

국외구매 무기체계에 대한 동시조달수리부속 선정 유전자 알고리즘 연구

조현기 · 김우제[†]

서울산업대학교 산업정보시스템공학과

A Study on Genetic Algorithm of Concurrent Spare Part Selection for Imported Weapon Systems

Hyunki Cho · Woo-Je Kim

Dept. of Industrial and Information Systems Engineering, Seoul National University of Technology

In this study, we developed a genetic algorithm to find a near optimal solution of concurrent spare parts selection for the operational time period with limited information of weapon systems purchased from overseas. Through the analysis of time profiles related with system operations, we first define the optimization goal which maintains the expected system operating rate under the budget restrictions, and the number of failures and the lead time for each spare part are used to calculate the estimated total down time of the system. The genetic algorithm for CSP selection shows that the objective function minimizes the estimated total down time of systems with satisfying the restrictions. The method provided by this study can be applied to the generalized model of CSP selection for the systems purchased from overseas without provision of their full structure and adequate information.

Keywords: Genetic Algorithm, Concurrent Spare Part, Estimated Total Down Time, Optimal Solution

1. 서론

동시조달수리부속(Concurrent Spare Part : CSP)은 신규 무기체계를 실전 배치할 때 주장비와 함께 보급되는 수리 및 예비부속품으로써, 배치 초기 일정기간 동안 재보급 없이 무기체계에 주어진 운용임무를 원활히 수행하기 위하여 사용되는 지원품목이다(DAPA, 2009). 무기체계 도입사업의 경우 이러한 CSP는 무기체계 도입 이후부터 3년 간 사용할 물량으로 전체 도입가격의 5% 내외 수준에서 최대 10%까지 물량을 선정하여 확보하고 있다.

CSP는 과소 책정하면 수요품목이 누락되어 재고가 부족하게 되며, 반대로 과다 책정하게 되면 재고 초과로 예산낭비를 초래하게 되기 때문에 무기체계의 가동률 유지를 위해 가용

예산 범위 내에서 적정 CSP 산정에 대한 효율적인 모델이 필요하다. 국외구매 무기체계는 제한된 기술자료와 무기체계 운용 경험 부족으로 대부분 해외업체의 추천품목에 의존하고 있는 실정이다.

CSP에 대한 적중률은 무기체계 도입 후 3년 간의 운영유지기간 동안 CSP로 선정된 수리부속의 사용률을 의미하며, CSP 적중률이 높은 경우는 CSP 산정시점의 예측대비 사용률이 100%에 가깝다는 것을 의미하며, CSP 적중률이 낮은 경우는 예측한 기준보다 낮은 수리부속의 사용을 의미하기 때문에 무기체계 도입 시 CSP 적중률이 낮은 경우는 3년 후 사용하지 않은 부품을 등가의 다른 부품이나 장비 등으로 교환하는 재판매 조건을 계약서에 포함하도록 요구하고 있다.

CSP는 배치되는 무기체계 전체 수량을 기준으로 대상기간

[†] 연락저자 : 김우제 교수, 139-743 서울 노원구 공릉길 138 서울산업대학교 산업정보시스템공학과, Fax : 02-974-2849,
E-mail : wjkim@snut.ac.kr

2009년 5월 19일 접수; 2010년 7월 11일 수정본 접수; 2010년 8월 17일 게재 확정.

동안 1회 이상 소요가 예상되는 품목과 주기적인 교환 품목, 일정기간 사용 후 교환해야 하는 시한성 품목, 1회 이상 소요가 예상되지는 않으나 예기치 않은 소요 발생시 무기체계 운용이나 안전에 심각한 영향을 주는 품목 등이 포함된다(DAPA, 2009).

국내연구개발에 의해 획득하는 무기체계의 경우 연구개발 초기 단계부터 사용군에 의해 작성되는 체계운용개념서(Operational Concept Document : OCD)와 체계운용요구서(Operational Requirement Document : ORD)에 명시된 기준을 충족하기 위해 체계요구사항검토(System Requirement Review : SRR), 체계기능검토(System Function Review : SFR), 기본설계검토(Preliminary Design Review : PDR), 상세설계검토(Critical Design Review : CDR) 등의 각종 설계검토회의와 종합군수지원요소실무조정회의(Integrate Logistic Support Management Team : ILS-MT), 군수제원점검회의(Logistic Data Check : LDC)를 통하여 무기체계 구조 정의와 하부 체계별 부품의 신뢰성 분석을 실시하여 전체 무기체계에 대한 신뢰성을 구하고, 수리부속에 대한 구체적인 신뢰도·가용도·정비도(Reliability, Availability, Maintainability : RAM)를 구할 수 있기 때문에 CSP에 대한 정확한 수요를 산정할 수 있다.

그러나 국외구매 무기체계의 경우는 해외 업체로부터 이미 개발된 장비를 획득하는 것이기 때문에 개발단계에서 검토할 수 있는 RAM 분석 결과나 LDC 등의 자료 획득이 어려우며, 실제 해외업체와의 협상에서도 국내 연구개발 무기체계 수준의 자료를 획득할 수 없기 때문에 CSP 산정을 위해서는 대부분 해외업체의 제안 부품을 방위사업청과 무기체계 사용군의 검토를 거쳐 주로 주장비 획득비용의 5~10% 예산 수준에서 CSP를 선정하고 있으며, 무기체계 특성과 운용환경에 따라 가용 예산 범위는 일부 수정 적용되고 있다.

따라서 국외 무기체계 획득의 경우처럼 수리부속의 MTBF (Mean Time Between Failure, 고장간 평균시간)와 조달기간, 단가 등의 제한된 정보를 이용하여 예산제약하에서 일정 수준 이상의 가동률을 유지하기 위한 CSP 산정을 위해서는 국내 연구개발과 같은 잘 정의된 무기체계 구조하에서의 기존 CSP 산정 방법과는 다른 접근 방법이 필요하다. 본 연구에서는 무기체계 고장 횟수 분석과 가용 예산 제약을 충족하면서 수리시간보다 장기간 소요되는 조달기간을 이용하여 무기체계 가용도를 충족할 수 있는 적정 CSP 소요량을 산정하는 유전자 알고리즘 모형을 제안하고자 한다.

일반적으로 무기체계를 구성하고 있는 부품의 종류와 구성품 단위별 부품 수가 증가할수록 계산의 복잡성은 기하급수적으로 증가하는 반면, 구매 의사결정지원을 위해 제한된 시간 이내에 다수의 해 중에서 최적해를 결정해야 하고, 향후 문제

의 확장성 등을 고려하여 발견적 기법인 유전자 알고리즘을 사용하는 것이 현실적이고 효율적이라고 할 수 있다.

제 2장에서는 수리부속 소요산정에 대한 관련연구 분석을, 제 3장에서는 문제를 풀기위한 가정과 수리모형 구축, 제 4장에서는 CSP 산정을 위한 유전자 알고리즘 설계를, 제 5장에서는 실험 결과와 이에 대한 분석을, 제 6장에서는 결론 및 향후 연구방향에 대하여 논한다.

2. 수리부속 소요산정 관련연구 분석

OASIS(Optimal Allocation of Spares Initial Support)는 방위사업청에서 활용하고 있는 CSP 소요 산출용 표준 소프트웨어로써 주로 국내 연구개발 무기체계에 대한 CSP 산정에 사용하고 있다. 주요 입력요소는 완제품 또는 부품에 대한 구조도와 고장, 정비 정보와 수리회송시간, 신뢰도 기준 등에 대한 품목별 자료와 연간운용시간, 사용군의 정비지원구조, 품목별 소요량, 비용과 가용도 기준 등의 분석자료가 되겠으며, 이를 활용하여 목표가용도와 목표비용을 동시에 최적화하기 위해 라그랑주 승수 기법에 의해 최적해를 산출하고 있다(ADD, 2006). OASIS 모델은 국내 연구개발 사업과 같이 사업초기부터 종합군수지원요소에 대한 체계적 연구를 실시하고 야전 운용 경험제원 등을 포함한 산정에 필요한 입력 자료를 확보한 경우에는 효과적으로 CSP를 산정할 수 있으나, 무기체계를 구성하고 있는 각 부품에 대한 세부 자료 구축이 어려운 국외구매 사업의 경우에는 적용에 매우 제한적이다.

OPUS10은 스웨덴 Sysstecon AB에서 개발한 METRIC 변수 기반의 CSP 소요 산출 및 전술·전략 수준의 군수지원용 소프트웨어이며, 군수지원 조직을 중심으로 설계되었다. OPUS10에서 정의하고 있는 군수지원 조직에는 부품 조달원, 창, 야전 정비, 운용부대 등이 포함되며, 이러한 조직에 대한 운영과 부품 수송에 대한 방침 등이 포함되어 있다. 수리부품에 대한 소요 예측은 파이프라인상의 재고 확보 수준이나 재고수준 조정, 부족 재고 발생 형태와 부품 조달까지의 대기 시간 등을 각종 입력자료를 이용하여 생성하고 수리부품에 대한 적정 수리 및 폐기 방침과 보관 장소 등에 대한 결과를 제공한다. OPUS10의 주요 입력요소는 부품명과 부품번호, 단가, 고장율, 부품 조달원, 무기체계 운용부대수, 연간 운용시간, 부품을 수리할 수 있는 야전정비 및 창정비 단계 설정, 조달에 필요한 기간과 군수행정지연시간 등이 있는데, 적정 CSP 소요 산정은 새로운 무기체계에 대한 최적화된 군수지원 제공과 연계한 산출물로 OPUS10 역시 충분한 운용경험과 수리부품에 대한 제원 획득, 군수지원체계의 구축이 없다면 적용에 제한이 된다(Systecon,

2005).

수리부속 소요산정을 위한 모형의 대부분의 접근 방법은 수리부속 확보를 위한 가용 예산 범위 제약, 지점별 수리부속 재고수준 할당, 재고 관리를 위한 비용 제약, 수리가능 시설 활용에 따른 재고 수준 산정 등이 연구되었지만, 큰 영역으로 분류한다면 수리부속 확보를 위한 비용 제약 분야와 수리시간 최소화를 위한 가용도 제약 분야로 볼 수 있다.

비용 제약 조건에서의 CSP 소요 산정은 각 부품별 중요도 또는 보호수준을 적용하여 필요 수량을 결정하는 것으로 부품별 보호수준을 만족하는 최소의 CSP 수량을 먼저 산출하고 이중 수리가능 품목에 대해서는 실제 구매량을 산출하고 소요예산이 가용예산을 초과하는지 확인하여 초과시에는 가용예산을 만족할 때까지 보호수준이 상대적으로 낮은 부품의 수량을 1개씩 감소시켜 최종 CSP 소요량을 결정하는 모형이다. 이는 CSP 소요량 산출의 기준이 되는 고장 횟수나 수리시간, 무기체계 운용시간, 고장이 무기체계에 미치는 치명도 등에 의해 결정하는 것이 아니라 단순히 부품의 보호수준에 의해서만 결정하고 있으며, 무기체계의 운용경험을 고려하지 않은 모형 적용으로 비수요 품목의 선택 가능성을 높일 수 있다(Kim *et al.*, 2001; Yoon and Sohn, 2007).

수리시간 최소화를 통한 접근방법으로는 장비가 고장 났을 때 고장을 해소하는데 소요되는 시간을 최소화하기 위한 방법으로, 각 단계별 정비능력, 부품의 조달기간, 수리부속 분류 형태별 정비시간, 고장률 등의 각종 요소를 고려하여 단계별 재고형태와 재고수준에 의해 고장해소시간이 결정되도록 하였다(Park and Ryoo, 2002). 적용 장비가 소량이고 장비간의 수리시간이 필요하거나 고가, 고장 횟수가 높은 경우에는 기존 방법의 적용으로는 해결이 제한되기 때문에 일반적으로는 비용 제약 보다는 충분한 수리부속 확보로 가용도를 높이는 방법을 선택하고 있다. 하지만 무기체계의 경우는 단종되는 부품이 자주 발생하고 장비간 저장할 수 있는 공간의 제약 등으로 가동률 변화에 따른 별도의 소요량 산정 방법이 필요하다(Lau *et al.*, 2006).

비용 제약하에서의 CSP 소요 산정이나 수리시간 최소화를 위한 기존 연구는 시스템 구조에 대한 명확한 정의를 기초로 부품의 중요도나 보호수준, 정비 소요시간, 운용 시설이나 장비별 수리부속의 소요량 등과 같은 수리부속별 특성 자료가 이미 확보되었다는 가정 하에 연구가 되었기 때문에 국외구매 무기체계와 같이 수리부속에 대한 부분적인 자료를 이용한 CSP 소요 산정에는 별도의 기법 적용이 필요하다.

유전자 알고리즘은 자연계의 진화현상을 이용한 최적화 기법으로 수리부속 소요 산정을 위한 연구로는 항공기용 수리부속을 다수의 기지에 할당하는 문제를 예산할당 모델과 통합한

경우(Lee *et al.*, 2008)와 다수의 조달원을 보유하고 있는 수리부속에 대해 조달원별 적정 수리부속을 할당함으로써 운영유지비용을 절감할 수 있는 Near Optimal 해를 찾는 모델(Wu and Hsu, 2008), 작업 공정에 소요되는 수리부속을 투자와 이익, 신뢰도 및 수리부속의 부피 등을 최적화하면서 산정하는 방법(Marseguerra *et al.*, 2005) 등이 그동안 연구되어 왔다.

하지만 유전자 알고리즘을 적용한 기존 연구에서도 시스템 구조에 대한 정의와 수리부속 특성자료의 확보가 가능하다는 전제하에 이루어졌기 때문에 본 연구에서 적용하고자 하는 제한된 수리부속 자료를 활용한 CSP 소요 산정을 위해서는 적용에 한계가 있다.

3. 문제의 정의 및 모형 설계

3.1 문제의 정의

3.1.1 문제해결을 위한 가정

부품의 고장 횟수는 일반적으로 장비 특성과 예측 모델에 따라 감소형과 증가형, 일정형의 3가지 형태로 구분할 수 있다. 감소형의 경우 고장 횟수가 시간이 지남에 따라 감소하는 형태이며, 증가형은 고장 횟수가 점차 증가하는 형태, 일정형은 시간과 관계없이 고장 횟수가 일정하게 유지되는 형태이다. 대부분의 현대 무기체계는 결합체 또는 구성품 단위의 모듈로 구성되어 있어 고장 횟수는 일정형을 적용하는 경우가 많다(Go and Choi, 1995). 따라서 본 연구에서도 고장 횟수는 일정하게 유지되는 것으로 가정한다. 또한 특정 무기체계가 군에 배치될 경우 초기에는 고장시 부품 청구와 조달행위를 위한 정상적인 군수지원시스템이 구축되어 있지 않고 부품 조달을 위한 소요 예산도 마련되어 있지 않아 적어도 3년 이내에는 정상적으로 부품 청구와 조달 행위를 할 수 없다. 또한 해외로부터 무기체계를 구매하기 때문에 이미 배치되어 운용 중인 다른 무기체계와의 호환성이 거의 없어 기존에 구축된 정비장비나 시설을 사용할 수 없고, 야전부대 수준의 소규모 정비를 제외한 무기체계 전용 정비장비와 시설 구축을 위해서는 추가적인 예산 투자가 요구된다. 따라서 대부분의 경우 초기에는 전용 정비장비와 시설을 구축하지 않기 때문에 정상적인 군수지원이 이루어지지 않는 것으로 가정한다.

이를 포함하여 본 연구에서 적용한 가정 사항은 다음과 같다.

- 가. 수리부속의 고장 발생은 독립적으로 발생하며, 한 부품의 고장이 다른 부품의 고장에 전혀 영향을 미치지 않는다.
- 나. 수리부속 산정을 위해 적용되는 수리행위는 독립적으로 이루어진다.

- 다. 부품 고장시 교체행위에 소요되는 시간은 부품 조달기간에 포함한다.
- 라. 주장비 배치 이후 CSP 산정기간인 3년 동안은 사용 군에 의한 정비는 실시하지 않으며, 부품 고장 발생의 경우 해외로부터 새로운 부품 조달에 의해 고장 원인을 해결한다.
- 마. CSP 산정에 적용된 각종 값들은 평시 전투준비태세를 기준으로 산출된 것이며, 전시는 고려하지 않는다.
- 바. 연간 무기체계 운용시간은 평시 작전 운용형태와 교육 훈련, 정비활동 등을 명시한 운용유형과 임무형태(OMS-MP) 산정 결과를 적용한다.

3.1.2 수리모형에 적용한 기호
 수리모형 설계를 위해 사용한 기호는 아래와 같다.

- n : 무기체계를 구성하고 있는 부품의 수량
- s_i : i 번째 수리부속 선정유무, $i=1 \dots n$
- x_i : i 번째 수리부속의 구매량
- t_i : i 번째 수리부속을 수리하는데 소요되는 시간
- LCF_i : 전체 무기체계에서 i 번째 수리부속을 일정기간 동안 운용할 때 발생하는 고장 횟수
- LT_i : i 번째 수리부속의 조달기간
- p_i : i 번째 수리부속의 단가
- q_i : 무기체계 1대를 구성하는 i 번째 수리부속의 수량
- F_i : i 번째 수리부속의 1,000,000시간당 고장 횟수
- A : 무기체계 가동률
- A_E : 무기체계 기대가동률
- B : CSP 구매 총 비용
- D_E : 무기체계 기대 불가동률
- $ETDT$: 특정부품을 CSP로 확보하지 않을 경우 예상 고장 시간
- $ETUT$: 특정부품을 CSP로 확보할 경우 예상 가동시간
- TT : 불가동상태
- A_O : 무기체계 목표 가동률

- B_A : CSP 구매 가용예산
- ETT : 예상 총 고장시간
- N_S : 무기체계 도입 수량
- OT : 연간 무기체계 운용시간
- TT : 운용유지 기간 동안의 총 시간

3.1.3 무기체계 기대가동률(A_E) 분석

무기체계 획득시 CSP 소요 산정의 가장 근본적인 목적은 도입 초기 정상적으로 구축되지 않는 군수지원체계를 보완하고 무기체계의 가동률을 일정 수준이상 유지하기 위한 것이다. 이를 위해서는 먼저 무기체계 운용형태와 체계 기능, 임무 수행주기 등에 대한 분석을 통한 연간 무기체계 가동시간 정의가 필수적이다. <Figure 1>은 일반적인 무기체계 운용에 따른 시간분석을 나타내고 있다.

무기체계 가동상태를 일정 수준 이상 유지하기 위한 장비 가동유지상태(TUT : Total Up Time)에는 비상대기를 포함한 대기시간과 무기체계를 작동시키는 운용시간, 가동 상태 유지를 위한 예방정비시간이 포함될 수 있으며, 반면 장비 불가동상태(TDT : Total Down Time)에는 총 시간(TT : Total Time) 중 특정 부품 고장에 따른 무기체계 고장정비 시간과 이를 해결하기 위해 소요되는 행정 및 군수지원시간이 포함되어야 한다. 따라서 이를 활용한 일반적 개념의 무기체계 가동률(A)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$A = \frac{\text{장비가동 유지상태 (TUT)}}{\text{총 시간 (TT)}} = \frac{TT - TDT}{TT} \quad (1)$$

식 (1)은 RAM 요소 중 일반적 개념의 무기체계 가동률(A)에 대한 정의를 나타낸 것으로, 무기체계는 여러 하부 시스템의 직렬 또는 병렬, 혼합구조의 결합체로 구성되어 있어 무기체계의 가동유지상태와 불가동상태를 식별하기 위해서는 무기체계의 정확한 구조도를 식별해야만 가능하다. 이는 국내에서 연구개발되는 무기체계의 경우 개발 초기단계부터 RAM

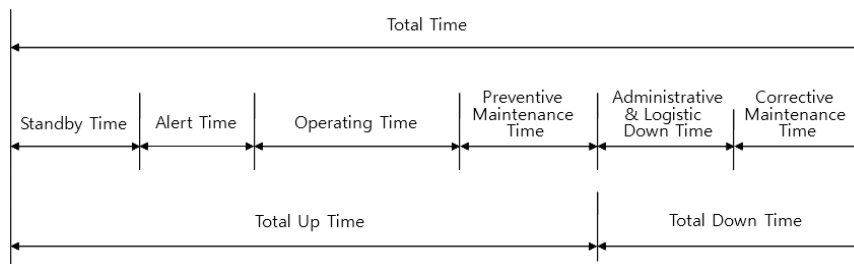
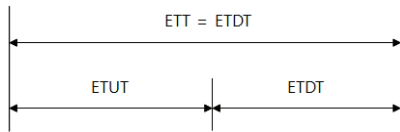


Figure 1. Time Analysis(Go and Choi, 1995)

분석에 의한 무기체계 구조도 정의가 가능하여 식별할 수 있지만 해외로부터 구매하는 무기체계의 경우 이러한 RAM 분석자료 획득이 어렵기 때문에 식 (1)을 직접 적용하는 것은 어렵다. 따라서 국내 연구개발이 아닌 해외구매 무기체계의 경우는 다음과 같은 정의 적용이 필요하다.

정의 1 : 특정부품을 CSP로 확보하지 않아 예상되는 무기체계의 고장시간을 예상고장시간(ETDT)이라 하며, 반대로 특정부품을 CSP로 확보함으로써 무기체계의 가동상태를 보장하는 시간을 예상가동시간(ETUT)이라 한다.

정의 2 : 모든 CSP를 확보하지 않을 경우 예상되는 무기체계의 고장시간을 예상 총 고장시간(ETT)이라 하고, ETT는 모든 CSP를 확보할 경우의 예상 총 가동시간과 동일하며 ETT는 ETUT와 ETDT의 합과 동일하다.



정의 3 : ETDT는 무기체계를 구성하고 있는 전체 부품의 대상기간 동안 발생하는 고장횟수(LCF: Life Cycle Failure)와 부품의 조달기간(LT: Lead Time)을 곱하여 합한 것과 동일하다.

정의 4. ETT와 ETUT, ETDT, 기대가동률(A_E), 기대불가동률(D_E)의 관계는 아래와 같이 표시한다.

$$\begin{aligned}
 ETT &= ETUT + ETDT \\
 1 &= \frac{ETUT}{ETT} + \frac{ETDT}{ETT} \\
 &= A_E + D_E \\
 A_E &= 1 - D_E
 \end{aligned} \tag{2}$$

CSP 적용기간 동안 A_E를 일정 수준 이상 유지하기 위해서는 무기체계에 필요로 하는 적정 CSP를 확보함으로써 달성 가능하며, 반대로 적정 CSP를 확보하지 않을 경우에는 소요량과 실제 선정된 수량의 차이만큼은 부품의 추가 조달이 필요하게 되고 그 시간만큼은 불가동 상태가 되어 A_E는 감소하게 되고 D_E는 증가하게 된다.

3.2 의사결정변수와 목적함수, 제약식

유전자 알고리즘 적용을 위해서는 문제에 대한 정의를 기초로 의사결정변수와 목적함수, 제약식에 대한 수리모형을 설계

해야 하는데 본 연구에 적용된 모형은 다음과 같다.

3.2.1 의사결정변수

의사결정변수는 *i*번째 수리부속을 CSP로 선정할 것인지에 대한 결정과 CSP로 선정된 *i*번째 수리부속의 구매량, 즉 소요량을 정수 형태로 결정하는 단계로 구분하여 적용하였다.

$$s_i = \begin{cases} 1, & i\text{번째 수리부속을} \\ & \text{CSP로 선정} \\ 0, & i\text{번째 수리부속을} \\ & \text{CSP에서 제외} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n \tag{3}$$

먼저 식 (3)으로부터 CSP로 선정되는 수리부속은 ‘1’로, 그렇지 않은 경우는 ‘0’으로 의사결정변수를 표현하였다. 이론적으로 CSP 수량은 *i*번째 수리부속이 일정기간 동안의 무기체계 운용시간 동안 발생하는 고장 횟수(LCF_{*i*})와 동일하며, LCF_{*i*}는 100만 시간당 고장횟수(F_{*i*})와 연간 무기체계 운용시간(OT), 무기체계 구매 수량(N_{*s*}), 무기체계 1대를 구성하고 있는 부품 수량(q_{*i*})에 의해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$LCF_i = \frac{q_i \times F_i \times OT \times N_s}{1,000,000}, \quad i = 1, \dots, n \tag{4}$$

식 (3)과 식 (4)를 이용한 *i*번째 수리부속의 구매량 x_{*i*}는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_i \leq [LCF_i] \times s_i, \quad x_i \geq 0, \text{ 정수} \tag{5}$$

즉, s_{*i*}가 ‘1’인 경우에 x_{*i*}는 [LCF_{*i*}]보다 작거나 같은 정수 값을 갖고, s_{*i*}가 ‘0’인 경우에는 x_{*i*}는 ‘0’이어야 한다.

3.2.2 목적함수

식 (2)로부터 A_E는 다음과 같이 표시되며

$$A_E = \frac{ETT - ETDT}{ETT} \tag{6}$$

식 (6)의 ETT는 ‘정의 2’로부터 $ETT = \sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i$ 인 상수가 되기 때문에 A_E를 최대화하기 위해서는 ETDT를 최소화함으로써 달성할 수 있다.

ETDT는 두 가지의 형태로 구성되는데, *i*번째 수리부속을 CSP로 선정하지 않아 해외로부터 추가 조달에 소요되는 시간(ETDT1)

$$ETDT1 = \sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i \times (1 - s_i) \tag{7}$$

과 식 (5)의 x_{*i*}에 대한 정의로부터 x_{*i*}가 실제 LCF_{*i*} 보다 적어

부족한 만큼 무기체계 가동을 중지하게 되는 시간(ETDT2)이 된다.

$$ETDT2 = \sum_{i=1}^n LT_i \times s_i \times \max(0, (LCF_i - x_i)) \quad (8)$$

따라서 이를 종합한 ETDT는

$$ETDT = ETDT1 + ETDT2 \quad (9)$$

와 같으며, 식 (7)~식 (9)로부터 ETDT를 최소화하는 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \left(\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i \times (1 - s_i) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n LT_i \times s_i \times \max(0, (LCF_i - x_i)) \right) \quad (10) \end{aligned}$$

3.2.3 제약식

- 기대가동률 제약 : 무기체계 전체에 대한 A_E 는 식 (2)와 식 (9)로부터 아래와 같이 정의될 수 있으며,

$$\begin{aligned} A_E &= 1 - D_E \\ &= 1 - \frac{ETDT1 + ETDT2}{ETT} \\ &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i} \times \left(\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i \times s_i \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^n LT_i \times s_i \times \max(0, (LCF_i - x_i)) \right) \quad (11) \end{aligned}$$

A_E 는 목표 기대가동률(A_0) 이상 유지되어야 하기 때문에 기대가동률 제약식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i} \times \left(\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i \times s_i \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^n LT_i \times s_i \times \max(0, (LCF_i - x_i)) \right) \geq A_0 \quad (12) \end{aligned}$$

- 비용제약 : 식 (5)에서 결정된 x_i 에 대한 CSP 구매 총 비용 (B)은 다음과 같으며

$$B = \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (13)$$

B 는 수리부속 구매 가용예산(B_A) 이하로 유지되어야 하기 때문에 비용제약식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n p_i x_i \leq B_A \quad \text{for } x_i \geq 0 \quad (14)$$

지금까지 유전자 알고리즘 적용을 위한 수리모형 설계 결과를 종합하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \left(\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i \times (1 - s_i) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n LT_i \times s_i \times \max(0, (LCF_i - x_i)) \right) \end{aligned}$$

subject to

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i} \times \left(\sum_{i=1}^n LCF_i \times LT_i \times s_i \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^n LT_i \times s_i \times \max(0, (LCF_i - x_i)) \right) \geq A_0 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n p_i x_i \leq B_A$$

$$x_i \leq \lceil LCF_i \rceil \times s_i$$

$$x_i \geq 0 \text{ and 정수}$$

$$s_i = \begin{cases} 1, & i\text{번째 수리부속을} \\ & \text{CSP로 선정} \\ 0, & i\text{번째 수리부속을} \\ & \text{CSP에서 제외} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n$$

4. 해법 절차 및 유전자 알고리즘 설계

4.1 해법절차

본 연구에서는 목적함수와 기대가동률 제약식에 max 함수와 같은 비선형식이 포함되어 있어 비선형정수계획법에 해당되며, 대부분의 무기체계는 대량의 부품으로 구성되기 때문에 부품의 종류가 증가할수록 계산의 복잡성은 기하급수적으로 증가하여 기존의 수리적 해법으로 풀기가 어렵다. 그러나 제안된 수리모델의 의사결정변수는 s_i 와 x_i 인데 s_i 는 0과 1의 간단한 이진비트스트링 구조로 해의 표현이 용이하고, x_i 는 s_i 의 결정여부에 따라 $[0, \lceil LCF_i \rceil]$ 사이의 정수값으로 배정할 수 있으므로 하나의 해에 대해 탐색체로 잘 표현될 수 있어 향후 적용의 확장성이 용이하며, 기대가동률과 비용 제약조건을 충족하는 모든 가능한 대안 중 최적해를 구할 수 있는 장점을 가지는 유전자 알고리즘을 도입하였다.

유전자 알고리즘을 적용하기 전에 대상 부품 중 유전자 알고리즘을 적용하지 않는 부품은 Pre-processing 단계에서 제외하는 절차가 필요하다. CSP 소요 산정 기준요소 중 주기적인 교환 품목과 일정기간 사용 후 교환해야 하는 시한성 품목은 CSP 적용기간 동안의 소요량을 계산하여 산정하고, 1회 이상 소요가 예상되지는 않으나 예기치 않은 소요 발생시 무기체계 운용이나 안전에 심각한 영향을 주는 품목(j)도 유전자 알고리즘에 포함하지 않고 Pre-processing 절차에 따라 식 (5)와 $x_j = [LCF_j]$ 에 의해 소요량을 계산한 후, 다음과 같이 구매를 위한 가용예산(B_A)에서 제외하였다.

$$B_A^* = B_A - \sum_{j=1}^l p_j x_j, \quad \text{for } x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, l \quad (15)$$

따라서 실제 유전자 알고리즘에 적용되는 가용예산(B_A^*)은 식 (14)에 적용되는 가용예산(B_A)보다 적어 비용측면에서 큰 제약이 되도록 하였다. <Figure 3>은 본 연구의 문제 해결을 위한 절차를 제시하고 있다.

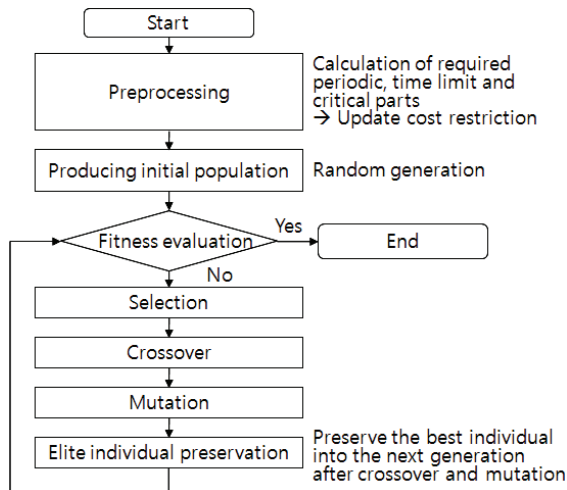


Figure 3. Procedure of genetic algorithm for CSP calculation

4.2 유전자 알고리즘 설계

4.2.1 해의 표현

• 수리부속 선정

유전자 알고리즘을 설계하기 위한 첫 단계이면서 가장 중요한 단계는 해의 표현, 즉 염색체의 설계이다. 본 연구에서는 해당 무기체계를 구성하고 있는 전체 수리부속 수만큼의 1차원 배열 구조로 해를 표현하되, CSP 소요량은 수리부속이 CSP로 선정여부에 따라 결정되기 때문에 먼저 CSP로 선정되는 수리부속을 '1'로 그렇지 않은 경우는 '0'으로 유전자를 표현하였

으며 수리부속 선정여부는 전체 수리부속에서 임의의 수리부속 LCF 값을 선정하여 $r = LCF$ 로 부여한 후 $r \leq LCF_i$ 이면 '1', $r > LCF_i$ 이면 '0'으로 부여하였다.

• CSP 소요량 결정

CSP로 선정된 수리부속에 대해 소요량을 결정하는 단계이다. CSP 소요량은 각 유전자별 휴리스틱 방법을 적용함으로써 유전자 알고리즘에서 기대가동률 제약과 비용 제약의 Trade-off 관계에서 최적점을 찾을 수 있도록 랜덤하게 부여하였다.

수리부속 선정 후 CSP 소요량을 결정할 때 단순히 $x_i = [LCF_i]$ 로 결정한다면 A_E 는 좋아지지만 B 가 높아지는 문제가 발생하고, $x_i = [LCF_i]$ 로 결정한다면 A_E 는 악화되는 반면 B 는 절감되기 때문에, A_E 와 B 의 절충적 측면에서 x_i 의 결정은 식 (16)을 이용하여 각 유전자별 임의의 난수(m_i)와 기준값(k_i)을 비교하여 $m_i \geq k_i$ 이면 $x_i = [LCF_i]$ 로 결정하고, $m_i < k_i$ 이면 $x_i = [LCF_i] - 1$ 로 결정하였다.

$$x_i = \begin{cases} [LCF_i], & m_i \geq k_i \\ [LCF_i] - 1, & m_i < k_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, \dots, n \quad (16)$$

또한 $LCF_i \leq 1$ 인 경우 x_i 를 결정할 때 임의의 난수(m_i)가 기준값(k_i) 이하가 되면 $x_i = 0$ 으로 결정되기 때문에 s_i 를 '0'으로 배정하는 단계가 추가로 필요하다. 이는 CSP로 수리부속이 선정되었다 할지라도 휴리스틱에 의해 결정된 x_i 가 '0'으로 된다면 실제 CSP로 선정되지 않은 것과 동일하기 때문에 $s_i = 0$ 으로 표현할 필요가 발생하는 것이다.

4.2.2 초기 모집단 생성

초기 모집단의 수만큼 각 유전자를 생성하는 단계로 위의 수리부속 선정과 CSP 소요량 결정 과정을 반복적으로 수행하여 초기 모집단을 생성한다. 일정범위내에서 난수를 발생시켜 수리부속 선정 염색체의 각각의 유전자에 대해 LCF_i 가 임의의 수리부속 LCF 값보다 크면 '1', 작으면 '0'으로 부여하여 생성하고, 수리부속 선정 염색체가 생성되면 CSP 소요량 결정 염색체는 <Figure 4>의 절차에 의해 생성하며, 이를 모집단 수만큼 반복한다. 이때 실행 불가능한 개체도 해의 다양성 유지를 위해 적합도 함수에 패널티를 부여하는 방식으로 처리하여 다음 세대에서는 선택될 수 있도록 하였다.

4.2.3 적합도 평가

CSP 소요 산정은 가용예산 제약 범위내에서 예상 고장시간 최소화 문제이다. 따라서 목적함수 값이 작으면 작을수록 적합도 값은 높아지도록 하였다. 적합도 함수식은 수리부속으로

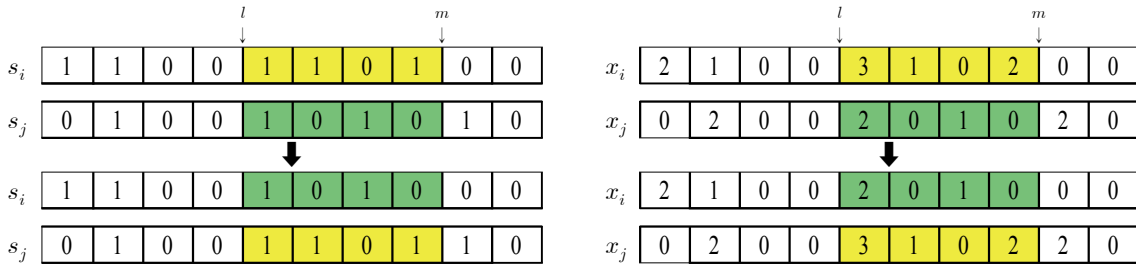


Figure 5. Crossover

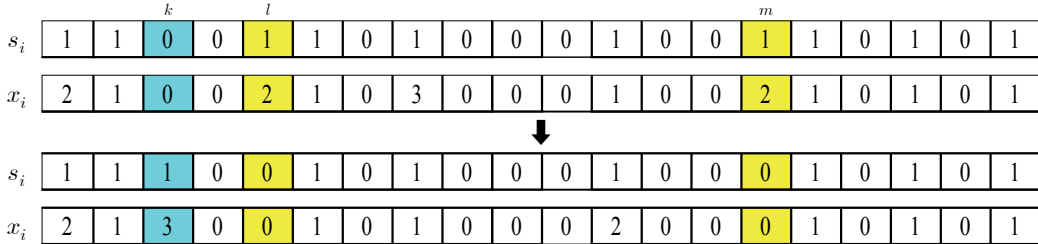


Figure 6. Mutation

돌연변이를 위해 먼저 [0, 1]사이의 임의의 수를 생성하여 돌연변이 대상 염색체의 유전자가 돌연변이 확률 이내인 경우 유전자의 값이 '0'이면 '1'로, '1'이면 '0'으로 변환하는 방법으로 돌연변이 연산을 수행하였다.

<Figure 6>과 같이 s_i 염색체 중 돌연변이 확률이내에 있는 유전자는 s_{ik} , s_{il} , s_{im} 이 되며, 이중 유전자 s_{ik} 는 '0'에서 '1'로 변경되기 때문에 x_{ik} 는 초기 모집단 생성시 x_i 생성 방법과 동일한 방법의 휴리스틱을 적용하여 생성하며, s_{il} 과 s_{im} 은 '1'에서 '0'으로 변경되기 때문에 x_{il} 과 x_{im} 역시 각각 '0'으로 변경되도록 하였다.

4.2.7 엘리트 보존 및 대치 연산

교배 연산과 돌연변이 연산 수행 후 생성된 새로운 유전자에 대해서 적합도를 평가하여 이중 적합도가 가장 높은 유전자는 다음 세대에도 유지하도록 하였으며, 해 공간의 확장과 수렴성을 완화시키기 위하여 적합도 평가 결과 하위 35%의 개체에 대해서는 새로운 개체로 대치하였다.

4.2.8 알고리즘 종료

유전자 알고리즘의 종료 조건은 일정 세대 동안 해의 개선이 이루어지지 않는 경우에 종료하도록 하였다.

5. 실험 및 결과 분석

5.1 실험 환경

알고리즘 구축 및 실험에 적용한 각 부품의 고장률과 가격,

조달기간 등은 2007년 방위사업청 OOO사업의 사업자로 최종 선정된 스웨덴 소재 S사의 LCN(Logistic Configuration Number) 자료에서 추출하였으며, 이를 MATLAB 7.1에서 사용할 수 있도록 데이터베이스로 구축하였으며, 부품 수량은 향후 적용의 확장성을 고려하여 상수값으로 지정하지 않았다.

MATLAB 7.1의 M-file을 이용하여 메인 프로그램을 작성하였으며, 유전자 연산자들에 대해서는 별도의 함수문을 작성하여 진화가 계속 진행되는 동안 메인 프로그램에서 읽어와 처리할 수 있도록 하였다. 유전자 알고리즘 주요 파라미터들은 메인 프로그램에서 입력하도록 하였으며, Preprocessing에 해당하는 부분은 유전자 알고리즘 구동 이전에 읽어와 처리하도록 하였다.

5.2 최적 제어 파라미터 값 결정

유전자 알고리즘의 최적 제어 파라미터 값을 결정하기 위하여 모집단의 크기, 교배 비율, 돌연변이 확률, 대치 비율 순으로 수행을 반복하여 각각의 단계에서 최상의 성능을 발휘하는 제어 파라미터 값을 결정하였다. 각각의 제어 파라미터 값을 결정하기 위하여 반복 수행에 필요한 임의의 기준 제어 파라미터 값을 <Table 1>과 같이 부여하였으며, 특정 제어 파라미터 값을 결정할 때는 다른 제어 파라미터 값들은 고정된 상태에서 실험을 하였다. 제어 파라미터 값 결정을 위한 실험의 횟수는 각각 10회를 시행하여 평균을 측정하여 비교하였다.

5.2.1 모집단 크기

모집단의 크기가 너무 작으면 해 공간에 대한 탐색 범위가

Table 1. Genetic algorithm control parameters

Parameters	Population size	Crossover rate	Mutation probability	Substitution rate
Initial values	100	85%	5%	25%

작아져서 Local Optimum으로 빠지기 쉽고, 모집단의 크기가 너무 크면 최적해를 찾는데 필요한 계산 시간이 오래 걸린다. 본 연구에서는 모집단의 크기를 20~200까지 20씩 증가시키면서 유전자 알고리즘이 최적해를 찾는 데 필요한 수행횟수를 측정한 결과 <Figure 7>과 같이 모집단 크기는 160일 때 가장 좋은 성능을 보였다.

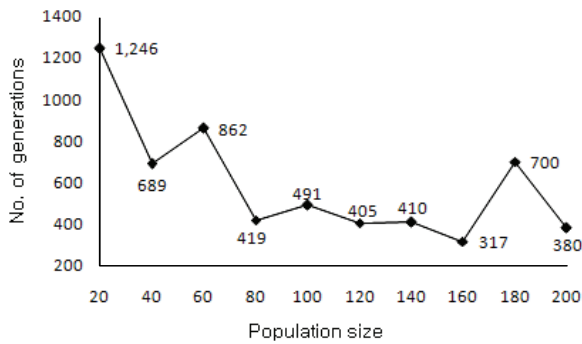


Figure 7. Population size and performance

5.2.2 교배 비율

최적해를 찾기 위하여 모집단의 개체 중 얼마만큼의 개체에 대해 교배 비율을 적용할 것인지를 결정하는 것으로 비율을 15%~95%까지 10%씩 변화시키면서 실험한 결과 45%일 때 가장 좋은 성능을 보였다. 교배 비율의 변화에 따른 유전자 알고리즘의 수행 횟수에는 큰 차이가 없었는데, 이는 진화 초기에는 대부분 빠른 수렴을 보였지만 진화가 계속되는 동안 교배 연산은 염색체간 서로 닮아가게 되어 교배 비율을 높여도 다양성에는 큰 변화가 없었다. 이는 교배 비율의 변화가 진화 초기 어느 정도 영향을 미치지만 일정 수준의 진화 이후에는 오히려 다른 연산에 의한 결과에 따라 수행 횟수에 영향을 미쳤기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 <Figure 8>의 결과에 따

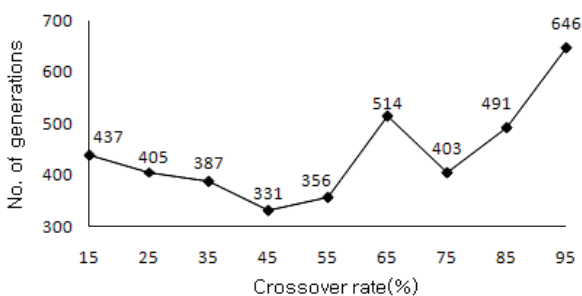


Figure 8. Crossover rate and performance

라 전체 모집단 중 45% 염색체에 대해서만 교배 연산을 적용하였다.

5.2.3 돌연변이 확률

각 유전자에 돌연변이가 발생할 확률을 0.5~5% 사이에서 유전자 알고리즘의 수행횟수를 계산하였다. 확률이 0.5~1.0% 사이에서는 유전자의 다양성이 떨어져 최적해를 탐색하는데 오랜 시간이 소요되었으며, 실험별 수행 횟수 간에도 300번 이하~10,000번 이상의 큰 차이가 생겨서 본 연구에 적용하기 위한 돌연변이 확률은 1.5~5%까지 0.5%씩 증가시키면서 성능을 확인한 결과 <Figure 9>와 같이 3%에서 가장 좋은 결과를 보였다.

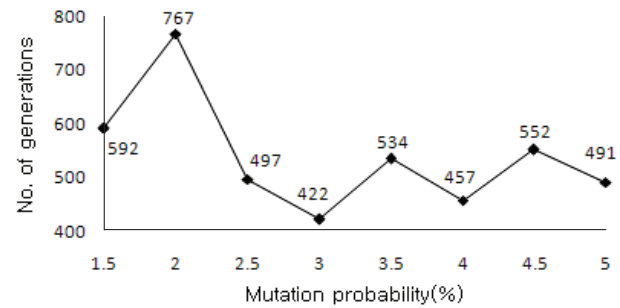


Figure 9. Mutation probability and performance

5.2.4 대치 비율

대치 비율은 적합도 값이 낮은 염색체를 새로운 염색체와 대치하는 비율을 정하는 것으로 적합도 평가 결과 하위 10%에서 50%까지 5% 단위로 증가시키면서 염색체를 대치하였다. 대치 비율을 어느 정도 적용하느냐는 유전자 알고리즘 성능을 크게 좌우하는 부분이 된다. 대치 비율이 낮으면 열성 유전자를 지닌 염색체라 할지라도 다음 세대에도 유지될 가능성은 높지만 해 공간의 다양성을 높이지 못하게 되며, 비율을 높게 되면 우성 유전자를 가진 염색체를 잃어버릴 가능성이 높아 최적해 탐색을 위한 수행 횟수가 증가하게 된다. 실험 결과 <Figure 10>과 같이 하위 35%에 해당하는 염색체를 새로운 염색체로 대치할 때 가장 좋은 성능을 보였다.

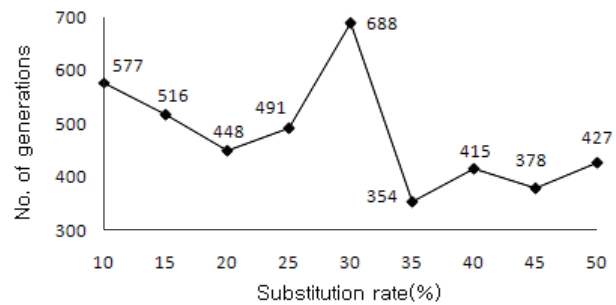


Figure 10. Substitution rate and performance

실험을 통하여 최적 제어 파라미터 값을 결정하기 위한 결과는 <Table 2>에 제시하였다.

Table 2. Result of best control parameter values

Parameters	Population size	Crossover rate	Mutation probability	Substitution rate
Values	160	45%	3%	35%

5.3 결과 분석

가용 예산 범위와 무기체계의 기대가동률을 만족하는 해를 구한 결과 유전자 알고리즘은 무기체계 목표 기대가동률을 달성하면서 가용예산 범위내에서 CSP 목록과 수량을 최적화하였다. <Table 3>은 방위사업청에서 2006년~2007년 간 해외로부터 무기체계를 구매하기 위해 각 장비별 기존 방법에 의한 CSP 산정 결과와 본 연구에서 적용한 유전자 알고리즘 적용 결과에 대한 성능 비교를 나타내고 있다. 비교 방법은 OPUS10 (Systecon AB, 2005) 등 제안업체에서 자체적으로 개발하여 산정한 CSP 구매 비용을 본 연구의 유전자 알고리즘 비용제약으로 적용하여 제안업체에서 사용한 기존 방법과 유전자 알고리즘에 의한 방법을 각 Case별로 비교하여 성능이 어느 정도 향상되는지를 확인하였다.

Case 1은 앞의 유전자 알고리즘 최적 제어 파라미터 값 결정을 위해 사용한 경우로써 총 178종의 대상부품 중 기존 방법 (Systecon AB, 2005)은 122종의 부품을 추천하였지만 유전자 알고리즘은 107종의 부품을 선정하였음에도 불구하고 기대가동률은 98.1%를 보여 비용측면에서는 약 0.68%의 절감효과를, 기대가동률 측면에서는 14.2%의 성능개선 효과를 보였다.

Case 2는 대부분의 부품이 1~10개 이하로 구성되는 반면,

이 장비는 특정 부품이 256개와 316개, 1008개 등으로 구성되었을 경우 기존방법(제안업체 자체 산정 방법)과 유전자 알고리즘간의 성능을 비교한 것이다. 대상부품은 총 93종으로 기존방법은 76종, 유전자 알고리즘은 68종을 선정하였으며, 비용은 기존방법보다 적게 소요되는 반면 기대가동률은 무려 66.7%의 향상을 보였다.

Case 3의 경우는 조달기간 대신 부품 고장시 수리시간을 적용할 경우 CSP 산정 결과를 비교한 것이다. 대상부품 228개 중 기존방법(제안업체 자체 산정 방법)은 75개를 선정하였으며, 유전자 알고리즘은 가용예산 제약하에서 149개를 선정하여 기대가동률은 90.7%로 기존방법보다 50.6%의 성능 향상을 보였다.

3가지 Case에 대한 유전자 알고리즘 적용 결과, 가용예산 범위내에서 최상의 기대가동률을 유지하기 위해 최적화된 수리부속을 선정하는 것을 알 수 있었으며, 가용예산이 허용될 경우 기대가동률을 최대화하기 위해 유전자 알고리즘은 기존방법에 의한 CSP 수량보다 많은 CSP를 선정하는 것을 Case 3을 통하여 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 유전자 알고리즘은 제안업체로부터 무기체계에 대한 충분한 정보를 확보하지 않은 상태에서도 제안서에 제공된 기본적인 자료를 이용하여 제한된 비용으로 달성하고자 하는 기대가동률을 최대한 충족할 수 있는 최적해를 찾아내었음을 알 수 있었다.

6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 방위력개선사업 분야 중 국외구매 무기체계에 대한 CSP 소요 산정 문제에 대해 무기체계를 구성하고 있는 수리부속의 고장 횟수와 고장 발생시 조달기간, 부품 단가를

Table 3. Comparison of performance between current and GA methods

		Current method	Generic algorithm	Improvement
Case 1 : Sweden S Company OO System	Number of target spare parts	178		-
	Number of CSP selection	122	107	-
	Required cost(\$)	1,778,085	1,765,974	△0.68%
	Expected availability(%)	83.9	98.1	14.2
Case 2 : Israel E Company □□ System	Number of target spare parts	93		-
	Number of CSP selection	76	68	-
	Required cost(\$)	7,005,900	6,992,150	△1.96%
	Expected availability(%)	27.2	93.9	66.7
Case 3 : United States T Company △△ System	Number of target spare parts	228		-
	Number of CSP selection	75	149	-
	Required cost(\$)	1,321,054	1,291,916	△2.21%
	Expected availability(%)	40.1	90.7	50.6

이용하여 대상기간 동안의 예상되는 소요량을 예산 제약 조건에서 기대가동률을 최대화할 수 있도록 CSP 선정 수리모형과 이를 활용한 유전자 알고리즘을 제시하였다.

국외구매 무기체계는 도입 초기 군수지원 체계가 구축되지 않은 상황에서 부품 고장 발생시 수리시간 동안 무기체계 가동상태가 정지되는것 뿐만 아니라 해당 부품을 해외로 운반하여 수리 후 다시 국내로 복귀하는데 소요되는 전체 시간동안 장비 불가동상태가 된다. 본 연구에 적용된 유전자 알고리즘은 무기체계 기대가동률에 대한 개념적 정의를 새롭게 하여 일반적으로 적용되는 수리시간의 개념이 아닌 부품 고장에 의한 실제 무기체계 불가동상태를 분석하여 CSP 최적해를 산출하였다.

보다 효율적인 CSP 산정을 위해서는 국외구매 사업 협상시 부품의 고장 횟수에 대한 자료 뿐만 아니라 수리시간, 실질적인 조달기간, 시스템 기능도에 의한 부품 고장 발생시 무기체계에 미치는 치명성 등에 대한 자료를 요구하여야 하겠다. 본 연구에서 적용된 부품의 조달기간은 대부분 6개월 또는 12개월로 제시되어 있어 실제 CSP 소요 산정에 제한이 있었다.

향후 연구에서는 본 연구를 통하여 개발된 모형에 추가하여 최대 월단위 또는 주단위의 조달기간 조정 적용과 고장발생의 경우 무기체계에 치명적 영향을 미치는 부품이 포함된 CSP 소요 산정을 추가하여 실제 국외구매 무기체계에 대한 군수지원 환경과 유사한 모델링을 설계하고, 중간 Depot 구축을 통한 장기간 조달기간 소요 부품과 치명성 영향 부품의 적정 재고 유지를 통한 CSP 재고량 산정과 이에 대한 유지비용 예측 모형 등을 연구할 수 있겠다. 또한 개발된 모형이 기존의 NP-hard 최적화 문제 중 어느 종류의 문제로 환원될 수 있는지와 이에 대한 증명 문제도 추가 연구할 분야가 될 수 있겠다.

참고문헌

ADD. (2006), *OASIS Model for CSP Estimation*, Agency for Defense Development (ADD), Daejeon, Korea.

DAPA. (2009), *Guideline for Integrate Logistic Support Development*, Defense Acquisition Program Administration(DAPA), Seoul, Korea.

Go, S. J. and Choi, S. Y. (1995), *RAM Theories and Applications for Weapon Systems*, Korea National Defense University, Seoul, Korea.

Kim, Y. H., Chong, I. G., and Jun, C. H. (2001), Determining the Proper Level of Concurrent Spare Parts under Budget Constraint, *IE Interfaces*, **14(3)**, 286-295.

Lau, H. C., Song, H., See, C. T., and Cheng, S. Y. (2006), Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation, *European Journal of Operational Research*, **170**, 91-105.

Lee, L. H., Chew, E. P., Teng, S., and Chen, Y. (2008), Multi-objective simulation-based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem, *European Journal of Operational Research*, **189**, 476-491.

Marseguerra, M., Zio, E., and Podofillini, L. (2005), Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation, *Reliability Engineering and System Safety*, **87**, 325-335.

Park, M. S. and Ryoo, Y. (2002), A Multi-Echelon Inventory Model for the Concurrent Spare Parts in Military Application, *Korean Management Review*, **31(2)**, 295-311.

Systecon, A. B. (2005), *Introducing OPUS10.pdf*, http://www.systecon.se/case/file_downloads, Stockholm, Sweden.

Wu, M. C. and Hsu, Y. K. (2008), Design of BOM configuration for reducing spare parts logistic costs, *Expert Systems with Applications*, **34**, 2417-2423.

Yoon, K. B. and Sohn, S. Y. (2007), Finding the optimal CSP inventory level for multi-echelon system in Air Force using random effects regression model, *European Journal of Operational Research*, **180**, 1076-1085.