

가용도 제약하에 시뮬레이션과 메타 휴리스틱을 이용한 MIME 시스템의 수리수준 및 수리부속 할당 동시 최적화*

정일한** · †윤원영*** · 김호균****

Simultaneous Optimization of Level of Repair and Spare Parts
Allocation for MIME Systems under Availability Constraint
with Simulation and a Meta-heuristic

Ilhan Chung** · †Won Young Yun*** · Ho Gyun Kim****

■ Abstract ■

In this paper, an analysis problem of repair levels and spare part allocation for MIME(Multi indenture multi echelon) systems is studied using simulation and meta-heuristics. We suggest a method to determine simultaneously repair levels and spare parts allocation to minimize the life cycle cost of MIME system under availability constraint. A simulated annealing method is used to analyze the repair levels and genetic algorithm is used to obtain the optimal allocation of spare parts. We also develop a simulation system to calculate the life cycle cost and system availability. Some numerical examples are also studied.

Keywords : Simulation, LORA, MIME, Meta-heuristic

논문접수일 : 2008년 06월 18일 논문수정일(1차 : 2008년 11월 13일, 2차 : 01월 09일)

논문게재확정일 : 2009년 01월 20일

* 이 연구는 일부 “2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(지방연구중심대학육성사업/차세대물류IT기술연구사업단).

** 현대로템(주) 기술연구소 체계공학팀

*** 부산대학교 산업공학과

**** 동의대학교 산업경영공학과

† 교신저자

1. 서 론

신규 무기체계 또는 시스템이 개발되어 운용에 들어가기 전에 시스템의 가용성을 유지시키기 위해 수리정책을 수립하게 된다. 수리정책을 개발할 때에는 개발자의 기술적 판단, 정비/보급부대의 지리적 요소와 정책 결정자의 판단 등과 같은 정성적인 요인과 수리정책별 수리부속, 정비요원, 정비장비 및 시설 등과 같은 정량적인 요인들이 함께 고려되어진다.

특히, MIME 시스템은 운용 시스템과 정비/보급 시스템이 몇 개의 수준으로 구성되어 있다. 시스템을 구성하는 품목은 정비 관점에서 LRU(Line Replaceable Unit)와 그 외 품목으로 구분 되어진다. 또한, 군수의 경우 정비계단은 최상위 정비장에서 최하위계단인 부대까지 몇 개의 계단으로 구성되어 있으며, 각 정비계단별 부대는 각각의 정비자원을 보유하고 있다. 이러한 유형은 군수와 민수에서 유사하게 적용 되어지고 있다.

품목이 어느 정비계단에서 교환/수리되는지는 완제품의 가용도에 영향을 줄 뿐만 아니라, 품목에 대한 수리부속 할당과도 연계가 되어 있어 비용과도 직결된다. 따라서 각 품목에 대한 적합한 수리수준 분석은 시스템의 가용도를 향상시키고, 비용을 절감하는데 중대한 역할을 한다.

MIME 시스템에 대하여 과거 연구에서는 수리수준과 수리부속 할당을 별개로 하여 최적화를 수행하였다. MIME 시스템에서 수리부속 할당과 관련된 최적화 모형은 Shebrooke[9]에 의해 기초 모형이 수립되었으며, Slay[10]와 Graves[6] 등을 통해 발전되었다. 또한, 정일한과 윤원영[2]에서는 MIME 시스템에서 시뮬레이션과 GA를 사용하여 수리부속 할당 최적화 문제를 다루었다. 그러나 최적화 과정에서 각 품목별 수리수준이 고정되어 있어, 수리수준이 변경될 경우 수리부속 할당을 다시 수행해야 하는 문제점을 갖고 있다.

수리수준분석과 관련해서는 문제의 복잡성으로 인해 많은 연구가 수행되지 못하였다. Alfredsson

[3]는 주변분석(marginal analysis)을 이용하여 수리부속 수량과 수리수준, 테스트 장비를 동시에 분석하는 수학적 모형을 제시하였다. 그러나 문제를 단순화 시키기 위해 각 결정사항에 많은 가정을 기반으로 분석하였다. Barros and Riley[4]는 수리수준 분석을 위해 정수계획법 모형을 제시하였으며, 해를 찾기 위해 분지 한계법(branch and bound) 기법을 사용하였다. Gutin et al.[7]은 Barros and Riley[4]가 다룬 문제를 이분 그래프(bipartite graph)를 이용하여 다항(polynomial) 시간 내에 해를 찾을 수 있음을 증명하였다. Brick and Uchoa[5]는 정비자원과 설비 배치에 대해 혼합정수계획법으로 모형화하고 CPLEX로 해를 찾는 것을 나타냈었다.

기존의 수리수준과 관련된 연구에서는 수리적인 분석에서 비용을 중심으로 분석을 수행하였으며, 수리적인 복잡성으로 인해 1) 비대칭형 정비계단, 2) 운용 가용도의 미 고려, 3) 운용 시스템 구성품의 단순화, 4) 수리부속 할당의 동시 결정 등을 고려하지 못하였으며, 운용 시스템의 측면에서는 1) 시스템 고장 시 LRU 중심 정비, 2) 고장 분포의 단순화, 3) 정비지연시간의 고려 등을 역시 고려할 수 없었다. 이러한 문제점은 수리수준과 수리부속 할당을 동시에 결정하는데 있어 문제의 복잡성을 증가시켜 최적화를 불가능하게 하였다.

수리부속과 수리수준 할당이 동시에 결정하지 못하여 1) 수리부속 할당만을 먼저 결정할 경우에는 수리수준이 변경될 경우에 수리부속 할당을 다시 결정해야 하는 문제가 발생하게 되며, 2) 수리수준 분석 시 수리부속 할당을 제외하게 되면, 수리부속으로 인해 발생하는 가용도와 비용을 고려하지 못해 최적화된 수리수준을 얻을 수 없다.

본 연구에서는 시뮬레이션과 메타 휴리스틱을 이용하여 수리적인 방법에서 다루지 못한 다양한 가정을 해결하고, 수리수준과 수리부속 할당을 동시에 결정하고자 한다. 제시되는 모형은 다 계층으로 이루어진 현실적인 시스템을 다루면서 정비/보급에서 다루지는 다 계단 모형을 가용도 제약하에 수리부속 할당과 수리수준을 동시에 분석한다. 이

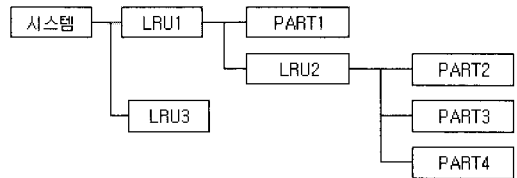
를 위해 품목별 수리수준 분석에서는 SA를 사용하고, 한 개의 수리수준 이웃 해에 대한 수리부속 할당 최적화를 위해 정일한과 윤원영[2]에서 사용된 GA을 활용한다. 또한, MIME 시스템의 운용 가용도와 수명주기 동안의 비용을 계산하기 위해 시뮬레이션을 활용한다.

2. MIME 시스템의 구조와 수리/보급 정책

2.1 품목 모형

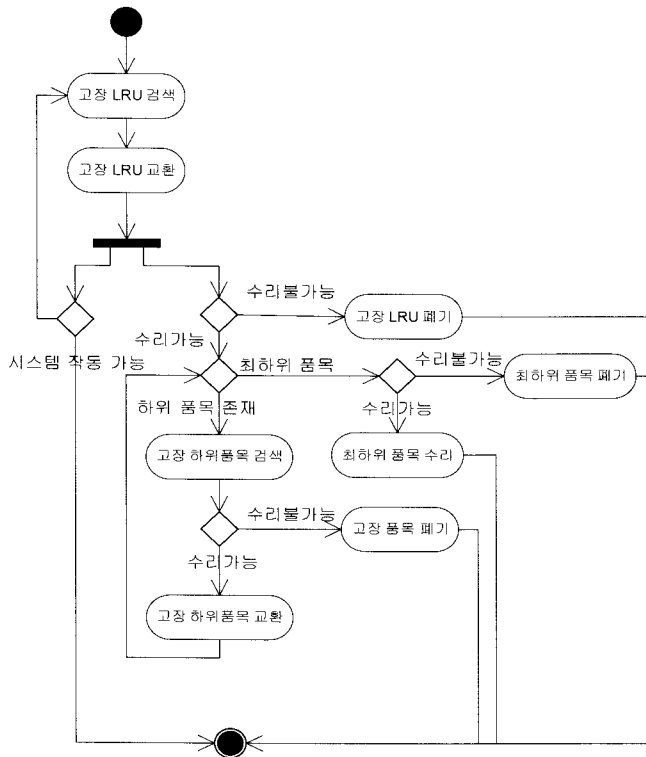
품목은 계층적 구조 측면에서 시스템, 서브어셈블리, 최하위 품목과 같이 3가지로 분류되며, 시스템의 정비 측면에서 LRU(Line Replaceable Unit)와 그 외 품목으로 분류한다. 최하위품목은 해당 품목의 하위 보다 낮은 계층을 가지고 있지 않은

품목이며, 시스템과 최하위품목을 제외한 품목은 서브어셈블리로 분류된다. 같은 부모를 가지는 품목들간의 관계는 직렬, 병렬, 대기, k-out-of-N 등의 신뢰성 구조를 가진다.



<그림 1> 시스템 구조

LRU는 시스템에서 바로 탈거가 가능한 품목으로 시스템에 고장이 발생하였을 경우 시스템의 상태를 복구하기 위해서 LRU의 교체가 이루어진다. 따라서 계층적 구조 측면에서 LRU는 서브어셈블리와 최하위 품목 모두가 될 수 있다. <그림 2>는

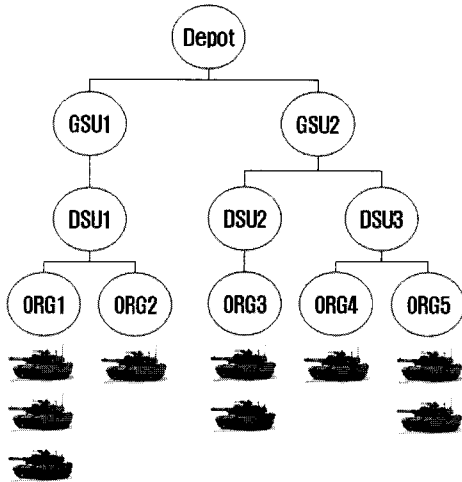


<그림 2> 시스템 및 품목 복구 절차

시스템 및 품목의 복구 절차를 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 시스템의 복구는 고장 난 LRU의 교환을 통해서 이루어지며, LRU의 수리는 고장 난 하위 품목의 교환을 통해 이루어진다.

2.2 정비/보급 모형

한 개의 부대에서 정비와 보급이 같이 이루어진다. 부대의 구조는 2~4계단으로 구성할 수 있으며, 최상위 계단은 군수에서는 창(Depot), 민수에서는 중앙창고(Central distribution center) 역할을 수행하게 된다. 또한, 최하위 계단은 완제품이 운용되는 계단이 된다. 2~4계단의 구성은 <그림 3>에서 보는 것과 같이 비대칭형으로 표현될 수 있다. 예를 들어, 군수에서는 정비계단을 창(Depot), 일반지원정비(GSU), 직접지원정비(DSU), 최하위 운용부대(ORG)로 표현한다. <그림 3>의 경우에 GSU1은 DSU1에서 요청하는 정비와 보급을 지원하게 되며, GSU2는 DSU2와 DSU3을 지원하게 된다.



<그림 3> 정비/보급 부대 구조[2]

최하위 부대인 ORG에는 완제품이 배치되게 되며, 각 완제품의 배치수는 부대별로 다르게 배치될 수 있다. 따라서 각 최하위 부대에서 발생하는 고장과 정비 빈도가 다르게 되며, 빈도의 차이에 의

해 각 부대에서 요구되는 정비자원수도 다르게 적용되어야 한다. 또한, 정비/보급체계가 비대칭형으로 구성됨으로써 중간 수준의 정비/보급 부대에 요청되는 정비와 보급 요청 빈도 역시 각 부대별로 차이가 발생하게 된다. 예를 들어 DSU1의 경우 ORG1과 ORG2를 지원하게 되어 간접적으로 완제품 4대를 지원하게 된다.

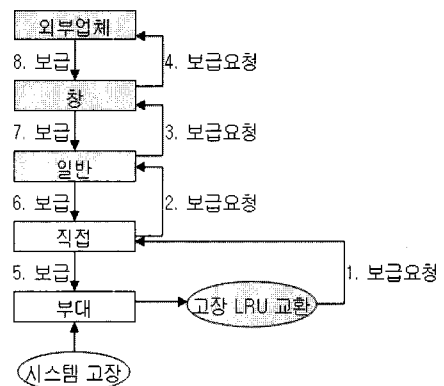
각 정비/보급 부대는 각 부대의 정비 업무가 정해져 있다. 예를 들어, <그림 1>에서 LRU1, LRU2, PART1에 대한 정비는 <표 1>의 정비계단에서 수행 된다. 즉, 시스템 수리를 위한 LRU1의 교환계단은 ORG, LRU1의 수리를 위해서 PART1의 교환은 DSU에서 수리는 GSU에서 수행된다.

<표 1> 품목의 정비 계단 정보

품목	교환계단	수리계단
LRU1	ORG	-
LRU2	ORG	-
PART1	DSU	GSU

2.3 수리부속보급 모형(재고 정책)

수리부속의 보급은(S-1, S) 재고 정책을 따른다. 각 정비/보급 부대는 초기에 각 정비/보급부대에서 유지하기를 원하는 수리부속품별로 S개를 보유하게 된다.



<그림 4> 수리부속보급 절차[2]

<그림 4>에서와 같이 고장 난 LRU를 교환함으로써 인해 부대에서의 수리부속이 1개 사용된 경우에는 바로 상위 계단의 부대에 수리부속을 요청하게 된다. 이때 부대에 수리부속은 현 보유 재고(On hand stock) 이외에 보급 예정인 수리부속(pipeline 내의 수리부속)이 존재하게 된다. 보급 예정인 수리부속은 바로 사용할 수는 없지만, 현재 보급중인 수리부속으로 상위부대로부터 운송 중이거나, 또는 현재 부대 내에서 수리중인 수리부속을 의미한다. 따라서, 해당 부대는 수리 중이거나 운송 중인 수리부속과 현재 보유한 수리부속 수량의 합이 'S'보다 적을 경우 상위 부대에 수리부속을 요청하게 된다.

3. 시물레이션 모형

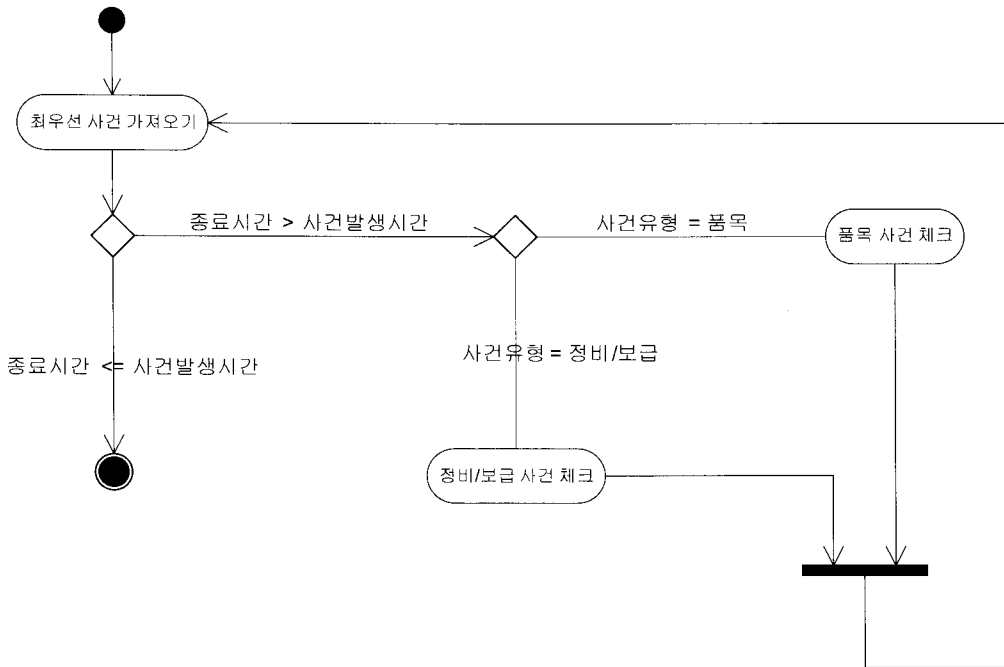
시물레이션은 MIME 시스템의 운용 가용도와 비용을 산출하기 위해서 사용된다. 시물레이션 설계를 위해서 객체지향 방법을 사용하였으며, Visual

C++ 8.0을 통하여 개발되었다. 최적화 알고리즘에서 선정된 이웃해인 수리수준과 정비계단 별 각 수리부속 수량은 시물레이션에 입력되어 시물레이션에서 산출되는 운용 가용도와 각종 비용에 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 최적화 과정에서 수행되는 시물레이션 모형을 나타내며, 시물레이션에서 발생하는 각 객체별 사건과 사건의 처리 방식을 나타낸다.

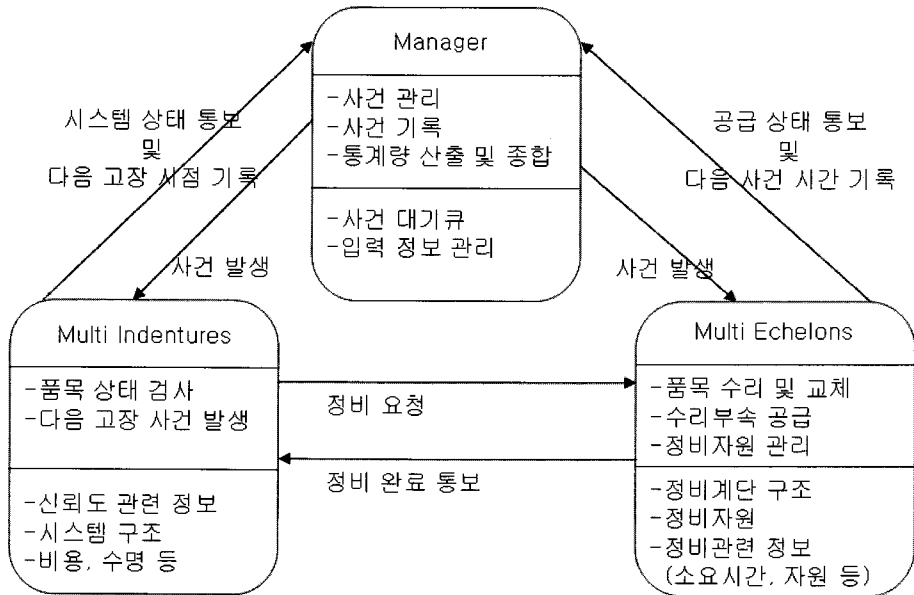
3.1 사건관리

시물레이션에서 사건은 정비/보급 사건과 품목 사건으로 나뉘어진다. 주요 반복 과정에서는 정비/보급 사건과 품목 사건 각각에서 제일 이른 사건을 추출해 내어 각 사건의 발생 시점을 비교하여, 그 중 가장 먼저 도착하는 사건을 처리하게 된다. <그림 5>는 객체 사건을 분류하여 해당 객체에 전달하는 과정을 나타낸다.

<그림 6>은 3가지의 주요 객체들이 관리하는



<그림 5> 객체 사건 분류



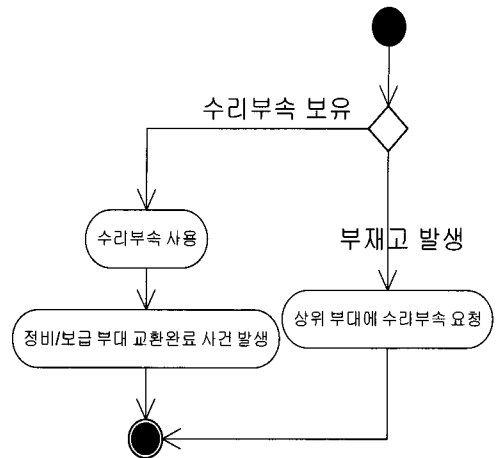
<그림 6> 객체간 보유 정보 및 사건 관리

정보 및 발생 사건을 취급하는 방법을 보여주고 있다. Manager에서는 품목과 정비/보급부대에서 발생하는 사건과 상태를 관리하고 있다. 품목(Multi indentures)과 정비/보급부대(Multi echelons) 객체는 정비 업무와 관련하여 서로 연관되어 동작하게 된다.

품목의 사건은 고장, 교체, 수리로 구성이 되며, 시스템의 고장과 LRU의 교체 완료 사건이 발생하면 시스템의 상태 변화를 체크하게 된다. 정비/보급 사건은 품목 사건의 발생과 연계하여 발생하게 된다. 품목의 고장 발생은 정비/보급부대에 교체 요청과 수리부속 보급 사건을 발생시키게 된다.

3.2 품목 및 정비/보급 사건의 발생 및 처리

시스템에 고장이 발생하였을 때에는 정비/보급부대 객체에 LRU 교환을 요청하게 된다. LRU 교환을 요청 받은 경우 시뮬레이션은 <그림 7>과 같이 수리부속을 보유하였는지의 여부를 체크하고 수리부속이 있는 경우 내부에서 해당 품목의 교환 완료 사건을 발생시킨다.



<그림 7> 교환 요청 사건에 대한 활동 다이어그램

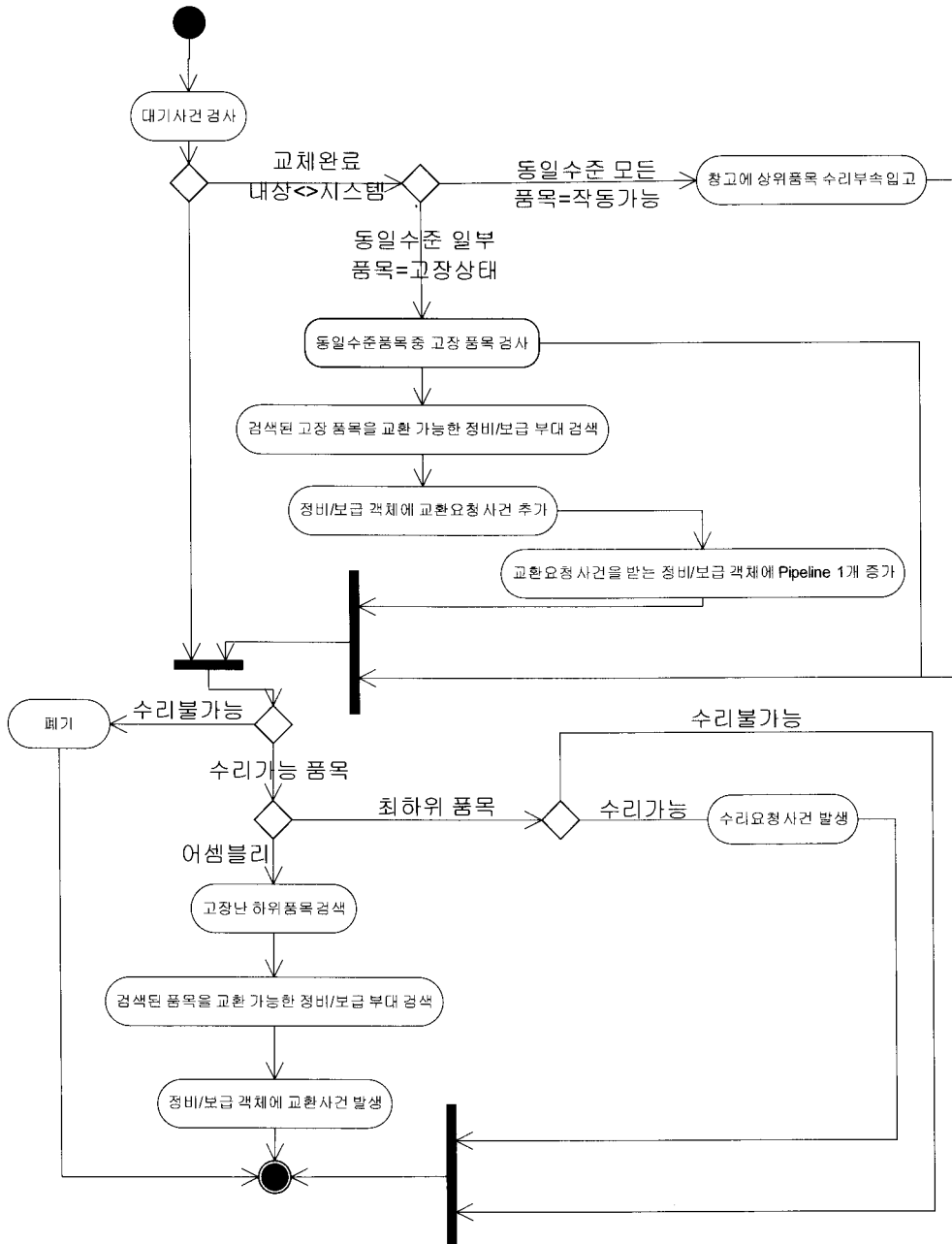
교환 완료 사건이 도착한 경우에는 <그림 8>과 같은 절차를 따라서 처리하게 된다. 먼저 대기사건이 있는 경우에는 대기사건을 처리하게 된다. 교환 발생을 유발시킨 대상이 시스템이 아닌 경우, 해당 품목과 동일한 부모를 가지는 품목이 모두 작동이 가능한지를 체크한다.

모두 작동이 가능한 경우에는 해당 부모 품목은

수리가 완료되어 품목이 재사용 가능하게 되고, 해당 정비/보급부대에 재고로 남겨두게 된다.

교환된 품목이 수리가 가능한 경우에는 해당 품목이 서버어셈블리 품목인지 최하위 품목인지를

체크하게 된다. 서버어셈블리 품목인 경우 하위 품목 중 고장 품목을 찾아 교환을 발생 시키게 되며, 최하위 품목인 경우에는 교환된 품목의 수리를 요청하게 된다.



〈그림 8〉 교환 완료 사건에 대한 활동 다이어그램

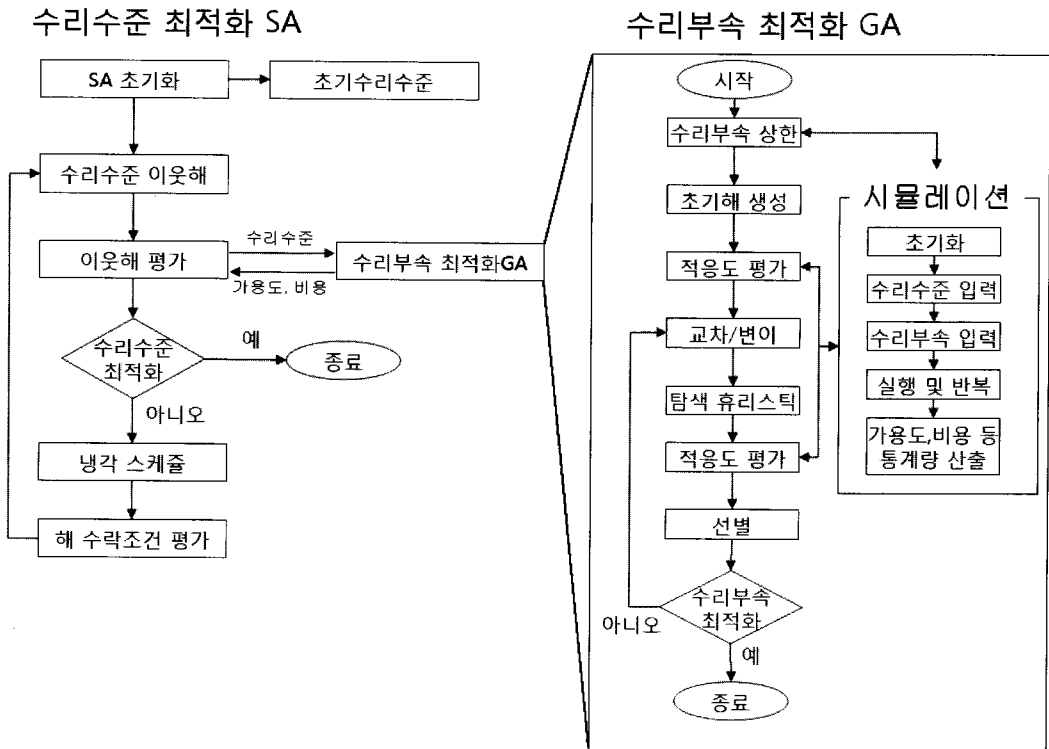
시물레이션에서 정비/보급 모형에 대한 가정은 다음과 같다.

- 수리, 교체, 수리부속 공급을 위해 정비 계단간 이동하는 시간은 지수, 균일, 삼각, 와이블 등의 분포를 따른다.
- 최상위 부대에서의 수리부속이 부족한 경우에 재보급은 외부로부터 무한하게 받을 수 있으며, 획득 시간은 지수, 균일, 삼각, 와이블 등의 분포를 따른다.
- 수리부속에 대한 보급 정책은(S-1, S) 정책을 따른다. 즉, 각 부대에서는 한 개를 소모하면 바로 상위 부대에 수리부속을 한 개 요청하게 된다.

4. 최적화 모형

최적화 과정에서는 각 품목의 수리수준과 각 정비/보급 부대의 수리부속 할당에 대해 동시에 최적

화를 수행하게 된다. <그림 9>에서 보는 바와 같이 최적화 과정에는 수리수준 최적화를 위해 SA가 수리부속 할당 최적화를 위해 GA가 포함된다. 이것은 SA에서 만들어진 한 개의 수리수준 이웃 해에 대하여 수리부속 수량을 최적화시키기 위함이다. 한 개의 수리수준 이웃 해에 대하여 수리부속 할당에 대한 이웃해는 다양하게 있을 수 있다. 수리부속 최적화의 GA에서는 시물레이션을 통해서 수리부속 수량과 수리수준에 대한 평가 결과인 비용과 운용 가용도를 반환 받게 된다. 예를 들어, A 품목의 교환이 1계단이고, 수리가 2계단인 경우, 각 정비/보급 계단(예를 들어, 4계단인 경우)에서 A 품목에 대해 수리부속을 보유할 수 있는 이웃해는 0-0-0-1, 0-0-1-1 등 다양하게 존재할 수 있다. 이러한 이웃 해에 대한 평가는 시물레이션을 통해서 이루어지며, 수리부속 할당의 최적화가 끝난 결과는 수리수준에서 1개의 이웃 해의 평가 결과가 된다.



<그림 9> 최적화 분석 과정

4.1 수리수준 최적화

본 연구에서는 수리수준과 수리부속 할당을 동시에 결정함으로써 복잡도가 둘 중 한 개만 고려할 경우보다 훨씬 증가하게 되며, 이로 인해 최적화를 수행하는데 많은 시간이 소요되게 된다. 따라서 해에 대한 수렴 속도는 좋은 해를 얻는 것 못지않게 중요하다. 본 절에서는 SA(Simulated Annealing)를 사용하여 해의 수렴속도를 가속화시키기 위해 Saab and Rao[9]가 제시한 SE(Stochastic evolution)기법을 사용한다. 해의 이동에 있어서 SE에서는 먼저 이동할 수 있는 해의 집합을 설정하고 주어진 문제에 맞게 우선 순위를 정해 그 순서대로 하나씩 발생시킨다. 그리고 SE에서는 비용값의 차이가 너무 큰 상승 이동은 최적화로의 진행 과정을 혼란시키고 계산시간만 증가시킨다고 파악하였기 때문에 작은 상승이동만 허용한다[1]. 본 절에서는 수리수준 분석을 위한 SA 수행 방안인 목적함수, 해의 표현, 이웃해 생성, 쿨링 스케줄 및 종료 조건 등을 다룬다.

4.1.1 목적함수와 제약식

식 (1)과 식 (4)는 시뮬레이션의 결과를 통해서 산출되는 값이며, 식 (2), 식 (3), 식 (5)는 수리수준 알고리즘에서 이웃 해를 생성하는데 있어 제약 조건이 된다.

즉, 최적화 과정에서는 식 (1)과 같이 각 품목에서 발생하는 비용의 합을 최소화 시킨다. 각 품목에서 발생하는 비용의 합은 식 (1)에서 함수 $f(\bar{R}, \bar{M}, F, S)$ 와 같이 시뮬레이션을 통해서 산출된다. 식 (2)와 식 (3)은 품목이 교환/수리 가능한 정비계단에 대한 제약 사항으로, 일반적으로 상위 정비계단이 하위 정비계단보다 정비 업무의 난이도가 높은 것을 수행하게 되는 것을 표현한다. 즉, 식 (2)는 상위 서브어셈블리 품목의 교환 계단은 항상 해당 품목의 하위 품목의 교환 계단보다 상위에 있어야 함을 나타내며, 식 (3)은 최하위 품목에서 항상 수리 계단은 교환 계단보다 상위에 있어야 함을 나타낸다.

예를 들어, 서브어셈블리 i 가 직접계단(DSU)에서 교환될 경우, 서브어셈블리를 구성하고 있는 품목에 대한 교환은 직접계단(DSU) 이상에서 교환/수리가 가능하게 된다. 식 (4)는 이웃 해에 대한 가용도 제약 조건으로 시스템의 평균 가용도는 목표 가용도 이상이 되어야 함을 나타내며, 이웃 해의 가용도는 시뮬레이션을 통해 산출된다.

기호정의

- N : 총 부대에 배치된 시스템의 수
- G : 시스템을 구성하는 총 품목 수
- A_i : 시뮬레이션을 통해 산출된 i 번째 시스템의 가용도
- A_t : 목표 가용도
- TU : 총 부대 수
- NE : 총 정비계단 수
- C_{ij}^B : i 정비/보급 부대에서 j 품목의 구입비용
- C_{ij}^H : i 정비/보급 부대에서 j 품목의 재고유지비용
- C_{ij}^T : i 정비/보급 부대에서 j 품목의 운송비용
- C_{ij}^O : i 정비/보급 부대에서 j 품목의 주문비용
- R_k : k 품목이 교환되는 정비계단
- M_k : k 품목이 수리되는 정비계단
- I_S : 서브어셈블리 품목의 집합
- I_B : 최하위품목의 집합
- $I_{S_k}^I$: 서브어셈블리 k 품목에 대한 하위 품목의 집합
- F : 품목의 고장/정비 정보
- S : 정비/보급 시스템의 정보
- \bar{R} : 각 품목이 교환되는 정비계단의 벡터
 $\bar{R} = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_{k-1}, R_k)$ for $\forall k \in I_S$
- \bar{M} : 각 최하위 품목이 수리되는 정비계단의 벡터
 $\bar{M} = (M_1, M_2, M_3, \dots, M_{k-1}, M_k)$ for $\forall k \in I_B$
- $f(\bar{R}, \bar{M}, F, S)$: 시뮬레이션을 통해 산출된 총 비용의 합을 반환하는 함수

$$Min \sum_{i=1}^{TU} \sum_{j=1}^G (C_{ij}^B + C_{ij}^H + C_{ij}^T + C_{ij}^O) = f(\bar{R}, \bar{M}, F, S) \quad (1)$$

subject to

$$R_k \leq R_p \text{ for } \forall k \in I_S, \forall p \in I_S^L \quad (2)$$

$$R_k \leq M_k \text{ for } \forall k \in I_B \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i / N \geq A_t \quad (4)$$

$$0 \leq R_k, M_k \leq NE \text{ for } \forall k \in I_S \cup I_B \quad (5)$$

궁극적으로, 식 (2)~식 (5)는 시물레이션과 SA를 활용하여 식 (1)를 최소화 시키는 \bar{R} 와 \bar{M} 를 찾는 것을 의미한다.

4.1.2 해의 표현과 초기해 생성

본 논문에서 각 품목의 수리/교환 계단과 정비/보급 부대별 수리부속에 대한 해를 두 가지 종류의 문자열을 이용해서 표현한다. <그림 10>과 같이 첫 번째는 품목에 대한 수리/교환에 대한 해로 서브어셈블리 품목은 교환만, 최하위품목은 교환과 수리에 대한 해를 나타낸다. 수리수준은 0에서 정비계단 수만큼으로 표현되며, 0은 최하위 운용부대를 의미한다. 서브어셈블리의 경우 수리가 하위품목의 교환이 되며, ‘1’로 표현하여, 탐색과정에서 제외한다.

서브어셈블리 품목은 시스템의 운용 가용도를 향상시키기 위해 일반적으로 운용부대에서 교환하며, 최하위 품목은 직접 또는 일반 이상에서 교환하는 경우가 많다. 따라서 수리수준 최적화에서 초기해는 서브어셈블리 품목의 교환은 ‘0’, 최하위 품목의 교환 및 수리는 ‘1’로 설정하여 분석한다.

4.1.3 수리수준에 대한 이웃해 생성 및 평가

수리수준에 대한 이웃해는 임의의 품목에 대해

교환/수리 계단을 선정하게 되며, 절차는 다음과 같다.

단계 1 : 임의로 문자열 지점을 선정한다.

단계 2 : 선택된 문자열에 대한 임의의 정비계단을 선정한다.

단계 3 : 임의로 선정된 문자열의 해가 현재해와 동일하면 단계1로, 그렇지 않으면 단계 4로 이동한다.

단계 4 : 제약조건을 점검한다.

단계 4-1 : 임의로 선정된 품목이 서브어셈블리 품목의 교환인 경우 단계 4-2, 최하위 품목의 교환인 경우 단계 4-3, 최하위품목 수리인 경우 단계 4-4로 간다.

단계 4-2 : 서브어셈블리 품목의 제약 조건 점검

단계 4-2-1 : 식 (2)를 점검하여 만족하지 못하는 경우, 하위 서브어셈블리 품목과 최하위 품목의 교환계단을[서브어셈블리 교환 계단, 정비계단 수-1]의 범위에서 임의로 선택한다.

단계 4-2-2 : 최하위품목의 교환계단과 수리계단에 대한 식 (3)를 점검하여 만족하지 못하는 경우 최하위 품목의 수리계단을[최하위품목 교환 계단, 정비계단 수-1]의 범위에서 임의로 선택한다.

단계 4-3 : 최하위 품목 교환 제약 조건 점검

단계 4-3-1 : 식 (3)을 점검하여 만족하지 못하는 경우, 서브어셈블리 품목의 교환 계단을[0, 최하위 품목 교환계단] 사이에서 임의로 선택한다.

수리수준	0	-1	1	-1	0	-1	1	1	0	1	1	2	0	0	1	1
품목명	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'	E	E'	F	F'	G	G'	H	H'

서브어셈블리
최하위품목

<그림 10> 수리수준에 대한 해의 표현(문자 : 교환, 문자' : 수리)

단계 4-3-2: 최하위 품목의 교환계단과 수리계단에 대한 식 (3)을 점검하여 만족하지 못하는 경우 최하위 품목의 수리계단을[최하위 품목 교환 계단, 정비계단 수-1]의 범위에서 임의로 선택한다.

단계 4-4: 최하위 품목 수리 제약 조건 점검

단계 4-4-1: 식 (3)을 점검하여 만족하지 못하는 경우, 최하위 품목의 교환 계단을[0, 최하위 품목 수리계단] 사이에서 임의로 선택한다.

단계 4-4-2: 식 (3)을 점검하여 만족하지 못하는 경우, 서브어셈블리 품목의 교환 계단을[0, 최하위 품목 교환계단] 사이에서 임의로 선택한다.

4.1.4 냉각 스케줄과 종료 조건

냉각은 아래의 식 (6)과 같이 온도가 α 의 비율로 감소하는 단순 기하 스케줄을 사용한다.

$$T_C = \alpha \cdot T_{C-1} \quad (C = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

α 가 작을 경우에는 해의 수렴 속도가 빨라지게 되고, 클 경우 수렴 속도는 느려지나 다양한 해의 공간을 탐색할 수 있게 된다. α 는 대개 0.5와 0.99 사이에서 정해지는데 보통은 0.9와 0.95를 사용한다[1]. 본 연구에서는 $\alpha = 0.9$ 로 하여 사용한다. 또한, 초기온도는 각 수리수준정책에 대한 총 비용 차이를 충분히 반영하는 T_0 를 설정한다. T_0 는 수리부속의 상한 값을 계산시 산출되는 비용의 최대 값을 활용한다.

4.1.5 해의 수락 조건 및 종료조건

SA에서는 최적화 과정에서 해가 지역 최적화에 빠지는 위험을 벗어나기 위해, 반복 과정에서 나쁜 해를 현재 해로 설정하게 된다. 다음은 해의 수락 조건을 나타낸다.

$$\text{비용 차이} = \text{현재 해의 총 비용} - \text{이웃 해의 총 비용}$$

$$\text{IF}(\text{비용 차이} > \text{RAND}(-T, 0))$$

$$\text{현재 해} = \text{이웃 해}$$

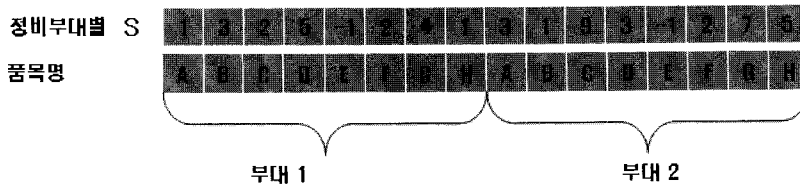
종료조건으로는 SE에서 제시된 동일한 최적해가 R회가 반복될 경우 종료한다. 즉, R회 반복하는 과정에서 최적 해의 변동이 없으면 휴리스틱을 종료하게 된다. R의 값이 클수록 해의 수렴속도는 감소하게되나, 더욱 다양한 이웃 해에 대해 탐색을 수행하게 되어 좋은 해를 찾을 확률을 높여주게 된다.

4.2 수리부속 할당 최적화

각 정비/보급 부대별로 최적의 수리부속을 할당하기 위하여 유전 알고리즘을 사용하고 있으며, 유전 알고리즘에서 적응도 평가는 수리적인 복잡성으로 인해 시뮬레이션을 활용한다. 본 절에서는 수리부속품 최적화를 위한 유전알고리즘을 간략하게 나타낸다.

4.2.1 해의 표현

한 개의 문자열은 순서적으로 정비/보급 부대별 수리부속품의 초기 재고를 표현한다. 또한, 품목의 교환이 이루어지는 계단 보다 하위 계단에는 해당 수리부속을 보유할 필요가 없으므로 '-1'로 표시하

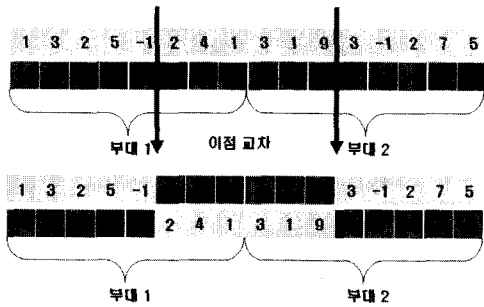


<그림 11> 문자열로 구성된 해[2]

며 탐색과정에서 제외시킨다. 예를 들어, 총 부대가 2개이고, 품목이 8개인 경우에 해의 표현은 <그림 11>과 같이 표현될 수 있다.

4.2.2 교차 및 변이 연산

교차는 이점 교차를 수행하게 된다. <그림 12>에서 보는 바와 같이 두 개의 해를 임의로 선택하여 해인 문자열에서 임의의 두 점을 기준으로 교차를 발생시키게 된다.



<그림 12> 이점 교차

따라서 교차 후에는 두 개의 새로운 해가 생성되게 된다. 그러나 문자열의 순서적인 교차로 인해 정비계단과 부대순서는 바뀌지 않으므로, 해에 해당하지 않는 '-1'에는 영향을 미치지 않게 된다. 돌연변이는 임의의 해를 선택 후에 문자열인 해에서 임의의 지점을 선택하여 수리부속에 대한 상한 내에서 발생시키게 된다.

4.2.3 적응도 평가 및 해의 선택

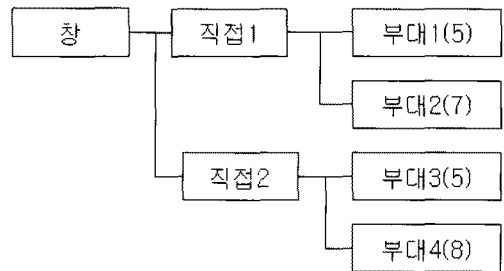
적응도 평가를 위해 시뮬레이션을 활용한다. 1개의 이웃 해에 대해 적응도 평가를 위해 TR회 만큼의 시뮬레이션을 반복 수행하며, 반복된 시뮬레이션 결과에 대한 평균값을 한 개의 해에 대한 적응도로 사용한다.

모든 해에 대한 적응도 평가를 완료한 후에 Top pop size 선별 방법을 사용하여 다음 세대에서 사용될 해를 선택한다. Top pop size 선별은 현재대의 유전자와 돌연변이, 교차된 유전자로부터 가장

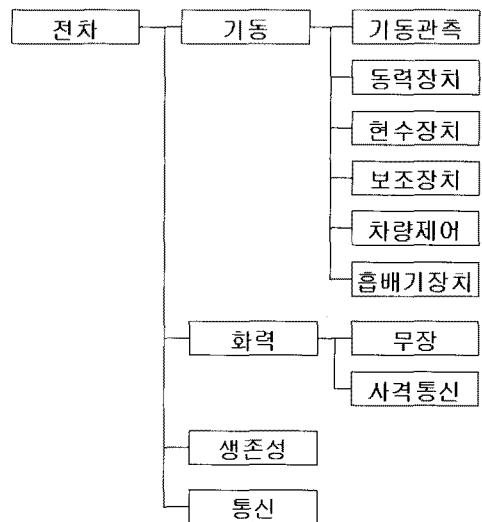
적응도가 좋은 유전자를 세대 수만큼 선별하여 다음 세대로 보내게 된다.

5. 실험예제

본 절에서는 제안된 최적화 기법을 활용하여 수리수준과 수리부속 할당에 대한 실험을 수행한다. 본 예제에서는 정비/보급 구조를 <그림 13>과 같이 다 계단으로 표현하였으며, 최하위 부대인 부대 1~4에는 부대에 배치된 가상의 전차 수를 나타낸다. 또한, 다 계층 시스템으로 <그림 14>와 같이 가상의 전차를 구성한다. 각 품목간의 신뢰성 관계는 모두 직렬로 구성하였으며, 품목을 정비하기 위



<그림 13> 정비/보급 구조((): 완제품 배치수)



<그림 14> 가상 전차 다단계 구조

〈표 2〉 품목의 고장/정비 정보

품목명	품목가격	무게	고장분포	형상모수	척도모수	평균 교환시간	평균 수리시간
기동(LRU)	10000	700	-	-	-	1	-
기동관측	1500	100	와이블	1.5	1700	2.5	50
동력장치	3500	200	와이블	1.3	1500	2.8	50
현수장치	2000	150	와이블	2	1000	4	60
보조장치	1000	50	와이블	1.2	2000	6	40
차량제어	700	50	지수	-	1500	6	70
흡배기장치	400	30	와이블	1.1	3700	2	30
화력(LRU)	6000	500	-	-	-	0.5	-
무장	2500	200	와이블	1.3	1500	2.5	80
사격통신	1500	100	와이블	1.1	2000	3	80
생존성(LRU)	3000	350	와이블	1.3	2200	2.5	40
통신(LRU)	2000	250	와이블	1.1	2500	2	50

한 정비요원/정비장비는 무한히 있는 것으로 가정하였다. <표 2>는 각 품목의 고장 및 정비 데이터를 나타내며, 품목의 창 획득시간, 교환/수리 시간은 실험의 편의상 지수분포로 가정하였다. <그림 14>의 품목 중에 LRU는 <표 2>의 품목명 내에 'LRU'로 표시되어 있다. 또한, 시뮬레이션의 시간은 1,000시간이며, 이웃 해에 대한 시뮬레이션 반복회수는 30회로 하여 수행하였다.

정비계단간의 수리부속의 이동 소요시간은 다음과 같으며, 정비계단간 무게 × 시간당 비용은 "()"에 표시된 것과 같다.

- 외주 ↔ 창 : 300(2)
- 창 ↔ 직접 : 150(2)
- 직접 ↔ 부대 : 100(1)

SA에서 사용하는 파라미터는 다음과 같다.

- R : 10
- α : 0.9

유전알고리즘에서 사용하는 파라미터는 다음과 같다.

- 교차율 : 0.3

- 돌연변이율 : 0.1
- 세대수 : 30

Top pop size 선별 방법에서는 교차와 돌연변이를 통해 나온 해와 현재해 중 좋은 해를 모집단의 개체 수만큼 선별하여 다음 세대의 해로 사용한다. 또한, 유전알고리즘은 교차율과 돌연변이율이 높을수록 대안 해를 더욱 많이 만들고 평가를 수행하게 되며, 이로 인해 좋은 해를 찾을 확률은 증가하나 해의 수렴 속도는 감소하게 된다.

수리수준 최적화의 효과를 분석하기 위하여 2가지 경우에 대해 분석을 수행하였다. 첫 번째는 동일한 문제에서 수리수준과 수리부속을 동시에 최적화 시킨 것이며, 나머지는 각 품목의 수리수준을 최악의 경우인 모든 품목의 교환은 '부대'에 수리는 '창'으로 설정하여 실험하였다. 각 두 가지 경우에 대해 목표 가용도를 80%와 90%로 설정하였을 경우에 대한 실험을 수행하였으며, 예측된 결과는 <표 3>과 같다. <표 3>에서 보는 바와 같이 동시 최적화의 경우가 최악의 경우에 수리부속만을 최적화 시킨 경우보다 비용적인 측면에서 좋은 결과를 나타내었다. 또한, 목표가용도가 80% 보다 90%일 경우 더욱 높은 수명주기비용이 산출되었다. 이

〈표 3〉 수리부속 예측 비용

최적화 방법	목표가용도	가용도	총비용	구입비	재고유지비	주문비	운송비
동시최적화	0.8	0.81	4127346	421500	68377.4	5655	3631814
	0.9	0.91	4645946	532800	68124.1	6150	4038872
수리부속	0.8	0.82	4607366	477200	61026.4	5890	4063250
	0.9	0.92	4809786	598000	57093.4	4792.5	4149900

는 목표가용도가 높을수록 각 정비/보급 부대에서 정리지연시간을 줄여야 하며, 이를 위해 정비계단을 낮추고 수리부속을 많이 보유하여야 하기 때문이다.

〈표 4〉 품목별 교환/수리계단 결과

구 분	80%		90%	
	교환	수리	교환	수리
기동	부대	-	부대	-
화력	직접	-	부대	-
생존성	직접	직접	직접	직접
통신	직접	직접	직접	직접
기동관측	부대	직접	부대	직접
동력장치	부대	직접	직접	직접
현수장치	직접	직접	직접	직접
보조장치	직접	직접	직접	직접
차량제어	직접	직접	직접	직접
흡배기장치	직접	직접	직접	직접
무장	직접	직접	직접	직접
사통	직접	직접	직접	직접

〈표 5〉는 시스템의 복구시간에 직접적으로 영향을 미치는 정비/보급부대별 LRU에 대한 수리부속 보유 수량을 나타낸다. 위의 〈표 4〉에서 나타난 바와 같이 목표가용도가 80%인 경우 화력의 교환계단은 직접이상으로 인해, 〈표 5〉에서 부대 정비계단에 대한 수리부속이 나타나지 않았다. 또한, 목표 가용도가 90%인 경우에 수리부속 수량이 80%인 경우보다 더욱 많은 수량이 예측되었으며, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 수리부속으로 인한 지연시간을 감소시키기 위해 90%에서 많은 수리부속을 보유한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 가용도 제약하에 시뮬레이션과 메타 휴리스틱을 이용하여 MIME 시스템의 수리수준과 수리부속 할당에 대한 동시 최적화 방법을 다루었다. MIME 시스템을 표현하기 위해 각 객체별 클래스를 정의 하였고, 수리수준의 최적화를 위해 시뮬레이션과 메타휴리스틱을 사용하였다. 또

〈표 5〉 정비부대별 수리부속 보유 수량

		창	직접 1	직접 2	부대 1	부대 2	부대 3	부대 4
80%	기동	0	5	0	2	3	5	7
	화력	4	6	4	0	0	0	0
	생존성	0	1	1	0	0	0	0
	통신	3	1	1	0	0	0	0
90%	기동	0	2	6	5	5	3	7
	화력	8	4	3	3	3	1	5
	생존성	0	1	2	0	0	0	0
	통신	2	2	1	0	0	0	0

한, GA와 SA을 통해 수리부속 할당과 수리수준을 동시에 결정하였으며, 목표 가용도에 따른 수리부속 할당 및 수리수준 결정 방법을 실험예제로 나타내었다. 수리수준 및 수리부속 할당 최적화는 운용되는 시스템과 정비 및 보급 환경에 많은 영향을 받으며 고려되어야 하는 요소 또한 많다. 따라서 최적화 과정의 효율성을 향상시키기 위해서는 고려되어야 하는 다양한 요소를 합리적으로 배분하고 조정하는 것이 중요하다. 추후에는 본 연구에서 다룬 것 보다 더욱 정밀한 알고리즘을 개발하여 최적화의 정확성 및 속도를 높이는 것이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 정비자원(정비요원, 정비장비) 및 시설에 대한 사항을 함께 고려하여 수리수준을 결정하는 문제를 다룰 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 김여근, 윤복식, 이상복, 「메타 휴리스틱」, 1 판, 영지문화사, 1997.
- [2] 정일한, 윤원영, “가용도 제약하에 유전알고리즘과 시뮬레이션을 이용한 MIME 시스템의 수리부속 최적화”, 「품질경영학회지」, 제36권, 제2호(2008), pp.9-19.
- [3] Alfredsson, P., “Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities,” *European Journal of Operational Research*, Vol.99, No.3(1997), pp.584-597.
- [4] Barros, L. and M. Riley, “A combinatorial approach to level of repair analysis,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 129, No.2(2001), pp.242-251.
- [5] Brick, E.S. and E. Uchoa, “A facility location and installation of resources model for level of repair analysis,” *European journal of operational research*, August 2007.
- [6] Graves, S.C., “A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment,” *Management Science*, Vol.31, No.10(1985), pp.1247-1256.
- [7] Gutin, G., A. Rafiey, A. Yeo, and M. Tso, “Level of repair analysis and minimum cost homomorphisms of graphs,” *Discrete applied mathematics*, Vol.154, No.6(2006), pp.881-889.
- [8] Saab, Y.G. and V.B. Rao, “Combinatorial optimization by stochastic evolution,” *IEEE Transactions Computer-Aided Design*, Vol. 10, No.4(2005), pp.525-535.
- [9] Sherbrooke, C.C., “METRIC : Multi-echelon technique for recoverable item control,” *Operations Research*, Vol.16, No.1(1968), pp.122-141.
- [10] Slay, F.M., *VARY-METRIC : an approach to modeling multi-echelon resupply when the demand process is Poisson with gamma prior*, Report AF301-3, Logistic management Institute, Washington, DC. Conference, 1984.