10
20	780	100	0.99	1	1,500	0.000667	0.99	30	10
21	3,587	100	0.85	3	4,700	0.000200	0.60	20	95
22	2,700	100	0.75	3	600	0.001667	0.99	30	10
23	3,581	100	0.75	2	1,500	0.000667	0.50	35	80
24	1,580	100	0.75	1	600	0.001667	0.90	30	10

최적해를 구하기에 앞서 본 연구의 수리모형에서 도입한 벌과비용계수와 허용한계계수의 타당성을 검토하기 위하여 각 계수값에 따른 전체 구매패턴의 변화를 알아보려고 민감도분석을 실시하였다.

각각의 계수의 변화가 수리모형내에서 미치는 영향이 크다면, 본 연구에서 제시한 수리모형이 벌과비용계수 및 허용한계계수에 영향을 받아 상황별로 구매수량의 변화도 크게 일어날 것으로 가정하였다.

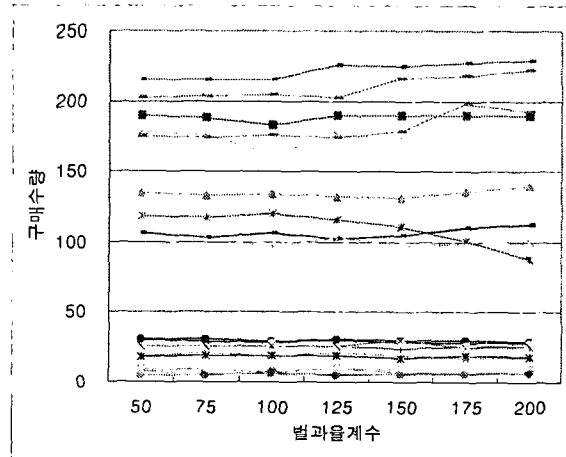
표3, 4의 각 실험은 예산을 3.75만\$로 고정하고 허용한계계수 및 벌과비용계수를 각각 조정해가면서 실시한 결과이다.

<표3> α (허용한계계수)에 따른 구매수량
[$k=100$, 예산 : 3.75만\$]



실험결과 허용한계를 넘어서지 않는 벌과비용값을 갖는 계수값의 범위는 0.75이상에서 존재하였다. 또한, 계수값이 1.75이상에서는 벌과비용 허용한계값이 과다하게 반영되어 일부품목의 예측치에 왜곡된 값을 갖게 하는 경향이 있다. 그러나 전체적으로 계수값의 변화가 개별구매수량의 변화에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

<표4> k (벌과비용 계수)에 따른 구매수량
[$\alpha=0.15$, 예산:3.75만\$]



계수값 k 에 따른 구매수량 변화를 확인해본 결과 전체품목에서 수량 변화가 인지되었으나, 중간값($k=125$)를 기준으로 구매수량의 변화율이 5%이내 존재하므로 전체적으로 계수값의 변화가 전체 구매량의 변화에 크게 영향을 미친다고는 볼 수 없다. 즉, 예산별 구매수량 결정모형에서 각각의 계수값의 변화는 전체 구매수량의 변화에 크게 영향을 미치지 않음이 확인이 되었다. 따라서, 본 연구는 계수값을 각각 $\alpha = 0.15$, $k = 100$ 로 하여 예산별 최적의 구매수량을 다음과 같이 구하였다.

<표5> 예산별 구매수량

품목 번호	예산별 구매수량 (단위:만\$)					
	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3
1	29	27	30	30	26	26
2	184	182	174	173	173	173
3	9	8	10	10	8	8
4	18	14	22	17	15	14
5	20	15	20	17	15	15
6	31	29	30	27	26	26
7	28	24	27	23	23	23
8	131	117	101	94	93	93
9	228	221	203	193	191	191
10	158	147	128	120	117	117
11	28	24	30	24	24	24
12	151	144	125	117	115	115
13	177	174	178	174	273	112
14	110	103	96	91	90	90
15	9	5	8	6	5	5
16	63	54	47	36	31	28
17	221	218	215	213	213	213
18	216	214	192	165	163	163
19	9	8	9	6	6	6
20	10	8	10	9	8	8
21	166	156	131	119	117	116
22	29	24	29	30	22	22
23	119	120	119	116	69	65
24	10	8	8	7	5	5

5. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 각 품목의 보호수준을 별과비용의 가중치로 계산하였으며, 실험결과 예산에 따른 구매량의 변화는 단지 부품의 보호수준이나 단가, 고장을 등 어느 한가지 요소에만 영향을 받는 것이 아니라 부품 전체의 리스트 내에서 여러 가지 요소들에 복합적으로 영향을 받는다는 것을 알게 되었다.

결론적으로 본 연구에서 구한 새로운 CSP산출 수리모형은 별과비용을 기대재고부족량과 보호수준, 별과계수로서 전체 시스템내에서 정성적으로 계산하여 부족한 예산하에서 부득이하게 backorder를 발생시킬 수밖에 없는 상황에서의 최적 구매수량을 계산하였고, 따라서 변동적인 예산하에서 최적의 CSP 구매 의사결정모형을 제시하였다.

향후 정확한 예측을 위하여 실제 소요량 데이터와의 비교를 통해서 가장 최적의 별과율 계수 및 허용한계 계수를 찾아내어 적용하여야겠다.

참고문헌

[1] 김영호,정일교,전치혁(2001), 예산제약하에서의 동시조달수리부속의 적정소요 대한산업공학회지, 제14권 3호, 286~295.

[2] 오근태, 나윤관(2001), 운용가용도 제약하에서의 소모성 예비부품의 구매량 결정을 위한 해법, 한국시물레이션학회 논문지, 제10권 제3호,83~94

[3] 오근태, 김명수(2000) 운용가용도 제약하에서 소모성부품과 수리순환부품이 혼재된 동시조달부품의 최적구매량 결정, 산업경영시스템학회지, 제23권 제59집, 53~67

[4] 김종수, 허선, 신규철(1998) 중앙창 재고를 가진 수리가능시스템의 최적해법, 대한산업공학회지, 제24권, 제3호, 387~396

[5] A.Sleptchenko et al, Using repair priorities to reduce stock investment in spare part networks, *European Journal of Operational Research*(2004)

[6] V.Daniel R.Guide Jr. et al Repairable inventory theory : Models and applications, *European Journal of Operational Research* 102(1997)1-20

[7] Richards, F. Russell, and McMasters, Alan W., "Wholesale Provisioning Models : Model Development," Naval Postgraduate School, 1983.

[8] Craig C. Sherbrooke, Vari-METRIC : Improved Approximations for multi-Indenture, Multi-Echelon Availability Models, *Operations Research*, Vol. 34, No.2(Mar.-Apr.,1986),311-319

[9] Craig C. Sherbrooke, METRIC : A Multi-Echelon Techinque for Recoverable Item Control, *Opertions Research*, Vol. 16(1968), 122~144