

시물레이션과 다중 회귀모형을 이용한 동시조달수리부속 최적화

김경록¹ · 용화영¹ · 권기상^{1*}

Optimization for Concurrent Spare Part with Simulation and Multiple Regression

Kim Kyungrok · Yong Hwayoung · Kwon Kisang

ABSTRACT

Recently, the study in efficient operation, maintenance, and equipment-design have been growing rapidly in military industry to meet the required missions. Through out these studies, the importance of Concurrent Spare Parts(CSP) are emphasized. The CSP, which is critical to the operation and maintenance to enhance the availability, is offered together when a equipment is delivered. Despite its significance, th responsibility for determining the range and depth of CSP are done from administrative decision rather than engineering analysis. The purpose of the paper is to optimize the number of CSP per item using simulation and multiple regression. First, the result, as the change of operational availability, was gained from changing the number of change in simulation model. Second, mathematical regression was computed from the input and output data, and the number of CSP was optimized by multiple regression and linear programming; the constraint condition is the cost for optimization. The advantage of this study is to respond with the transition of constraint condition quickly. The cost per item is consistently altered in the development state of equipment. The speed of analysis, that simulation method is continuously performed whenever constraint condition is repeatedly altered, would be down. Therefore, this study is suitable for real development environment. In the future, the study based on the above concept improves the accuracy of optimization by the technical progress of multiple regression.

Key words : CSP(Concurrent Spare Part), Simulation, Multiple Regression

요 약

최근 방위 산업에는 장비가 군에서 요구한 임무를 완수하기 위해 장비 설계, 운용, 그리고 정비 측면에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중 동시조달수리부속은 장비가 군에 납품될 때 함께 들어가는 수리부속으로써, 이것을 분석하는 것은 장비의 운용가용도를 높이는데 가장 중요한 부분 중 하나이다. 그러나 이렇게 중요한 동시조달수리부속이지만 현실적 개발 환경을 고려한 공학적 분석 방법 발전 보다는 정책적인 방법으로 해결해 나가고 있는 실정이다. 그래서 본 연구에서는 동시조달수리부속 최적화를 위해 시물레이션과 다중 회귀모형 기법을 활용한 공학적 분석을 연구하였다. 먼저, 시물레이션 기법을 이용하여 가상으로 운용해보면서 정의된 보급 및 정비체계를 분석하고 이를 통해 품목별 동시조달수리부속의 수량을 변화에 따른 운용가용도의 변화 추이를 결과 자료로 산출하였다. 이렇게 얻은 입출력 자료를 통해 수리적 다중 회귀모형을 도출 후 선형계획법을 사용하여 동시조달수리부속 최적화를 하였다. 이때 최적화는 단가 제약을 두었다. 이 방법의 가장 큰 장점은 최적화 선정 시 기준이 되는 제약조건의 변화에 빠르게 대응할 수 있다. 장비의 개발 단계에서는 품목별 단가는 지속적으로 바뀌기 마련이다. 이런 환경에서 제약조건이 바뀔 때 마다 시물레이션 분석을 재 수행하면 분석 속도가 늦어질 수밖에 없다. 그러므로 본 방법은 실제 개발 환경에 적합한 것이라 할 수 있다. 향후 이런 기본 개념을 바탕으로 시물레이션 모델링을 정밀화하고, 회귀모형의 정확성을 높여 연구의 완성도를 높일 것이다.

주요어 : 동시조달수리부속, 시물레이션, 다중 회귀모형

접수일(2012년 8월 2일), 심사일(1차 : 2012년 9월 13일),
게재 확정일(2012년 9월 27일)

¹⁾ LIG 빅스원

주 저 자 : 김경록

교신저자 : 권기상

E-mail; kyungrok.kim@lignex1.com

1. 서 론

현재 국방 산업에서는 제한된 예산 내에서 최대 운용 임무를 수행하기 위해 다양한 측면에서 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 것 중 하나가 바로 동시조달수리부속(CSP, Concurrent Spare Part) 분석이다.

동시조달수리부속은 초기 일정기간(3년) 동안 재보급 없이 완제품에 주어진 운용 임무를 수행하기 위해 필요한 필수요소 수리부속품이다. 이것은 과소 책정하면 주요품목의 재고 부족으로 완제품 운용의 심각한 악영향을 미치게 되며, 반대로 과다 책정하면 재고 초과로 예산 낭비를 초래하게 된다. 따라서 가용 예산 범위 내에서 완제품의 운용 임무를 보장하고 효율적이고 원활한 운용 및 유지를 위해서 적정 수준의 동시조달수리부속 산출이 필요하다^[10]. 이렇게 중요한 동시조달수리부속은 현재 품목 선정의 정확성이 주요 이슈화되고 있지만, 분석 기술의 향상 보다는 Pay Back 제도와 같이 정책적으로 보완을 하고 있는 실정이다. 참고로, Pay Back 제도란 실제 수요 이상의 동시조달수리부속 품목은 일정 기간 이후 납품 업체에 다시 되팔아 환불 받는 방식이다. 그리고 동시조달수리부속 분석은 항시 제한된 예산과 품목별 단가를 기준으로 분석이 이루어지기 마련인데, 이 비용은 개발 기간 동안 매번 일정하기 보다는 사업 특성, 사업 시기 혹은 설계 변경에 따라 지속적으로 변화하기 때문에 이러한 실제 환경에 맞는 분석 기법을 도출하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 제한된 예산 범위 내에서 완제품의 최대 운용가용도를 이끌어 낼 수 있는 품목별 동시조달수리부속 최적 수량을 도출하였고, 이를 위해 시뮬레이션과 다중 회귀모형 방법을 사용하였다. 시뮬레이션은 실제로 구현하기 어려운 시스템 등을 가상으로 구현하여 필요 자료를 산출하는 것으로, 이 논문에서 시스템은 다양한 콘솔로 이루어진 장비의 운영 및 정비 체계로 정의한다. 이러한 장비 운영과 정비 개념을 함께 고려하려면, 일반적인 수리적 계산에 의한 분석으로는 고려하기 힘든 요소들이 많다. 그중 대표적인 것이 보급 및 정비절차와 같은 정성적 요인들이라 할 수 있다. 이렇게 정량적 자료와 정성적 자료들이 서로 서로 관계하여 복잡하게 구현된 시스템을 분석하는 방법으로는 시뮬레이션이 적합하다. 그러나 시스템 최적화를 하기 위해 시뮬레이션 모델을 직접적으로 이용하면 많은 횡수의 모델 실행이 필요하다. 최적화를 위한 보다 효과적인 방법은 체계적인 실험계획에 의거하여 시뮬레이션 모델의 실행 횡수를 줄이고, 그 실행 결과를 이용하여 회귀모형을 생성하는 것이다. 회귀모형의

장점은 시스템 최적화를 위해 반복적으로 시뮬레이션 모델을 실행할 필요 없이 빈번히 변화하는 전체 예산 및 품목별 단가 기준 등에 보다 빠르게 대응하여 효율적인 분석이 가능하다는 것이다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 동시조달수리부속 최적화에 관한 최근 연구 동향에 대해 알아보고, 3장에서는 전체 연구 절차, 4장에서는 전체 내용 이해를 위해 필요한 기초 연구를 설명했다. 5장에서는 예제 데이터를 바탕으로 사례 연구를 함으로써 본 연구의 이해와 적합성을 높였고 결론으로 마무리하였다.

2. 최근 연구 동향

최근 동시조달수리부속 최적화를 다룬 연구들은 기존 수리적인 계산 산출 연구에서 현실성을 높일 수 있게 정량적, 정성적 자료를 고려한 시뮬레이션 기법으로 동시조달수리부속 품목 별 수량을 최적화하려는 접근으로 변화되고 있는 시점이다. 가장 주된 이유는 현실성 있게 고려해야 하는 사항은 증대되고 있으나 수리적 계산에 의한 산출에는 그것을 모두 고려하여 분석하기에는 한계가 있다고 인식하기 때문이다. 아래는 최근 연구 동향에 대해 설명하였다.

박병철(2008)등은 시뮬레이션 기법을 이용하여 동시조달수리부속 적정 재고량을 결정하였다^[3]. 기존 수리적 계산이 아닌 시뮬레이션을 활용하여 좀 더 복잡한 모델을 구현하여 산출할 수 있는 방법을 구현하였으며, 특정 부품의 고장이 항상 완제품의 완전 운영 중지를 의미하지 않는다는 요인을 고려한 것은 이 연구의 특징으로 보인다. 그러나 부품별 단가 및 전체 예산 제약을 고려하지 않아 실제 분석 환경에 적용하기에는 다소 거리감이 있다.

정일한(2008)등은 가용도 제약하에 다 계층 다 계단(MIME, Multi Indenture Multi Echelon) 시스템에서 시뮬레이션 모델을 바탕으로 다양한 분야에 적용이 용이한 유전자알고리즘을 이용하여 수리부속을 최적화하였다^[8]. 기존 시뮬레이션을 이용하여 보급 및 정비 체계를 분석하는 모델링에 비해 많은 입력 자료를 고려하여 높은 완성도를 가진다. 그러나 동시조달수리부속이 아닌 수리부속을 결정하는 것이라 시뮬레이션 모델링 구현 시, AS기간 등 동시조달수리부속 최적화를 위해 고려해야 할 사항이 다소 부족하며, 유전자알고리즘이 메타휴리스틱이기는 하지만, 최적화를 위해 반복하는 과정 안에 시뮬레이션 실험이 매번 수행되기 때문에 빠르게 도출되기는 힘들다.

나인성(2006)등은 기존 동시조달수리부속 소요 산출 방법에서 한국군의 운용개념에 맞도록 다단계 보급 및 정비체계, 정비능력 및 보급형태, 정비업무 후 재사용 가능 등을 추가 고려하여 예산 제약 하에서 운용가용도를 고려한 최적 동시조달수리부속품 산출 모델을 연구하였다²⁾. 기존 연구에 현실 환경을 고려한 주요 요소를 추가한 것은 보다 완성도 높은 연구라 할 수 있다. 그렇지만 고려 요소들이 늘어날수록 각각의 요소들이 운용가용도에 미치는 영향은 독립적인 영향과 상호관계에서 오는 영향을 함께 고려되어야 하는데 여기서 사용한 수리적 계산에 의한 접근은 이런 고려 요소들이 늘어날수록 한계를 보일 것이다.

오근태(2005)등은 동시조달수리부속이 소모성부품으로 구성되고 부품 재활용이 허용되었을 때 예산 제약 하에서 운용가용도를 최대화시켜 주는 동시조달수리부속 구매량을 구하는 방법을 제안하였다³⁾. 이렇게 운용상 효율적인 요소를 반영한 것은 향후 과제에 긍정적인 방향을 제시하였다. 하지만 이 연구 역시 운용가용도 방정식을 도출하는 방법은 수리적 계산에 의한 것으로 정량적, 정성적 자료들이 서로 복잡하게 얽혀 있는 운영 및 정비 체계를 100% 반영하기에 어려운 방법이다.

추가적으로 본 연구에서 다룬 ‘메타모형을 이용한 시뮬레이션 최적화’의 최근 연구 동향을 아래에 설명하였다.

엄인섭(2010)등은 전기 기관차 중수선 시설의 설계 변수 최적화를 연구를 시뮬레이션과 비선형모형을 이용하여 다목적 문제를 해결하였다⁴⁾. 이는 전기 기관차 중수선 시설 설계 단계에서 시뮬레이션 분석을 수행하기 어렵다는 단점을 메타모델로 극복하였다. 하지만, 이것은 비선형모형을 이용하여 문제 해결 과정이 복잡하다는 단점을 갖고 있다. 본 연구 목적은 지속적으로 바뀌는 단가 제약에 빠르고 쉽게 대응하며 분석이 가능토록 하는 것이다. 그리고 동시조달수리부속 최적화라는 본 연구 영역에서 동시조달수리부속 수량 대비 운용가용도의 관계는 정비례이기 때문에 선형계획법으로 충분히 최적화 가능하다. 그래서 본 연구 목적 및 영역에는 적합하지 않다.

강정윤(2006)등은 시뮬레이션 모델을 바탕으로 실험계획을 직교배열로 수립하고 반응표면법을 이용한 비선형모형을 메타모델로 하여 최적화를 수행하였다¹⁾. 하지만 문제 해결 과정이 어렵고, 위에서 언급한 이유로 본 연구 목적 및 영역에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 이용하여 실제 환경을 토대로 장비를 운영하고, 보급 및 정비하는 시뮬레이션 모델링을 개발 후, 실제 분석 환경에 도움 되기 위해 회귀모형을 활용하여 동시조달수리부속 최적화를 하였다.

3. 연구 절차

본 연구의 세부적 절차는 다음과 같다. 첫째, 완제품 내 품목의 종류와 구조를 정의한다. 둘째, 고장분석(FMEA, Failure Mode and Effect Analysis)을 통해서 완제품 운용에 영향을 미치는 주요 품목을 식별 후 LRU(Line Replacement Unit) 및 SRU(Shop Replacement Unit)로 구분하고, 해당 품목을 동시조달수리부속 선정 후보로 한다. LRU 및 SRU는 아래 기초연구 단계에서 설명한다. 셋째, 보급 및 정비체계 구조를 정하고, 이 구조 내 동시조달수리부속이 어떻게 사용되고 계단별 이동이 되는지 운용 시나리오를 결정한다. 넷째, 시뮬레이션 모델링에 필요한 기타 입력 자료를 정리 한다. 자세한 내용은 시뮬레이션 모델링 부분에 있다. 다섯째, 해당 시뮬레이션 모델의 Verification 및 Validation이 끝나면 해당 모델을 이용하여 독립변수인 동시조달수리부속 후보 품목별 수량과 종속변수인 완제품 운용가용도 평가 치와의 관계를 다중회귀 분석을 통해 도출한다. 여섯째, 여기서 얻어진 회귀모형을 통해 전체 구매 비용을 제약으로 최대 운용가용도를 만족하는 품목별 동시조달부속 수량을 선형계획법을 통해 도출한다. 그림 1은 본 연구 절차를 순서도화 한 것이다.

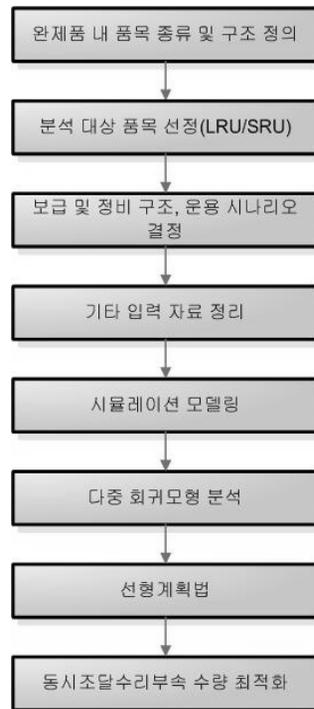


그림 1. 연구 절차

4. 기초 연구

4.1 장비 구조

하나의 완제품은 다수의 하부 구성품으로 이루어져 있으며, 각 하부 구성품의 고장은 전체 완제품 운영에 영향을 미친다. 이러한 장비 구조는 트리 형태로 표현하며 각 품목은 완제품, LRU, SRU로 나누어 표현한다. LRU는 완제품 단위에서 바로 제거 가능한 품목을 말하며, SRU는 LRU 단위에서 제거 가능한 품목을 말한다⁸⁾. 이를 도식화하면 그림 2와 같다. 여기에서 주목할 점은 LRU 하부 품목으로 LRU 품목이 있는 구조도 가능하다. 이는 곧 상위 LRU를 분해하지 않고도, 하위 LRU 품목을 완제품 상태에서 제거가 가능하다는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 이러한 장비의 구조적 특성을 고려하여 시뮬레이션 모델링을 하였다.

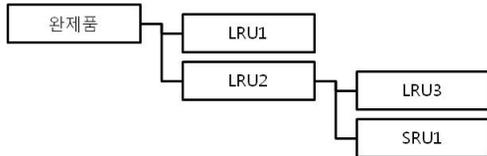


그림 2. 장비 체계 구조

4.2 보급 및 정비체계

보급 및 정비체계는 장비가 원활히 운용되기 위하여 정비를 하고, 수리부속을 보급하는 구조 모형을 뜻하는 것으로 이것은 육군, 해군, 공군에 따라 체계 정의가 약간씩 다르다. 육군은 5계단이라 하여 사용자, 부대, 직접(야전 급), 일반(야전 급), 창으로 구별하고, 해군과 공군은 부대, 야전, 창으로 3계단으로 나눈다. 부대는 보통 실제 장비가 배치 및 야전 아래 급의 보급과 정비가 되는 장소를 뜻하며, 야전은 부대보다 상위 개념의 보급 및 정비를 위해 존재하는 상위 개념이다. 그리고 창은 이런 야전에서 지원하기 힘든 수리 품목의 보급 및 정비를 수행하는 최상위 장소이다. 이러한 부대, 야전 및 창에서는 정비와 보급이 같이 이루어진다. 그림 3은 3계단 기준의 보급 및 정비체계를 표현한 것으로, 부대 및 야전은 그림과 같이 비대칭형으로 존재할 수 있으며, 각 부대에 배치되는 장비 수량도 서로 다를 수 있다. 그렇게 되면 각 부대별 야전별 동시조달수리부속 보유 수량은 동일 레벨이라도 다를 수 있다.

본 연구에서는 이런 구조적 특성을 고려하여 시뮬레이션 모델링을 하였다.

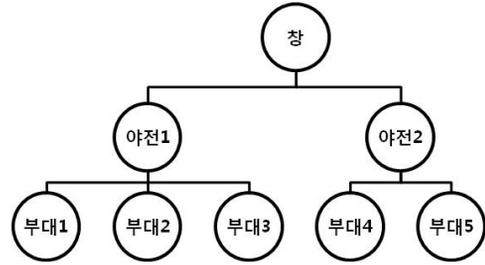


그림 3. 보급 및 정비체계 구조

4.3 운용가용도 정의

일반적으로 운용가용도는 무기체계나 장비가 실제의 운용환경과 규정된 조건에서 사용할 때 임의의 시점에서 만족스럽게 작동될 확률을 말한다. 이는 해당 체계 자체의 가동 능력 및 정비 시간은 물론이며 행정업무처리 및 부품조달 시간과 같은 실제 운용상의 지연을 함께 고려한 현실적인 군수 지원 상태에서 규정된 조건으로 체계가 가동될 확률을 나타내며 수리적 계산으로는 아래와 같이 표기 한다¹⁰⁾.

(1)

$$A_o = \frac{\text{총 가동시간}}{\text{총 시간}} = \frac{\text{총 가동시간}}{\text{총 가동시간} + \text{총 불가동시간}} = \frac{OT}{OT + ST + AT + TCM + TPM + TALDT}$$

- 1) 운용시간(OT, Operation Time) : 정비나 체계가 실제 운용되는 시간.
- 2) 대기시간(ST, Stanby Time) : 장비 가동을 위하여 대기상태에 있는 시간.
- 3) 경계시간(AT, Alert Time) : 장비 운용을 위하여 경계상태로 대기하고 있는 시간.
- 4) 총 수리정비 시간(TCM, Total Corrective Maintenance) : 고장정비를 위해 소요되는 정비시간.
- 5) 총 예방정비 시간(TPM, Total Preventive Maintenance) : 예방정비를 위해 소요되는 정비시간.
- 6) 총 행정 및 군수지연시간(TALDT, Total Administrative & Logistics Delay Time) : 고장정비와 예방정비를 수행하는 과정에서 발생하는 행정 및 군수지연시간의 총합.

본 연구에서는 위의 자료를 시뮬레이션 입력 자료에 포함하여 실험 후 얻어지는 시뮬레이션 결과를 통해 운용가용도 회귀모형을 만들었다.

4.4 다중 회귀모형

다중 회귀모형은 둘 이상의 독립 변수들에 대하여 종속 변수라고 불리는 다른 한 변수 사이의 관계를 수학적 인 모형을 이용하여 규명하고, 이 규명된 함수식을 이용하여 독립변수들의 변화로부터 종속변수의 변화를 예측 하고자 할 경우에 사용되는 통계적 분석기법이다^[11].

본 연구에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 입출력 자료를 정리 후, 다중 회귀모형 중 선형으로 산출한다. 이것은 산출하기 쉽고, 비교적 자료가 선형에 따른다는 선형 학습에 근거한다.

독립변수가 k개인 중 선형회귀모형은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

여기서 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 모집단의 회귀계수, ϵ_i 는 종속변수 Y를 측정할 때 발생하는 오차를 나타낸다. 그리고 오차 ϵ_i 는 정규분포 $N(0, \sigma^2)$ 을 따르며, 오차들은 서로 독립적으로 발생된다고 가정한다.

이런 중 선형회귀 식을 추정하기 위해 필요한 회귀계수는 그 개수에 비례하는 정규방정식들을 이용하여 산출한다. 이를 표현하기 위해 보통 다음과 같이 행렬을 이용한다.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} \Leftrightarrow y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

y X β ϵ

중 선형회귀모형에서 최소제곱법에 의한 회귀계수 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 를 추정하기 위해서 오차들의 제곱 합을 최소로 하는 b_0, b_1, \dots, b_k 의 값을 구한다. 즉, 행렬로 표기된 중 선형회귀모형 $y = X\beta + \epsilon$ 에서 오차 제곱 합은

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (4)$$

$$= y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta$$

가 되고, 이를 회귀계수 β 에 대하여 미분하여 0으로 놓으면

$$\frac{dS}{d\beta} = -2y'X + 2\beta'X'X \quad (5)$$

가 되어 정규방정식은

$$X'X\beta = X'y \quad (6)$$

가 된다. 이때 행렬 $X'X$ 의 역행렬로 치환하여 회귀계수 β 의 추정량 b 는 다음과 같게 된다.

$$b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} = (X'X)^{-1}X'y \quad (7)$$

5. 사례 연구

5.1 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 앞서 말한 내용을 기초로 예제 사례를 실험하였다. 사용된 예제 사례는 국방 산업 분야의 직무 경험을 토대로 일반적인 체계를 가상으로 구성하였다.

동시조달수리부속의 최적 수량을 결정하기 위해 먼저 시뮬레이션 기법을 활용했다. 시뮬레이션 모델링을 위해서는 정의되어야 할 것들이 있다. 장비 구조는 10개의 LRU 품목과 각 LRU 당 2개의 SRU가 포함되었으며, 보급 및 정비체계는 부대-야전-창인 3계단으로 정의하였으며, 시뮬레이션 모델링을 위한 가정, 입력 자료, 운용시나리오를 아래와 같다. 본 시뮬레이션은 AUTOMOD 라는 3D 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하였다.

5.1.1 가정

- 1) 전 품목을 임무 필수 품목으로 정의하여 LRU, SRU 한 품목이 고장이 발생하면 전체 장비를 운용하지 못한다.
- 2) 본 장비는 24시간 항시 운용된다.
- 3) LRU 교체는 하위 LRU 및 SRU 까지 교환을 의미한다.
- 4) 장비 교환은 100% 해당 계단에서 완료된다.
- 5) 교환된 부품의 수리 후 재사용은 고려되지 않는다.
- 6) 예방정비는 고려하지 않는다.
- 7) LRU는 부대에서 교환하며, SRU는 야전 혹은 창에서 교환된다.
- 8) 모든 품목은 직렬 구조로 설계되었다.

5.1.2 보급 및 정비 절차

완제품이 부대에 입고되면 각 품목(LRU, SRU)은 수명주기인 MTBF(Mean Time Between Failure)만큼 운용

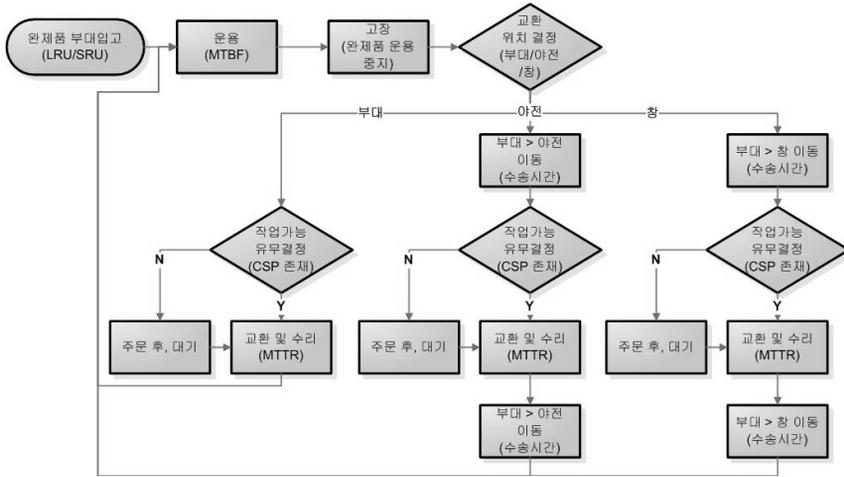


그림 4. 보급 및 정비 절차

후 고장이 난다. 이때 MTBF는 위 가정에서 언급한 대로 모든 품목이 직렬구조이기 때문에 지수분포를 따른다. 고장이 난 품목은 부대, 야전, 창으로 보내지며 동시조달수리부속 수량을 확인한 후 동시조달수리부속이 존재할 시 정비 업무를 하고, 존재하지 않을 시 주문 후 대기한다. 동시조달수리부속 자체가 3년간 부품의 조달이 없는 것을 정의하지만 실제 절차는 동시조달수리부속이 필요한데 수량이 부족할시 오래 걸리더라도 주문을 하여야 하기 때문에 주문 후 대기로 절차를 넣었다. 교환 품목은 다시 부대로 옮겨져 운용이 된다. 그림 4는 보급 및 정비절차를 순서도화 한 것이다.

5.1.3 시물레이션 입력 변수

시물레이션 입력 변수는 전역 변수와 품목 별 속성으로 나뉜다. 전역 변수는 시물레이션 전반에 사용되는 변수이고, 품목 별 속성은 각 Entity인 품목 종류별로 사용되는 변수이다. 세부 사항은 표 1, 2와 같다.

표 1. 전역 변수

전역 변수	값
부대 - 야전 이동 편도 시간	0.5일
부대 - 창 이동 편도 시간	2일
외부로 주문 후 대기시간	3개월
부대, 품목 교체 시간	3시간
야전, 품목 교체 시간	1일
창, 품목 교체 시간	3일

표 2. 품목 별 속성

품목 별 속성	값 (단위:시간)
LRU1의 MTBF	52355
LRU2의 MTBF	12607
LRU3의 MTBF	148965
LRU4의 MTBF	6125
LRU5의 MTBF	39830
LRU6의 MTBF	10734
LRU7의 MTBF	4656
LRU8의 MTBF	29310
LRU9의 MTBF	7138
LRU10의 MTBF	45926
SRU1의 MTBF	90514
SRU2의 MTBF	41700
SRU3의 MTBF	348259
SRU4의 MTBF	64744
SRU5의 MTBF	218260
SRU6의 MTBF	452753
SRU7의 MTBF	35000
SRU8의 MTBF	108271
SRU9의 MTBF	176587
SRU10의 MTBF	81700
SRU11의 MTBF	300000
SRU12의 MTBF	50000
SRU13의 MTBF	40000
SRU14의 MTBF	9000
SRU15의 MTBF	75391
SRU16의 MTBF	64881
SRU17의 MTBF	30000
SRU18의 MTBF	70000
SRU19의 MTBF	89420
SRU20의 MTBF	165000

5.2 시뮬레이션 및 최적화 분석

시뮬레이션 모델을 이용하여 최적화를 한다. 가장 먼저 시뮬레이션 모델을 통하여 독립 변수 중 종속 변수에 영향을 미치는 것을 민감도 분석으로 찾아내고 이를 토대로 다중 회귀모형을 얻는다. 그 후 비용 선형계획법을 이용하여 제약 내 최적 동시조달수리부속 수량을 구한다. 그리고 모든 실험의 수행 기간은 3년으로, 실험 종료 시점의 동시조달수리부속 품목 별 수량 변화 대비 운용가용도를 산출하는 Termination 분석을 한다. 그 이유는 동시조달수리부속이란 앞서 설명한 것처럼 완제품 배치 이후 수리부속의 재보급이 3년간 어려워 해당 기간 동안 운용가용도에 악영향을 미치게 되기 때문에 이를 해결하기 위해 완제품과 함께 납품되는 동시조달수리부속 품목별 수량이 해당 기간 동안 수요가 얼마나 예상되는지 품목 및 수량을 분석하려는 것이다¹⁰⁾.

5.2.1 독립 및 종속 변수

최적화를 위한 독립변수는 각 품목(LRU/SRU)의 동시조달수리부속 수량, 종속변수는 운용가용도로 정의한다. 독립변수인 동시조달수리부속의 수요는 해당품목이 자신의 수명인 MTBF만큼 운용되다가 노후화되어 발생한다. 여기서 수명주기인 MTBF는 위에서 언급한 것처럼 지수분포를 따른다. 지수분포를 따르게 되면 확률 상 약 63.2%정도는 해당 수명주기 전에 고장 난다⁹⁾. 이렇게 발생한 고장은 종속변수인 운용가용도에 영향을 준다. 시뮬레이션 수행 기간 동안 완제품 내 하부 품목 인 LRU 및 SRU가 고장이 나면 보급 및 정비 시간이 발생되어 운용가용도는 떨어지게 된다.

5.2.2 민감도 분석

최적화 전, 독립 변수가 종속 변수에 영향을 미치는 정도를 민감도 분석을 통해 알아보고, 영향이 미비한 것은 독립변수에서 제거한다. 종속 변수에 영향을 미치지 못하는 독립 변수를 실험에 포함하면 불필요한 실험 횟수가 늘어나며, 이 늘어난 실험 횟수는 시간적 누수를 발생하기 때문이다. 본 사례에서는 독립 변수의 기준 값을 5, 오차 값을 3으로 입력하여 시뮬레이션 모델을 기준으로 각각의 독립 변수가 종속 변수에 미치는 영향을 도출하였다. 상한 값은 전체 동시조달수리부속의 수량 변화에 따른 운용가용도에 미치는 영향 추세를 분석한 결과 그 중 가장 높은 최댓값인 '8'을 사용한 것이고, 하한 값은 MTBF가 지수분포를 따르기 때문에 만약 '0'으로 정의하게 되면 실험 횟수를 무한정 반복하지 않은 이상 대부분의 독립변

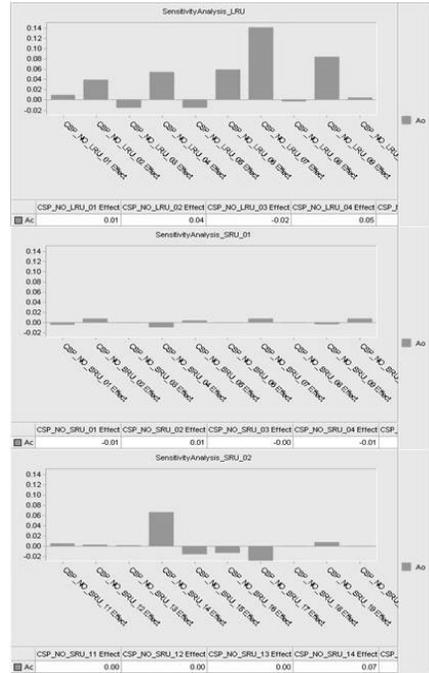


그림 3. LRU, SRU 품목 민감도 분석

수가 모두 운용가용도에 영향을 준다는 오류가 발생 할 수 있다. 그래서 '2'로 두어 한정된 실험 횟수 내 오차를 줄이게끔 하였다. 그림 5는 이것을 그래프로 한 것이다.

위 그래프에서 확인할 수 있듯이 본 사례에서는 LRU 2, 4, 6, 7, 9와 SRU 14의 동시조달수리부속 수량의 변화가 운용가용도에 미치는 영향이 크므로, 이것을 독립 변수로 선택하여 회귀모형 작성을 위한 입력력 자료를 얻는다.

5.2.3 실험계획 및 다중 회귀모형 작성

본 사례에서 다중 회귀모형은 시뮬레이션 모델을 토대로 독립변수인 품목별 동시조달수리부속 수량을 2, 5, 8로 변경하면서 종속변수인 운용가용도 변화를 산출하였다. 이 실험 계획은 민감도 분석의 예러 값을 반영하여 Low, Medium, High의 3수준 실험을 수행한 것으로, 독립변수와 종속변수가 정비례 관계를 띠고 있기 때문에 3가지 경우도 충분하다. 그래서 실험 시나리오는 총 3의 6승인 729이고, 시나리오 당 반복 횟수는 30회이다. 산출된 다중 회귀 모형은 식 (8)과 같다.

$$Y = 0.001929 * X_1 + 0.004762 * X_2 + 0.004301 * X_3 + 0.033411 * X_4 + 0.017982 * X_5 + 0.003297 * X_6 + 0.44488 \quad (8)$$

Y : 운용가용도	$0 \leq X_2 \leq 5$
X_1 : LRU2의 CSP 수량	$0 \leq X_3 \leq 3$
X_2 : LRU4의 CSP 수량	$0 \leq X_4 \leq 8$
X_3 : LRU6의 CSP 수량	$0 \leq X_5 \leq 7$
X_4 : LRU7의 CSP 수량	$0 \leq X_6 \leq 8$
X_5 : LRU9의 CSP 수량	
X_6 : SRU14의 CSP 수량	

본 회귀모형에 대한 분산분석은 표 3과 같다. 아래에서 확인할 수 있듯이 P-값이 유의수준 $\alpha = 0.05$ 이하 이므로, 본 회귀 식은 유의하다고 볼 수 있다. 본 회귀분석은 Excel 2007을 사용하였다.

표 3. 분산분석

	자유도	제곱합	제곱평균	F	P-값
회귀	6	6.54084	1.09014	583.850	4.57×10^{-273}
잔차	722	1.34808	0.00186		
계	728	7.88893			

5.2.4 선형계획법

선형으로 도출된 회귀모형을 이용하여 동시조달수리부속 최적 수량을 선형계획법으로 산출하였다. 선형계획법은 기본적으로 선형성을 가정하는데, 이는 현실 문제를 수학적 모형으로 나타내는데 있어서 목적함수식과 제약식 조건식이 모두 1차식인 선형으로 표시되어야 함을 의미하며 보통 심플렉스법을 이용하여 최적화 한다. 이런 선형계획법을 적용하기 위한 수학적 모형의 구성 요소로는 결정변수, 목적함수식, 제약조건으로 이루어진다¹²⁾. 결정변수는 동시조달수리부속 수량이고, 목적함수식은 위에 표기된 회귀모형을 사용하였다. 제약조건은 총 비용과 품목별 한계 수량으로 정의하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

목적 함수 : (9)

$$\begin{aligned} \text{Max. } Y = & 0.001929 * X_1 + 0.004762 * X_2 + \\ & 0.004301 * X_3 + 0.033411 * X_4 + \\ & 0.017982 * X_5 + 0.003297 * X_6 + \\ & 0.44488 \end{aligned}$$

제약식 :

$$\begin{aligned} & 130,000 * X_1 + 150,000 * X_2 + 350,000 * X_3 + \\ & 600,000 * X_4 + 500,000 * X_5 + 100,000 * X_6 \\ & \leq 10,000,000 \end{aligned}$$

$$0 \leq X_1 \leq 4$$

목적함수는 운용가용도를 최대화로 두었다. 그리고 제약 식 중 첫 번째는 비용 부분으로 X의 계수는 단가이며 총 비용 이하로 산출 되게 하였다. 두 번째에서 일곱 번째는 각 품목 별 한계 수량으로 이것은 시뮬레이션 모델을 이용하여 0에서 10까지 1씩 추가하면서 품목 별 동시조달수리부속 수량이 어느 지점에서 안정화 상태가 되는 지 확인하여 그 이후 지점까지는 무의미한 수량이기 에 이를 통해 최대 수량을 결정하였다. 이때 변화하는 동시조달수리부속을 제외한 나머지 것들의 수량은 10으로 고정하여 해당 동시조달수리부속을 제외한 나머지 것들이 운용가용도에 영향을 미치지 않게 하였다. 본 선형계획 분석은 Excel 2007을 사용하였다.

5.2.5 결과

비용 제약하의 품목별 최적 동시조달수리부속 수량은 아래 표 4와 같다. 다음과 같은 품목별 수량만큼 구매되면, 총 비용 10,000,000 제약 하에 사용 비용은 9,980,000이 소요되고, 운용가용도는 88.3%에 도달한다고 예측할 수 있다.

표 4. 최적화 결과

독립 변수	산출 값
LRU2의 CSP 수량	1
LRU4의 CSP 수량	4
LRU6의 CSP 수량	1
LRU7의 CSP 수량	8
LRU9의 CSP 수량	7
SRU14의 CSP 수량	6

6. 결 론

본 논문에서는 실제 분석 환경을 고려한 동시조달수리부속 수량 최적화 방법론을 구현하였다. 시뮬레이션 모델링을 위해 장비 품목과 보급 및 정비 체계의 자료를 활용하여 작성했으며, 이렇게 만들어진 시뮬레이션 모델을 바탕으로 수리적인 표현으로 바꾸기 위해 다중 회귀모형을

사용하였다. 이 다중 회귀모형은 비용 제약 하에서 각 품목별 동시조달수리부속 수량의 최적 조합을 도출하는데 사용되었다. 이 방법은 연구 개발 중에 지속적으로 달라지는 단가 및 비용 자료에 효율적이고 빠르게 대응이 가능한 방법론으로 기존 연구에 비해 보다 현실적이라 활용도가 높을 것으로 기대하는 바이다.

향후 연구에서는 시뮬레이션 모델링 단계에서 구체적인 체계 운용 시나리오인 작전운용형태 및 임무유형(OMS/MP, Operational Mode Summary/Mission Profile) 내용을 포함하여 시뮬레이션 모델의 정밀도를 높이고, 최적화 단계에서 가장 중요한 부분인 다중 회귀분석의 정확성을 높이기 위해 현재 연구가 활발히 되고 있는 크리깅 분석 등을 비롯한 메타모형을 사용하여 본 연구의 완성도를 높일 것이다.

참 고 문 헌

1. 강정운, 이홍철, 엄인섭(2006), “시뮬레이션과 메타모형을 이용한 자동물류센터 설계 최적화”, *한국시뮬레이션학회 논문지*, 제15권, 제3호, pp. 103-114.
2. 나인성, 이계경, 박명규(2006), “예산제약 하에서 운용가용도를 고려한 최적 동시조달수리부속품 소요 산출 모델”, *대한안전경영과학회지*, 제8권, 제5호, pp.167-180.
3. 박병철, 정석재, 김경섭(2008), “시뮬레이션 방법을 통한 동시조달 수리부속 적정 재고량 결정에 관한 연구”, *한국경영공학회지*, 제13권, 제1호, pp. 221-231.
4. 엄인섭, 천현재, 이홍철(2010), “전기 기관차 중수선 시설의 설계 변수 최적화”, *한국철도학회논문집*, 제13권, 제2호, pp.222-228.
5. 오근태, 나운균(2005), “부품재활용이 허용될 때 소모성 동시조달부품의 적정구매량 결정”, *산업경영시스템학회지*, 제28권, 제1호, pp. 97-104.
6. 유권태, 엄봉진(2007), “위게임 메타모델 수립을 위한 실험계획 및 모델링 방법에 관한 비교 연구”, *한국국방경영분석학회지*, 제33권, 제1호, pp. 59-72.
7. 정석재, 한승훈, 김경섭(2007), “시스템 가동률에 따른 수리부속 제품의 재고 수준 결정에 관한 연구”, *산업경영시스템학회지*, 제30권, 제3호, pp. 117-126.
8. 정일환, 윤원영(2008), “가용도 제약 하에 MIME 시스템에서 유전알고리즘과 시뮬레이션을 이용한 수리부속 최적화”, *품질경영학회지*, 제36권, 제2호, pp. 9-19.
9. 김진규(2003), *신뢰성공학*, 한울출판사, pp.24-41.
10. 방위사업청(2009), *종합군수지원 개발 실무지침서*, 방위사업청, pp.249-264.
11. 배현웅(2012), *Excel을 이용한 실용통계분석*, 교우사, pp. 301-321.
12. 정기호(2009), *엑셀을 활용한 경영과학*, 비엔엠북스, pp. 31-80.
13. Alfredsson, P. (1997), “Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities”, *European Journal of Operational Research*, Vol.99, No.3, pp.584-597.
14. ABHIJIT GOSAVI (2003), *SIMULATION-BASED OPTIMIZATION*, Kluwer Academic Publishers, pp. 57-68.
15. Craig C. Sherbrooke (2004), *OPTIMAL INVENTORY MODELING OF SYSTEMS*, Kluwer Academic Publishers, pp. 101-125.



김 경 록 (kyungrok.kim@lignex1.com)

2008 명지대학교 산업시스템공학부 학사
2011 고려대학교 정보경영공학과 석사
현재 LIG넥스원 ILS연구센터 연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 체계공학, 최적화



용 화 영 (hwayoung.yong@lignex1.com)

2005 중앙대학교 전자전기공학 학사
현재 LIG넥스원 ILS연구센터 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 체계공학



권 기 상 (kwonkisang369a@lignex1.com)

1993 금오공과대학교 전자제어공학과 학사
2000 해군 장교
현재 LIG넥스원 ILS연구센터 수석연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 체계공학