

가용도 제약하에 MIME 시스템에서 유전알고리즘과 시뮬레이션을 이용한 수리부속 최적화

정일한* · 윤원영**†

* 현대로템(주) 기술연구소 체계개발 1 팀

** 부산대학교 산업공학과

Spare Part Optimization of MIME Systems using Simulation and Genetic Algorithms under Availability

Il-han Chung* · Won Young Yun**†

* System Development Team1/R&D Center, Hyundai Rotem Company

** Department of Industrial Engineering, Pusan National University

Key Words : Spare part, Multi echelon, Multi indenture, Simulation

Abstract

Spare part problem of MIME (Multi Indenture Multi Echelon) system under availability constraint has been studied for several decades. In most of existing studies, it was very difficult to obtain the optimal numbers of spare parts and some approximate methods were proposed under many restrictions. In this paper, we consider a simulation to estimate the total cost rate and system availability and a genetic algorithm to obtain the optimal numbers of spare parts. Some numerical examples are also studied.

1. 서 론

수리부속은 완제품의 일부분으로 완제품에 고장이 발생하였을 경우 즉각적인 수리를 통해 완제품을 운용 가능하게 하기 위한 제품이다. 수리부속의 부족은 완제품의 수리시간을 증가시켜 가용성을 떨어지게 하는 원인이 된다. 따라서 수리부속과 관련된 많은 연구들은 완제품의 가용성을 증가시키기 위한 수리부속 보유량에 초점이 맞추어져 있다. 이러한 수리부속은 완제품이 운용되는 특성과 수리되는 특성에 따라 영향을 받게 된다.

MIME 시스템은 시스템의 구조가 나무형태의 다 계층으로 표현되고, 운용시스템을 지원하는 정비/보급 시스템이 다 계단으로 형성되는 시스템을 의미한다. 본 연구에서 다루는 MIME 시스템의 문제는 두 종류의 시스템을 다루고 있다. 첫째는 운용되는 완제품이 다 계

층 구조 시스템으로 표현되어지는 것이다. 완제품은 여러 가지 품목이 계층적으로 구성되어진다. 또한, 완제품 내의 품목은 정비업무 측면에서 완제품이 고장이 발생하였을 경우 완제품의 수리를 위해 교환되어야 되는 품목과 그렇지 않은 품목으로 구별되어진다. 두 번째는 정비/보급 업무가 다 계단으로 구성되어진다. 다 계단으로 구성된 정비/보급부대에는 완제품을 수리하기 위한 수리부속을 각각 보유하고 있으며, 정비/보급 계단 간에는 약속된 보급 정책으로 정비계단 간에 수리부속을 보급하게 된다. 또한, 정비/보급 계단별로 정비 업무가 할당되어져 있어 수리부속에 대한 수리순환이 이루어진다.

특히, 무기체계의 운용과 정비/보급은 MIME 시스템을 잘 반영하고 있다. 무기체계는 다양한 기능을 보유하기 위해 다양한 부품들로 구성되어져 있으며 각 부품들은 최 상위시스템에서 최하위 부품까지 다 계층(Multi-indenture)으로 구성되어져 있다. 또한, 무기체계에서 정비/보급 지원체계는 다 계단 구조를 가지게

된다. 무기체계는 특성에 따라 정비/보급 지원이 2~4계단으로 구성이 되며, 각 정비/보급부대에는 정비를 위해 필요로 하는 정비요원, 정비장비 및 수리부속을 보유하고 있다.

Sherbooke[3]은 단층 다 계단(Single Indenture Multi echelon) 상황에서 수리부속 최적화를 위한 METRIC 모형을 개발하였다. METRIC 모형을 기초로 한 대부분의 중요한 모형은 Sherbooke[4]에 소개되어져 있다.

Slay[5]는 METRIC을 기초로 하여 VARI-METRIC 모형을 개발하였으며, Graves[2]는 VARI-METRIC 모형에서 근사적으로 해를 찾는 방법을 연구하였다. METRIC과 VARI-METRIC은 미국 육/해/공군의 다양한 무기체계[5]와 항공기[1] 등에서 널리 적용되어지고 있다. METRIC과 VARI-METRIC 모형은 다양한 가정을 바탕으로 하고 있다. 특히, 수리부속의 수요는 포아송 과정으로 발생하게 되며, 정비/보급 계단간의 수송 시간은 상수로 가정하고 있다. 이러한 가정 하에 근사적으로 계산된 VARI-METRIC의 결과는 시물레이션의 결과와 근접한 것으로 나타났다.[4] 그러나, 시스템 내의 품목의 고장이 일반분포를 따를 경우에는 적용할 수가 없다.

Köchel와 Nieländer[6]는 시물레이션과 유전알고리즘을 이용하여 다 계단 재고 시스템에서 재고정책(s,Q)을 최적화 방법을 제시하였으며, Tee 등[7]는 시물레이션을 이용하여 기존에 연구된 다 계단 재고 모형을 평가하였다. 본 연구에서는 MIME 시스템에서 각 정비/보급 부대별 최적의 수리부속 보유량을 결정하는 문제를 다룬다. 특히, 수리부속의 수요와 수송시간이 일반분포인 경우 수리적인 모형이 가지고 있는 경우 해석적인 방법으로 시스템의 각종 통계량(비용과 가용도)을 추정할 수 없으므로 시물레이션을 활용한다. 또한, 각 정비/보급 부대별 수리부속의 최적화를 위해 유전알고리즘을 기본으로 사용하고 있다. 유전알고리즘에서 주어진 해(수리 정책)에 대한 적응도 평가는 비용과 가용도이나 이를 해석적으로 바로 구할 수 없으므로 부득이 시물레이션방법으로 이용하며 탐색의 속도 및 해의 정밀성을 높이기 위해 탐색 휴리스틱을 제안한다.

2. 시물레이션 모형

본 시물레이션은 사건 발생을 중심으로 시간이 진행되는 이산사건 시물레이션을 사용한다. 이산사건 시물

레이션을 모형 화하기 위해 객체지향기법이 사용되었다. 객체를 표현하기 위해 각각은 클래스로 구성되었으며, 개발은 Microsoft .Net 2005내에 Visual C++ 8.0을 사용한다.

2.1 사건관리

시물레이션에서 사건은 정비/보급과 품목 사건으로 나누어 진다. 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. 사건을 처리하기 위해 <표 1>에서와 같이 3가지의 클래스가 구성되었다. CManager 클래스는 사건들 간의 관계를 관리하고 각 객체에 사건을 발생시키고 전달하는 역할을 수행한다.

<표 1> 사건관리 클래스

| 분류 | 클래스 | 설명 |
|---------|----------------|---------------|
| 프로세스 관리 | CManager | 객체들 간의 관계 관리 |
| 이벤트 관리 | CItemEvent | 품목 사건 처리 |
| | CSupMaintEvent | 정비/보급 관련사건 처리 |

CItemEvent와 CSupMaintEvent 클래스는 각각 품목, 정비/보급과 관련된 사건과 시간을 관리한다. 품목의 사건은 고장, 교체 등으로 구성이 되며, 고장과 교체 완료 사건이 발생하면 시스템의 상태 변화를 체크하게 된다. 정비/보급 사건은 품목사건의 발생과 연계하여 발생하게 된다. 품목의 고장 발생은 정비/보급에서 교체요청과 수리부속 보급을 필요하게 된다.

상위 정비/보급부대로부터 수리부속이 부족하여 수리부속을 요청하는 것은 즉시 이루어지는 것이므로 사건으로 분류할 필요가 없다. 상위부대가 요청을 받았을 경우 수리부속을 공급하는 데에는 일정한 시간이 소요되므로 사건을 발생시키게 된다.

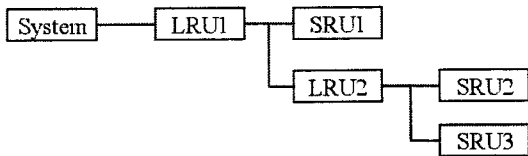
2.2 품목 모형

품목은 크게 시스템, 서브어셈블리, 최하위품목과 같이 3가지로 분류되어진다. 또한, 서브어셈블리는 몇 개의 단계로 구성되어질 수 있다. 따라서 품목 객체의 구성은 <표 2>에서 보는 것과 같이 구성되어진다.

<표 2> 품목 관련 클래스

| 클래스 | 설명 |
|-----------|--------------|
| CSysItem | 최상위 수준(시스템) |
| CSubItem | 서브어셈블리 |
| CEndItem | 최하위 품목 |
| CItemBase | 품목 관련 기저 클래스 |

CItemBase는 3가지 품목 종류에서 공통된 부분을 다루는 것으로 3가지 품목 종류의 클래스는 CItemBase를 상속받아서 구성되어진다.



<그림 1> 시스템 구조

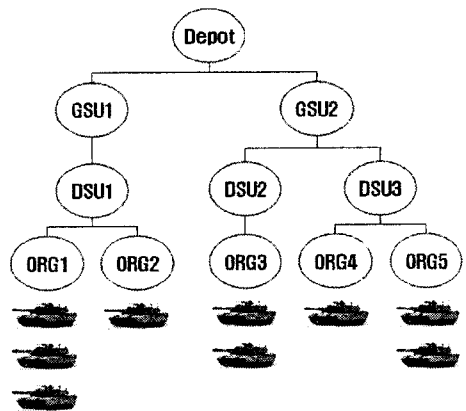
또한, 같은 부모를 가지는 품목들 간의 관계는 직렬, 병렬, 대기, k-out-of-N 등의 신뢰성 구조를 가진다.

본 시뮬레이션에서는 시스템의 정비를 위해서 품목의 분류를 <그림 1>과 같이 LRU(Line Replaceable Unit)와 SRU(Shop Replaceable Unit)로 구분한다. LRU는 시스템에서 바로 탈거가 가능한 품목으로 시스템에 고장이 발생하였을 경우 시스템의 상태를 복구하기 위해서 LRU의 교체가 이루어진다. 또한, LRU 하위에는 LRU와 SRU가 동시에 존재할 수 있다. SRU는 LRU의 하위에 위치하고 있으며, LRU내의 고장난 SRU의 교체를 통해 LRU를 수리할 수 있다. 예를 들어, 자동차의 엔진은 LRU가 될 수 있으며, 엔진하위 품목에서 ECDS(Engine Control and Diagnostic System)의 경우 LRU, Gasket의 경우 SRU로 구성이 된다.

2.3 정비/보급 모형

한 개의 부대에서 정비와 보급이 같이 이루어진다. 부대의 구조는 2~4계단으로 구성할 수 있으며, 최 상위 계단은 군수에서는 Depot, 민수에서는 Warehouse 역할을 수행하게 된다. 또한, 최하위 계단은 완제품이 운용되는 계단이 된다. 2~4계단의 구성은 <그림 2>에서 보는 것과 같이 비대칭형으로 표현될 수 있다. 예를 들어 GSU1은 DSU1에서 요청하는 정비와 보급을 지원하게 되며, GSU2는 DSU2와 DSU3를 지원하게 된다.

최하위 부대인 ORG에는 완제품이 배치되게 되며, 각 완제품의 배치 수는 부대별로 다르게 배치될 수 있다. 따라서 각 최하위 부대에서 발생하는 고장과 정비 빈도가 다르게 되며, 빈도의 차이에 의해 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 ORG4와 ORG5를 지원하게 되어 간접적으로 완제품 4대를 지원하게 된다.



<그림 2> 정비/보급 부대 구조

<표 3> 사건 유형

| 사건 유형 | 설명 |
|---------------------|-------------------------------------|
| Request_Replacement | 시스템 또는 서브어셈블리의 수리를 위해 하위 품목의 교체를 요청 |
| Finish_Replacement | 품목의 교체를 완료함 |
| Request_Repair | 최하위수준의 부품에 대해 수리를 요청함 |
| Finish_Repair | 최하위수준의 부품의 수리를 완료함 |
| Get_Item | 상위부대로부터 수리부속을 받음 |

이러한 각 정비/보급 부대에는 품목의 정비 및 보급을 위하여 <표 3>과 같은 사건이 발생하게 된다.

CSupMaint 클래스의 객체는 한 개의 정비/보급 부대를 표현한다. 정비/보급 부대의 전체를 관리하기 위한 CSuperSupMaint 클래스가 있으며, 정비/보급 부대에서 정비자원의 부족으로 지연되는 사건을 처리하기 위한 CSupQueue 클래스가 있다.

<표 4> 정비/보급 부대 관련클래스

| 클래스 | 설명 |
|----------------|---------------|
| CSuperSupMaint | 정비/보급 부대 관리 |
| CSupMaint | 정비/보급 부대 |
| CSupQueue | 정비/보급 지연 사건 큐 |
| CReplacItem | 수리중인 품목 관리 |

시물레이션에서 정비/보급 모형에 대한 몇 가지 가정은 다음과 같다.

- 수리, 교체, 수리부속 공급을 위해 정비 계단 간 이동하는 시간은 지수, 일양, 정규, 와이블 등의 분포를 따른다.
- 최 상위 부대에서의 수리부속이 부족한 경우에 재보급은 외부로부터 무한하게 받을 수 있으며, 획득 시간은 지수, 일양, 정규, 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.

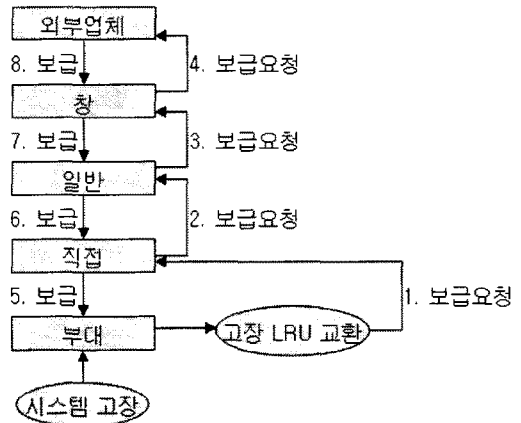
2.4 수리부속보급 모형(재고 정책)

수리부속의 보급은 one-for-one 즉, (S-1,S) 재고 정책을 따른다. 각 정비/보급 부대는 초기에 유지하기를 원하는 수리부속별 S_{ij}^r 개를 보유하게 된다. <그림 3>에서와 같이 고장난 LRU를 교환함으로써 부대에서의 수리부속이 1개 사용된 경우에는 바로 상위 계단의 부대에 수리부속을 요청하게 된다.

$$S_{ij}^r + S_{ij}^T + S_{ij}^c < S_{ij}^I \tag{1}$$

이때 부대에 수리부속은 현 보유 재고(On-hand-stock, S_{ij}^c) 이외에 보급 예정인 수리부속(Pipeline내의 수리부속)이 존재하게 된다.

보급 예정인 수리부속은 바로 사용할 수는 없지만, 현재 보급중인 수리부속(S_{ij}^T)으로 상위부대로부터 운송중이거나, 또는 현재 부대 내에서 수리중인 수리부속(S_{ij}^r)을 의미한다. 따라서 다음 식(1)을 만족할 경우에 해당 부대는 상위부대에 수리부속을 요청하게 된다.



<그림 3> 수리부속보급 절차

2.5 시물레이션 통계량

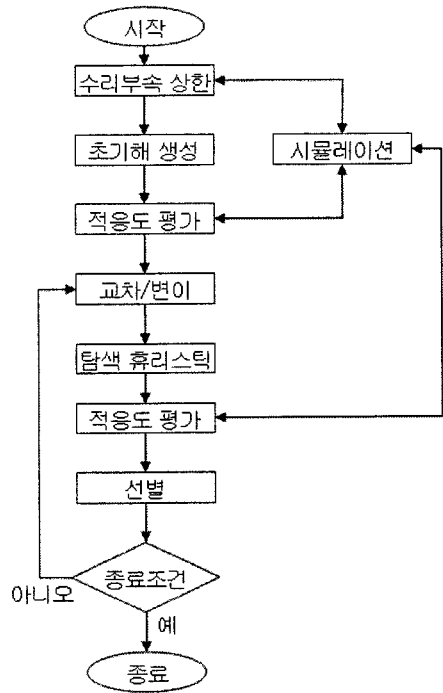
시물레이션에서는 품목 및 정비자원에 대한 통계량을 시물레이션 반복을 통하여 산출한다. 품목에 대한 통계량은 전체 배치된 시스템의 통계량을 통합해서 산출하게 되며, 수리부속 통계량은 각 정비계단별 부대별로 통계량을 산출하게 된다. 본 시물레이션에서 산출되는 통계량은 <표 5>와 같다.

3. 최적화 방안

기호정의

- N : 총 완제품 수
- TC_i : i 부대에서 발생한 총 비용
- A_i : 시물레이션을 통해 산출된 i 완제품의 가용도
- A_0 : 목표 가용도
- TR : 시물레이션 반복 회수
- TR : 총 부대 수
- LU_i : i 부대의 하위 부대의 집합
- SB_{ij} : i 부대에서 j 품목의 수리부속 상한
- REP_{ij}^r : r 시물레이션 반복에서 i 부대에서 j 품목의 교환 회수

- σ_{ij}^R : 시뮬레이션 반복으로부터 산출된 i 부대에서 j 품목의 교환 회수에 대한 표준편차
- S_{ij}^I : i 부대에 초기 j 품목의 수리부속 수량
- S_{ij}^r : i 부대에서 수리중인 j 품목의 수량
- S_{ij}^T : 운송중인 j 품목의 수리부속 수량
- S_{ij}^c : 현재 보유한 j 품목의 수리부속 수량
- C_{ij}^B : i 부대에서 j 품목의 구입비용
- C_{ij}^H : i 부대에서 j 품목의 재고유지비용
- C_{ij}^T : i 부대에서 j 품목의 운송비용
- N_i : i 부대에서 지원하는 완제품 수
- MDT_{ij} : i 부대에서 j 품목의 평균정비지연시간
- $PRICE_j$: j 품목의 단가
- $PRICE_{j'}$: j 품목의 상위 품목의 단가



<그림 4> 최적화 과정

각 정비/보급 부대별로 최적의 수리부속을 할당하기 위하여 <그림 4>와 같은 과정을 따른다. 최적화를 위하여 유전 알고리즘을 사용하고 있으며, 유전 알고리즘에서 적응도 평가는 해석적으로 구하기 어려워 시뮬레이션을 활용한다. 또한, 유전 알고리즘에 추가적으로 탐색 휴리스틱을 개발하여 적용한다. 탐색 휴리스틱은 시뮬레이션의 통계량을 기초로 하여, 최적 해에 좀 더 빨리

리 접근할 수 있는 방안을 찾는데 활용된다. 본 연구에서는 최적화 알고리즘을 통하여 다음 식(2)와 같이 목표 가용도를 만족시키면서, 총 비용을 최소화 시키는

<표 5> 시뮬레이션 통계량의 종류

| 분류 | 통계량 | 설 명 |
|--------|--------------|---------------------------------|
| 품목 | 평균작동시간 | 고장 없이 품목이 작동한 평균 시간 |
| | 평균고장시간 | 품목이 고장으로 인하여 작동이 불가능한 시간 |
| | 평균유휴시간 | 품목이 고장 상태가 아님에도 작동을 하지 못한 평균 시간 |
| | 표준편차 | 고장시간의 표준편차 |
| | 표준오차 | 고장시간의 표준오차 |
| | 가용도 | 시뮬레이션 시간과 평균작동시간의 비율 |
| | 평균고장회수 | 시뮬레이션 시간 동안 품목의 평균고장회수 |
| 수리부속 | 평균재고보유량 | 부대에서 운용시간 동안 보유한 평균재고 |
| | 평균보급지연시간 | 수리부속 부족으로 인한 평균 보급지연시간 |
| | 보급지연비용 | 수리부속지연회수/수리부속요청회수 |
| | 정비지연비용 | 정비지연회수/정비요청회수 |
| | 평균정비지연시간 | 수리부속 부족으로 인한 평균정비지연시간 |
| | 구입비용 | 수리부속구입비용 |
| | 주문비용 | 수리부속 요청에 따른 주문비용 |
| | 운송비용 | 수리부속 요청에 따른 운송비용 |
| 재고유지비용 | 수리부속 재고 유지비용 | |

각 부대별 수리부속량을 탐색한다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N TC_i \quad (2)$$

subject to

$$\frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} \geq A_0 \quad (3)$$

3.1 수리부속 상한

유전알고리즘에서 해를 생성할 때 해의 범위가 있어야 한다. 정비/보급 부대별로 각 수리부속에 대한 상한이 정해져 있어야 난수를 발생하여 초기해 또는 해에 대한 변이를 생성할 때 임의의 수리부속 수량을 만들 수 있다. 수리부속에 대한 상한은 다음과 같은 과정으로 구한다.

- 단계 1 : 모든 정비/보급 부대에서 보유한 수리부속을 무한대로 설정한다.
- 단계 2 : 시물레이션을 통해 각 부대별 수리부속별 교환회수에 대한 통계량을 산출한다.
- 단계 3 : 시물레이션을 반복한다.
- 단계 4 : 품목의 교환 부대에서 수리부속에 대한 상한은 다음과 같이 계산한다.

$$SB_{ij} = \text{MAX}\{REP_{ij}^r | r=1, \dots, TR\} + 3\sigma_{ij}^R \quad (4)$$

단계 5 : 교환 부대의 상위 부대에서 수리부속에 대한 상한은 다음과 같다.

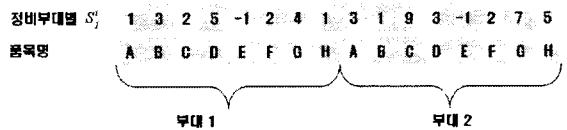
$$SB_{ij} = \sum_{k \in LU_i} SB_{kj} \quad (5)$$

정비/보급 부대에 수리부속을 무한대로 설정한 후에 각 품목의 교환 부대에서 교환이 요청되는 회수를 기초로 하여 상한을 설정한다. 수리부속에 대한 충분한 상한을 설정하기 위해 반복 과정 중에 발생한 최대의 교환 회수에 $3\sigma_{ij}^R$ 의 범위를 추가적으로 고려한다. 교환 부대의 상위 부대에서 수리부속의 상한은 하위 부대 상한의 합으로 계산한다. 예를 들어, 부대1과 부대2의 상위 부대가 직접이고, 부대1에서 운용되는 완제품이 10대, 부대2에서 운용되는 완제품이 20대인 경우 최악의 경우 직접은 부대1과 부대2에서 발생하는 교환을 위한 수

리부속을 모두 보급해야 한다. 즉, 직접은 부대1과 부대2의 완제품을 합한 30대를 모두 지원하는 능력을 가지고 있어야 한다.

3.2 해의 표현

본 논문에서 각 정비/보급 부대별 수리부속에 대한 해의 표현은 한 개의 문자열로 표현한다. 한 개의 문자열은 순서적으로 정비/보급 부대별 수리부속의 초기 재고를 표현한다. 또한, 품목의 교환이 이루어지는 계단보다 하위 계단에는 해당 수리부속을 보유할 필요가 없으므로 '-1'로 표시하며 탐색과정에서 제외시킨다. 예를 들어, 총 부대가 2개이고, 품목이 8개인 경우에 해의 표현은 <그림 5>와 같이 표현될 수 있다.

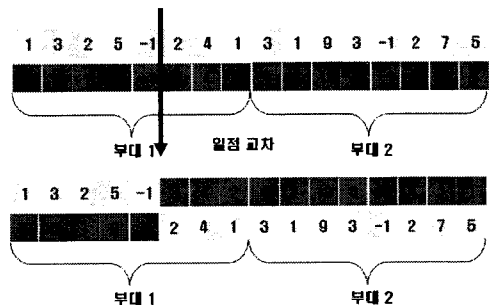


<그림 5> 문자열로 구성된 해

3.3 교차 및 변이 연산

교차는 일점 교차를 수행하게 된다. <그림 6>에서 보는 바와 같이 두개의 해를 임의로 선택하여 해인 문자열에서 임의의 한 점을 기준으로 교차를 발생시키게 된다.

따라서 교차 후에는 두개의 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.



<그림 6> 일점교차

3.4 적응도 평가 및 해의 선택

본 연구에서는 적응도 평가를 위해 시물레이션을 활용한다. 1개의 대안 해에 대해 적응도 평가를 위해 TR 회 만큼의 시물레이션을 반복 수행하며, 반복된 시물레이션 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 현세대의 염색체와 돌연변이, 교차된 염색체로부터 가장 적응도가 좋은 염색체를 세대수만큼 선별하여 다음 세대로 보내게 된다.

3.5 탐색 휴리스틱

유전알고리즘에서 생성된 해를 기준으로 국부 최적화 과정을 수행한다. 국부 최적화 과정에서는 유전알고리즘 각각의 현재 해가 가지고 있는 적응도와 가용도를 기준으로 해를 찾아간다. 탐색 과정은 다음과 같은 절차를 따른다.

- 단계 1 : 탐색하지 않은 한 개의 해를 선택한다. 모든 해에 대해 탐색을 수행했으면, 탐색을 중단한다.
- 단계 1.1 목표가용도 ≥ 평균가용도인 경우 단계 8로
- 단계 1.2 목표 가용도 * 허용 범위 ≤ 평균 가용도인 경우 단계 2로, 그렇지 않으면 단계 1로 간다.
- 단계 2 : 해당 해의 탐색 반복 회수를 임의로 생성한다.
- 단계 3 : 최하위 운용부대 중 가장 높은 가용도를 갖는 운용부대를 선택한다.
- 단계 4 : 최하위 부대를 지원하는 상위 부대를 찾는다.
- 단계 5 : 각 부대별 수리부속별에 대해 다음을 계산한다.

$$Min\{(C_{ij}^B + C_{ij}^H + C_{ij}^T)/N_i\} \quad (6)$$

- 단계 6 : 단계 5에서 찾은 i 부대에 j 수리부속의 수량을 1개 감소시키고, 시물레이션을 통해 적응도를 계산한다.
- 단계 7 : 수행된 반복회수가 임의로 생성된 반복회수보다 적으면, 단계 3으로 그렇지 않으면, 단계 1로 간다.

단계 8 : 해당 해의 탐색 반복 회수를 임의로 생성한다.

단계 9 : 최하위 운용부대 중 가장 낮은 가용도를 갖는 운용부대를 선택한다.

단계 10 : 각 부대별 수리부속별에 대해 다음을 계산한다.

$$Min\{(C_{ij}^B + C_{ij}^H + C_{ij}^T + MDT_{ij} \cdot PRICE_{j,u})/N_i\} \quad (7)$$

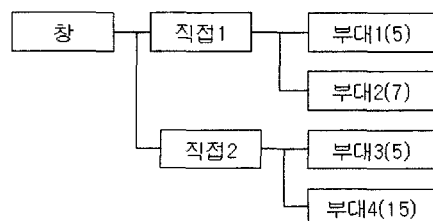
단계 11 : 단계 10에서 찾은 i 부대에 j 수리부속의 수량을 1개 증가 시키고, 시물레이션을 통해 적응도를 계산한다.

단계 12 : 수행된 반복회수가 임의로 생성된 반복회수보다 적으면, 단계 9로 그렇지 않으면, 단계 1로 간다.

단계 1.2에서 허용범위는 탐색에 대한 종료 조건을 의미한다. 허용범위가 작을 경우 목표로 하는 가용도에 더욱 근접하게 탐색을 수행하게 되나, 탐색을 위해 더욱 많은 시간을 필요로 한다.

4. 실험예제

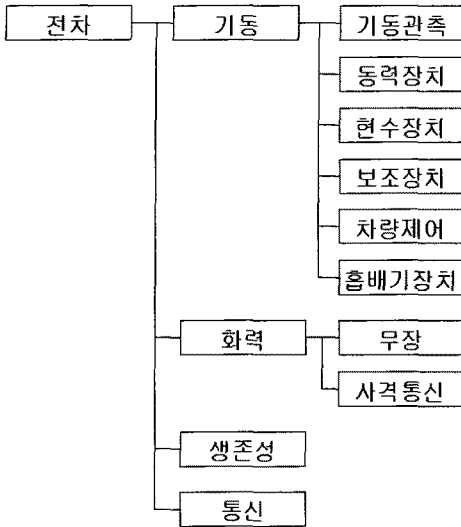
본 장에서는 제안된 최적화 기법을 활용하여 수리부속 예측에 대한 실험을 수행한다. MIME 시스템에 대한 시물레이션을 수행하기 위해서는 운용시스템의 구조와 정비/보급 부대의 구조가 필요하며, 본 예제에서는 <그림 7>와 같이 정비/보급구조를 표현하였으며, 최하위 부대인 부대1~4에는 부대에 배치된 전차의 수를 나타낸다. 또한, <그림 8>과 같이 다계층 시스템으로 가상의 전차를 구성한다. 각 품목간의 신뢰성 관계는 모두 직렬로 구성하였으며, 품목을 정비하기 위한 정비요원/정비장비는 무한히 있는 것으로 가정하였다. <표 6>은



<그림 7> Multi Echelon으로 표현된 정비/보급 구조((): 원제품 배치수)

각 품목의 고장 및 정비 데이터를 나타내며, 품목의 창 획득시간, 교환/수리 시간은 실험의 편의상 지수분포로 가정하였다.

정비계단간의 수리부속 이동 소요시간은 다음과 같다.
 창 ↔ 직접 : 150
 직접 ↔ 부대 : 100



<그림 8> 완제품 구조

유전알고리즘에서 사용하는 파라미터는 다음과 같다.
 교차율 : 0.3
 돌연변이율 : 0.2
 세대수 : 30

한 개의 해에 대해 시뮬레이션의 반복회수는 30회, 시스템의 운용시간은 100000시간으로 설정하였다. 앞에서 주어진 정보를 기준으로 <그림 4>와 같은 절차로 목표가용도가 0.8, 0.9인 경우에 대해 수리부속에 대한 최적화를 수행한다.

<표 7>은 목표가용도가 0.8인 경우와 0.9인 경우에 대한 가용도 및 비용에 대한 분석 결과를 나타내며, <표 8>과 <표 9>에서는 제시된 알고리즘을 통해 산출된 각 부대별 초기 수리부속 보유량을 나타낸다.

<표 7>에서 목표가용도 0.8보다 0.9에서 높은 비용

<표 6> 품목의 고장/정비 정보

| 품목명 | 품목가격 | 무게 | 창-획득시간 | 고장분포 | 형상모수 | 척도모수 | 교환시간 | 수리시간 | 교환부대 | 수리부대 |
|-------|-------|----|--------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 기동 | 10000 | 70 | 96 | - | - | - | 1 | - | 부대 | - |
| 기동관측 | 1500 | 10 | 96 | Weibull | 1.5 | 1700 | 2.5 | 50 | 직접 | 창 |
| 동력장치 | 3500 | 20 | 96 | Weibull | 1.3 | 1500 | 2.8 | 50 | 직접 | 창 |
| 현수장치 | 2000 | 15 | 96 | Weibull | 2 | 1000 | 4 | 60 | 부대 | 폐기 |
| 보조장치 | 1000 | 5 | 96 | Weibull | 1.2 | 2000 | 6 | 40 | 직접 | 직접 |
| 차량제어 | 700 | 5 | 96 | Exp | - | 1500 | 6 | 70 | 직접 | 창 |
| 흡배기장치 | 400 | 3 | 96 | Weibull | 1.1 | 3700 | 2 | 30 | 직접 | 직접 |
| 화력 | 6000 | 50 | 96 | - | - | - | 0.5 | - | 부대 | - |
| 무장 | 2500 | 20 | 96 | Weibull | 1.3 | 1500 | 2.5 | 80 | 부대 | 직접 |
| 사격통신 | 1500 | 10 | 96 | Weibull | 1.1 | 2000 | 3 | 80 | 부대 | 직접 |
| 생존성 | 3000 | 35 | 96 | Weibull | 1.3 | 2200 | 2.5 | 40 | 부대 | 직접 |
| 통신 | 2000 | 25 | 96 | Weibull | 1.1 | 2500 | 2 | 50 | 부대 | 직접 |

<표 7> 수리부속 예측 비용

| 목표가용도 | 가용도 | 총비용 | 구입비 | 재고유지비 | 주문비 | 운송비 |
|-------|------|---------|--------|---------|------|---------|
| 0.8 | 0.83 | 4311223 | 609500 | 79170.7 | 5050 | 3617502 |
| 0.9 | 0.93 | 5331369 | 693500 | 94750.7 | 7590 | 4535528 |

을 가졌으며, <표 8>과 <표 9>에서 보는 것과 같이 완제품이 가장 많이 배치된 부대4에 수리부속이 가장 많이 배치되어 있는 결과를 보여주고 있다. 이 같은 경향은 고장이 가장 많이 발생하여 운용 가용도를 저하시키는 부대에 수리부속을 많이 보급함으로써 가용도를 향상시키기 위한 것이다. 전체적으로 운용부대에서의 수

리부속의 수요가 적은 경우 상위부대에서 많은 수리부속을 보유하고 있으며, 기동과 같이 고장률이 높은 LRU 품목을 위주로 수리부속이 많이 예측되는 경향을 보이고 있다.

<표 10>은 기동관측의 형상모수를 4000으로 변경하였을 경우에 대한 결과를 보여준다. 기동관측의 고장

<표 8> 정비부대별 수리부속 보유 수량(목표가용도 : 0.8)

| | 창 | 직접1 | 직접2 | 부대1 | 부대2 | 부대3 | 부대4 |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 기동 | 7 | 3 | 0 | 7 | 4 | 4 | 10 |
| 화력 | 0 | 0 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 |
| 생존성 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 통신 | 1 | 0 | 3 | 1 | 4 | 0 | 3 |
| 기동관측 | 11 | 1 | 4 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 동력장치 | 1 | 3 | 3 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 현수장치 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 보조장치 | 4 | 0 | 6 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 차량제어 | 1 | 0 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 흡배기장치 | 1 | 1 | 2 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 무장 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 8 |
| 사통 | 11 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

<표 9> 정비부대별 수리부속 보유 수량(목표가용도 : 0.9)

| | 창 | 직접1 | 직접2 | 부대1 | 부대2 | 부대3 | 부대4 |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 기동 | 4 | 1 | 10 | 3 | 10 | 3 | 11 |
| 화력 | 1 | 0 | 5 | 2 | 4 | 2 | 4 |
| 생존성 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 통신 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 기동관측 | 1 | 5 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 동력장치 | 10 | 1 | 6 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 현수장치 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 보조장치 | 6 | 3 | 5 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 차량제어 | 7 | 3 | 4 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 흡배기장치 | 3 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 무장 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| 사통 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 |

회수가 감소함에 따라 상위 품목인 기동의 수리부속과 기동관측의 수리부속 수량이 현격히 감소함을 알 수 있다.

수 있으며, 현수와 차량제어의 보유수량은 증가함을 알 수 있다.

<표 11>은 기동관측의 품목비용이 4000인 경우 수리부속 예측 수량을 나타낸다. 기존에 1500에서 4000으로 변경된 경우 기동관측의 예측수량은 감소함을 알

5. 결 론

본 연구에서는 수리부속 최적화를 위해 시물레이션

<표 11> 기동관측 형상 모수 4000인 경우 수리부속 보유 수량(목표가용도 : 0.8)

| | 창 | 직접1 | 직접2 | 부대1 | 부대2 | 부대3 | 부대4 |
|-------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 기동 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 6 | 14 |
| 화력 | 5 | 0 | 0 | 3 | 0 | 4 | 8 |
| 생존성 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 통신 | 0 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 6 |
| 기동관측 | 2 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 동력장치 | 3 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 현수장치 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 3 |
| 보조장치 | 8 | 0 | 4 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 차량제어 | 2 | 4 | 6 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 흡배기장치 | 4 | 1 | 10 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 무장 | 9 | 3 | 2 | 0 | 1 | 1 | 4 |
| 사통 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 |

<표 10> 기동관측 품목비용 4000인 경우 수리부속 보유 수량(목표가용도 : 0.8)

| | 창 | 직접1 | 직접2 | 부대1 | 부대2 | 부대3 | 부대4 |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 기동 | 1 | 0 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 |
| 화력 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 생존성 | 6 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 통신 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 기동관측 | 6 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 동력장치 | 3 | 0 | 3 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 현수장치 | 0 | 0 | 6 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| 보조장치 | 3 | 0 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 차량제어 | 15 | 6 | 9 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 흡배기장치 | 0 | 0 | 8 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 무장 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 4 |
| 사통 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 4 |

과 유전알고리즘을 사용하였다. MIME 시스템을 표현하기 위해 각 객체별 클래스를 정의 하였으며, 시뮬레이션을 통해 산출되는 통계량을 정의하였다. 또한, 유전알고리즘과 제안된 탐색 휴리스틱을 이용하여 수리부속을 최적화 시키는 방안을 제시하였으며, 가용도, 분포모수와 비용의 변화에 따른 수리부속 변화를 실험예제로 나타내었다.

수리부속은 현실에서 발생하는 시스템의 상황과 시스템을 지원하는 다양한 환경에 크게 영향을 받게 된다. 추후 연구과제로는 시뮬레이션을 이용한 수리부속 예측을 위한 알고리즘의 정밀도를 좀 더 향상 시킬 필요가 있으며, 현실 상황의 변화에 따라 MIME 시스템에서 (S, S-1)의 재고정책과 각 부대별 수리부속이 정기 보급되는 경우에 각 부대별 수리부속을 할당하는 문제를 다룰 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] de Haas, H.F.M. and Verrijdt, J.H.C.M.(1997), "Target setting for the departments in an aircraft repairable item system", *European Journal of Operational Research*, 99, 596-602.
- [2] Graves, S.C.(1985), "A multi-echelon inventory model for a repairable item with one- for-one replenishment", *Management Science*, 31, 1247-1256.
- [3] Sherbrooke, C.C.(1968), "METRIC: Multi- echelon technique for recoverable item control", *Operations Research*, 16, 122-141.
- [4] Sherbrooke, C.C.(2004), *Optimal inventory modeling of systems: Multi-echelon Techniques*, 2nd Edition, Wiley, New York.
- [5] Slay, F.M.(1984), "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, D.C. conference.
- [6] Köchel, P., Nieländer, U.(2005), "Simulation-based optimization of multi-echelon inventory systems", *International Journal of Production Economics*, 93, 505-513.
- [7] Tee, Y.S., Rossetti, M.D.(2002), "A robustness study of a multi-echelon inventory model via simulation", *International Journal of Production Economics*, 80, 265-277.