

## 열차 중수선 시설의 최적 설계를 위한 시뮬레이션 분석 방법 Simulation-based Optimal Design Method for the Train Overhaul Maintenance Facility

엄인섭\* · 정수동\*\* · 오정헌\*\* · 이홍철<sup>†</sup>  
In-Sup Um · Soo-Dong Jeong · Jung-Hun Oh · Hong-Chul Lee

**Abstract** This paper presents the optimal design and analysis method of the train overhaul maintenance facility based on the simulation. Because the train is composed of a coach or more, we design the simulation model after analyzing the operation of train into train, coach, coach's body parts and wheel parts and so on. In simulation analysis, we consider the critical (dependent) factors and design (independent) parameters for the selection of alternatives and optimal design. Therefore, Multi Criteria Decision Making (MCDM) is proposed for the selection of alternatives and optimal method in order to find the optimal design factors. The case study for the above approach is used for the electronic locomotive overhaul maintenance facility. This paper provides a comprehensive framework for the train overhaul maintenance facility design using the simulation, MCDM and optimal methods. Therefore, the method developed for this research can be adopted for other enhancements in different but comparable situation.

**Keywords** : Train Overhaul Maintenance Facility, Multi-Criteria Decision Making, Simulation Optimization

**요 지** 열차 중수선 시설은 편성, 차량, 차체, 대차 등으로 구분하여 프로세스를 수행하게 되는데 각각의 수선 방법 및 프로세스가 상이하여 일반적인 수리적 기법으로 분석하는 것은 한계를 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 열차 중수선 시설의 시뮬레이션 모델링 및 분석에 관한 체계적인 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 분석은 종속 변수와 설계 변수를 구분하여 시뮬레이션 모델링에 반영 한 후 다 기준 의사결정 기법을 사용하여 설계 대안을 선정하게 된다. 그리고 선정된 대안에 관한 최적화를 수행하여 실제 설계에 적용하게 된다. 이 분석 방법에 관한 예로 전기기관차 중수선 시설에 관한 시뮬레이션 설계 및 분석 방법을 제시하였다. 시뮬레이션에 기반 한 분석은 실제 시스템의 설계 전에 설계 변수의 최적화를 위하여 꼭 수행하여야 하며, 최적의 설계를 구축하는 하나의 중요한 단계로 고려되어야 하고, 본 논문에서 제시된 방법은 시뮬레이션의 체계적인 접근에 활용이 될 수 있다.

**주요어** : 중수선 시설, 다 기준 의사 결정, 시뮬레이션 최적화

### 1. 서론

철도의 가장 큰 역할은 승객 및 화물을 정확하고 안전하게 수송하며 안정적인 물류시스템의 역할을 하는 것이다. 철도 시스템은 차량, 선로, 통신, 신호, 정비 등 여러 가지 기술의 복합체 구성이 되는데 그 중에서도 안전성과 관련된 역할을 하는 시스템으로 열차 중수선 시설을 고려할 수

있다.

열차 중수선 시설은 검수 연수에 따른 계획적이고, 체계적인 검수가 이루어지고 있기 때문에 향후 철도 설비의 확충에 있어서 초기에 중수선 시설의 용량을 평가하고, 계획 정비의 일환으로 중수선 설비의 구축이 이루어지고 있다. 또한 중수선 시설은 각 나라마다 자신의 고유한 특성 및 경험을 가지고 운영되기 때문에, 우리나라의 중수선 시설도 마찬가지로 체계적이고 과학적인 분석을 통한 설계가 이루어져야 하며 이를 바탕으로 중수선 시설의 구축과 운영을 하여야 철도 설비의 중요한 시스템으로서 중추적 역할을 할 수 있을 것이다.

\* 책임저자 : 고려대학교 정보경영공학부 교수  
E-mail : hclee@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3389

\*\* 고려대학교 정보경영공학부 박사과정  
(주)상안 철도설비부

열차 중수선 시설의 운영은 정기 검수 (Time-based Maintenance)와 비 정기 검수 (Event-based Maintenance)로 구분하게 되는데, 정기 검수는 일정 주기마다 열차의 성능을 확인하여 계획한 수준으로 유지시키고, 안전성과 신뢰성을 확보하는 정비 시스템으로 정의 할 수 있고, 비 정기 검수는 열차의 고장 또는 기능 이상이 발생하였을 때, 그 부분을 찾아서 부품 교체 또는 정비를 하는 것을 말한다. 일반적으로 대부분의 중수선 시설 작업은 정기 검수에 의한 계획을 세우고, 비 정기 검수는 과거 경험에 의한 계획을 세워서 중수선 시설의 정비 운영에 접목 시키게 된다.

중수선 시설의 검수는 편성 단위에서 차량, 차체 그리고 대차 각 부품 등으로 나누어져서 검수가 수행되어지며, 각 프로세스 별 상이한 검수가 이루어지기 때문에 이와 같은 시설의 설계 및 분석은 수리적 모델로 분석하기에는 어려움이 있다[1,2]. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 설계 및 분석을 통하여 중수선 시설 전체 및 하부 프로세스의 분석을 실시하고 최적의 설계 방법을 제시하려고 한다. 중수선 시설의 시뮬레이션 설계 및 분석을 수행하기 위하여 본 논문에서는 세부 시뮬레이션 설계 방법과 분석 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 설계 방법은 편성단위, 차량 단위 분석을 한 후, 차체 및 대차 프로세스의 세부 분석을 실시 한 후 시뮬레이션 설계를 수행하여 모델의 정확성과 타당성 검토를 수행하였다. 시뮬레이션 분석 방법은 종속 변수와 설계 변수를 선정한 후 Warm-up 분석을 수행하였다. 안정화 상태 이후에 대안의 비교, 분석을 수행하여 대안의 선정을 수행 한 후, 선정된 대안의 최적화를 수행하였다. Fig. 1은 중수선 시설의 시뮬레이션 설계 및 분석 방법에 관한 순서도를 나타낸다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 철도 중수선 시설의 기존 연구에 대하여 알아보고, 3장에서는 철도 중수선 시설의 예로 전기기관차 중수선 시설 시뮬레이션 설계 방법을 제시한다. 그리고 4장에서는 전기기관차 중수선 시설의 설계 대안 선정 및 시뮬레이션 최적화를 통한 결과 분석 방법을 제시하며 결론으로 마무리 하였다.

## 2. 기존 연구

### 2.1 중수선 시설에 관한 연구

중수선 시설에 관한 연구는 많은 연구가 수행되고 있지 않지만, 주로 시뮬레이션 기반의 연구가 진행 중이며 중수선 시설의 최적화를 다룬 논문이 주를 이룬다.

Hani Yasimina(2007) 등은 시뮬레이션을 기반으로 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)에 기반을 둔 다 기준 최적화 (Multi-Objective Optimizer) 소프트웨어를 이용하여 중수선 시설의 스케줄 최적화를 수행하였다[3].

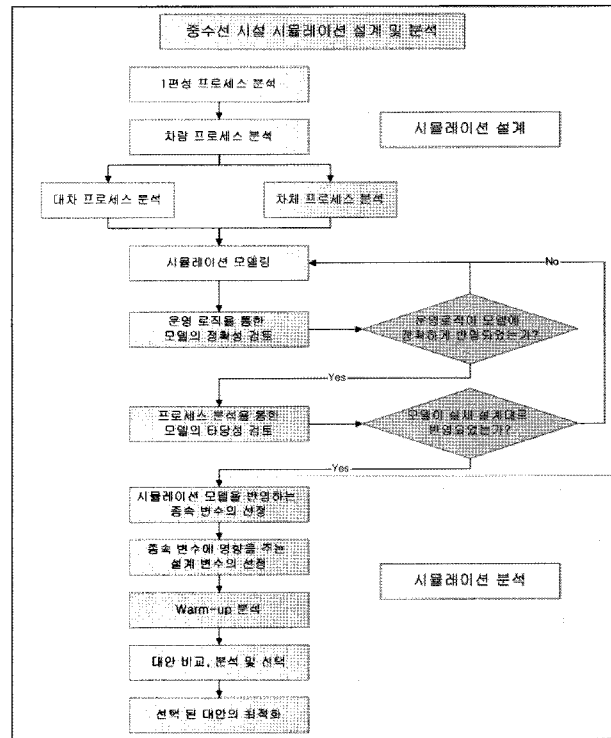


Fig. 1. Simulation Design and Analysis for the Train Overhaul Maintenance Facility

엄인섭(2007) 등은 철도 정비 시설의 시뮬레이션 설계를 통한 최적 설계 방법 및 운용을 제시하였다. 철도 정비 시설의 시뮬레이션 모델링 및 분석을 실시하고, 최적 설계 변수 진화전략(Evolution Strategy)을 이용하여 산출하였다 [4].

### 2.2 시뮬레이션 최적화

시뮬레이션 최적화 문제는 시스템의 특성을 반영한 종속 변수와 설계 변수의 선정을 통하여 변수들 간의 상호 관계(Interaction) 및 복잡성 등을 고려한 최적해 집합의 산출이 많이 연구되고 있는데, 주로 경영과학(Operation Research) 기법을 시뮬레이션과 결합 한 기법이 많이 이용되고 있다.

Fu(2002)는 시뮬레이션 기반의 최적화 기법을 다음과 같이 구분하여 제시하였다[5].

- 순위와 선택(Ranking and Selection), 다중비교 절차 (Multiple Comparison Procedure) 그리고 순위 최적화 (Ordinal Optimization)
- 확률 추론(Stochastic Approximation)
- 반응표면분석(Response Surface Methodology)
- 단순경로 최적화(Sample Path Optimization)
- 그외-무작위 탐색(Random Search), Simulated Annealing, 진화전략(Evolution Strategy), 유전자 알고리즘

(Genetic Algorithm), 산점 탐색(Scatter Search), 타부 탐색(Tabu Search)

하지만 철도 중수선 시설의 연구에 있어서 아직 많은 부분이 미비하며, 체계적인 설계 및 분석 기법이 제시되었고 할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 전기기관차 중수선 시설의 예를 통하여 중수선 시설의 체계적인 설계 및 분석 방법을 제시하고자 한다.

### 3. 전기기관차 중수선 시설의 시뮬레이션 설계

#### 3.1 시뮬레이션 가정

전기 기관차 중수선 시설의 시뮬레이션 모형을 설계하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 조건을 시뮬레이션 가정으로 제시하였다.

- (1) 중수선 시설의 운영은 8hr/day 기준으로 244day/year 작업하는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 각 설비 별 고장률은 고려하지 않으며, 항상 이용 가능한 가용상태로 정의한다.
- (3) Putty, 마스킹, 도장, 건조 작업장에서 前 차량이 작업 중이면, 차체 수선장에서 대기하는 것을 원칙으로 한다.
- (3) 트레버서는 작업이 완료되면 그 자리에서 대기하는 것을 원칙으로 한다.
- (4) 트레버서가 이용 중일 때는 차량 이용 신호를 보내는 순서대로 트레버서를 이용한다.
- (5) 도장 및 건조는 같은 날 작업하는 것을 원칙으로 하며, 하루에 2량 이상은 사용하지 않는 것으로 제한한다.
- (6) 도장을 마친 상태에서 일과가 끝나는 경우 건조 작업장으로 이동하여 자연건조를 하는 것을 원칙으로 한다.
- (7) 대차 및 윤축 세척 후에는 전 단계 Rail 또는 가용 Rail에서 자연 건조를 실시한다.
- (8) 차체 및 대차의 Interlock은 고려하지 않는다.
- (9) 소형 지게차와 크레인 모두 사용이 가능할 때에는 가장 가까운 기기를 이용하는 것으로 한다.
- (10) 각 작업 장 별 작업자는 항상 작업대기 상태 및 작업 상태에 있는 것을 원칙으로 한다.

#### 3.2 전기기관차 중수선 시설 검수량 검토

전기기관차 중수선 시설은 정기검수 및 비 정기 검수에 의한 계획적인 시설의 이용이 이루어진다고 할 수 있다. 따라서 중수선 시설의 검수량을 검토하여 시뮬레

이션의 입력 변수로 선정을 하여야 한다. 2011년 구형 37량, 신형 216량을 보유하고 있다는 가정 하에 검수량을 선정하였다. 검수량 검토에 관한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Maintenance Capacity for the Electric Locomotive Overhaul Maintenance Facility

| 구분  | 검수종류  | 일일 검수량 | 재장일 | 재 장 일 수 |        |        |
|-----|-------|--------|-----|---------|--------|--------|
|     |       |        |     | 입장 검사장  | 차체 수선장 | 기능 검사장 |
| 구형  | 2년검수  | 0.033  | 16일 | 0.5일    | 13.5일  | 2일     |
|     | 4년검수  | 0.017  | 19일 | 0.5일    | 16.5일  | 2일     |
|     | 8년검수  | 0.017  | 24일 | 0.5일    | 20.5일  | 3일     |
|     | 임시검수  | 0.026  | 7일  | 0.5일    | 5.5일   | 1일     |
|     | 소 계   | 0.093  |     |         |        |        |
| 신형  | 3년검수  | 0.139  | 17일 | 0.5일    | 15일    | 1.5일   |
|     | 6년검수  | 0.070  | 19일 | 0.5일    | 16.5일  | 2일     |
|     | 12년검수 | 0.025  | 24일 | 0.5일    | 20.5일  | 3일     |
|     | 18년검수 | 0.044  | 29일 | 0.5일    | 25.5일  | 3일     |
|     | 임시검수  | 0.149  | 7일  | 0.5일    | 5.5일   | 1일     |
| 소 계 | 0.427 |        |     |         |        |        |
| 합 계 | 0.520 |        |     |         |        |        |

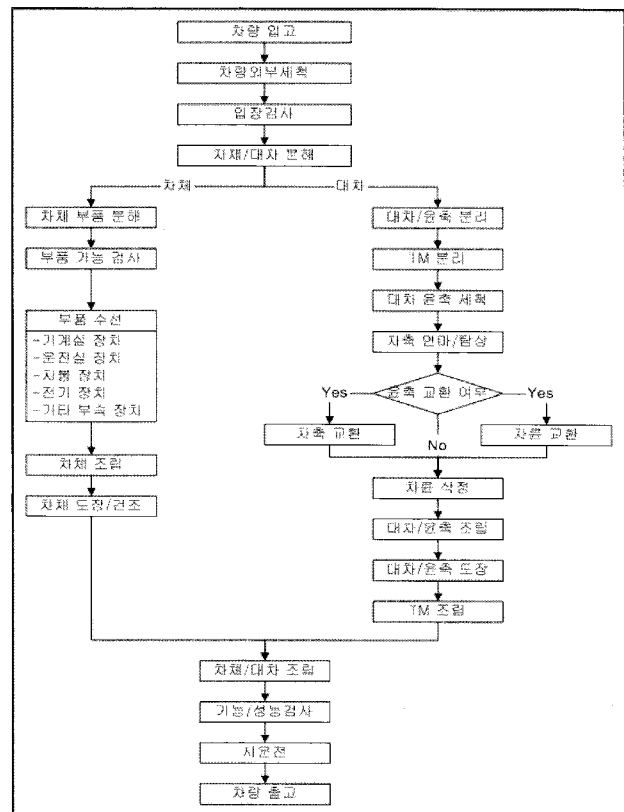


Fig. 2. Operational Process for the Electric Locomotive Overhaul Maintenance Facility

### 3.3 전기기관차 중수선 시설 프로세스 분석 및 시뮬레이션 모델 명세서

전기기관차 중수선 시설의 투입 차량은 1량/1편성으로 입고가 되기 때문에 차량, 차체 대차로 구분하여 분석을 실시하였다. Fig. 2는 전기기관차 중수선 시설의 운영 프로세스를 나타낸다. 위의 순서를 기준으로 하여 Table 2와 같이 시뮬레이션 모델 명세서를 작성하였다.

**Table 2. Simulation Model Specification for the Electric Locomotive**

|                          |   |
|--------------------------|---|
| 입장 검사장                   | •모든 차량은 입고 된 후 입장 검사를 실시하게 됨.   |
| 차량 분해 및 조립               | •전기기관차는 1량/1편성 입고가 되기 때문에 편성 분해는 고려하지 않음.<br>•각 차량은 차체와 대차로 분해 된 후, 차체는 가대차에 의하여 이동 됨.          |
| 트레버서                     | •트레버서에 차량 상차 : 20m/min<br>이동 : 30m/min<br>하차 : 20m/min<br>•트레버서 이동 시 차량 상차 유무에 따른 속도변화 고려하지 않음. |
| 크레인                      | •주권 : 4.5m/min, 횡행 : 16m/min,<br>주행 : 20m/min   |
| 소형 지게차                   | •속도 : 20m/min, 가속도: 0.3m/sec <sup>2</sup>   |
| 리프터                      | •리프터는 Up, Down으로 나누어서 10min 소요되는 것으로 함.   |
| 세척장, 퍼팅장, 마스크장, 도장장, 건조장 | •각 작업장은 사전에 차량 별 정해진 시간에 따라 작업을 수행하는 것을 원칙으로 함.   |
| 출장 검사장                   | •차체/대차 결합이 된 후에 모든 차량은 출장 검사를 실시하게 됨.   |
| 가대차 이용                   | •차체/ 대차 분해 후, 차체는 모든 공정을 가대차에 상차 된 상태로 수행.  |
| 대차 프로세스                  | •대차는 대차/윤축/TM/축상 등으로 분해되며, 작업이 완료 되면 각 조립 작업장에서 분해에 역순하여 조립을 수행하게 됨.                            |
| 차체 프로세스                  | •각 차체에서 분해 된 부품은 세부 작업장에서 작업이 이루어지며, Material Flow 관점에서 모델링을 실시.                                |

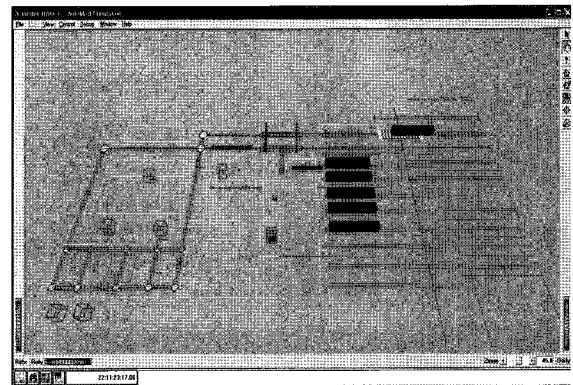
### 3.4 전기기관차 중수선 시설 대안 선정

전기기관차 중수선 시설의 대안 선정은 아래 Fig. 3, 4와 같이 대안1과 대안2를 선정 하였다. 대안1과 대안2의 가장 큰 차이점은 지붕 및 변압기의 분해를 어디에서 실시하는가와 대차 프로세스에 가장 큰 차이점이 있다. 대안 1은 차체 분해장에서 지붕 및 변압기의 분해를 실시하며, 대안 2는 차체 수선장 상부(A)에서 분해를 실시하고 하부(B)로 이동하여 나머지 기기를 분해하는 운영로직이 된다. 구형 전기기관차의 변압기 분해는 크레인을 이용하여 분해하며, 신형의 변압기는 하부를 통하여 변압기

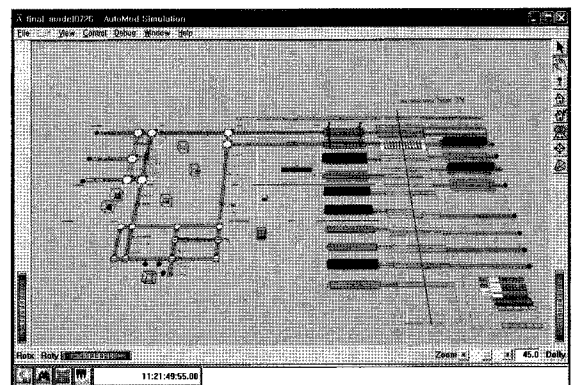
전용 대차를 이용하기로 한다. 또한 대차 프로세스는 대차 세척 전에 대차, TM, 윤축이 분해되어 대차의 운영 로직을 수행하게 되는데 설계 도면의 상이한 점 뿐 아니라 각각의 대안 별로 상이한 운영프로세스를 가지게 된다. 따라서 두 대안을 가지고 시뮬레이션 설계 및 분석을 실시하여 최적의 운영 로직 및 설계 대안에 관한 검증을 실시 할 것이다.

### 3.5 전기기관차 중수선 시설 시뮬레이션 모델링

전기기관차 중수선 시설의 시뮬레이션 모델링을 위하여 본 논문에서는 Material Handling 전용 프로그램인 AutoMod V.12를 이용하였다[2]. 중수선 시설의 전기기관차가 입고가 되면, 각각의 차체, 대차, 하부 부품이 Event Driven 관점에서 각각의 Process를 수행하게 되며, 각 작업이 완료가 되면 대기 위치에서 대기하여 최종적으로는 다시 조립이 될 수 있도록 시뮬레이션 모델링 설계가 되었다. 또한 각 작업장의 대기 부품은 구형, 신형의구분이 있으며, 분해된 부품이 그대로 재조립이 될 수 있도록 부품에 번호를 부여하여 설계 하였다.



**Fig. 3. Simulation Design for Alternative 1 of the Electric Locomotive Overhaul Maintenance Facility**



**Fig. 4. Simulation Design for Alternative 2 of the Electric Locomotive Overhaul Maintenance Facility**

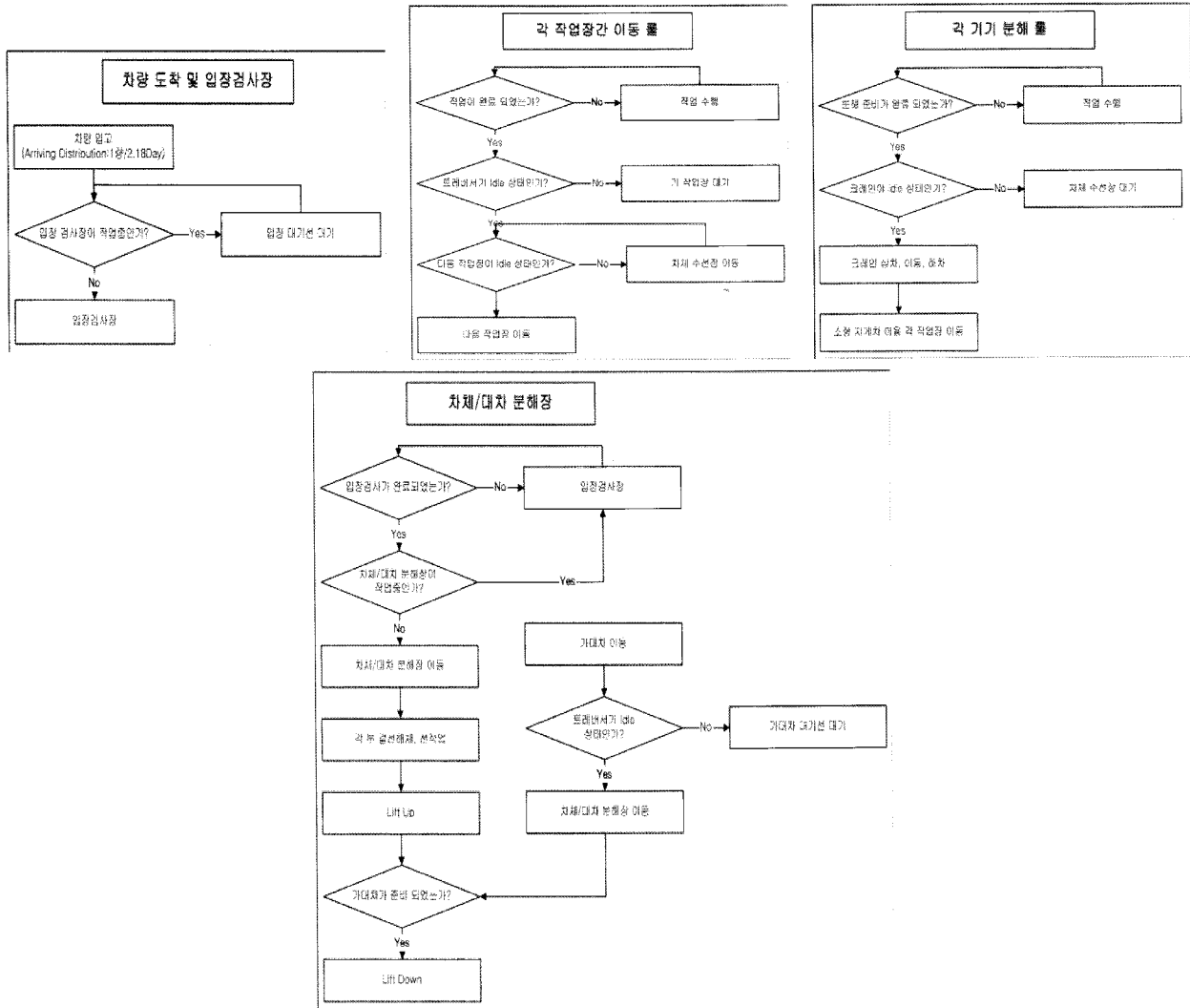


Fig. 5. Simulation Operation Rules for the Electric Locomotive Overhaul Maintenance Facility

3.6 시뮬레이션 모델의 정확성 검토(Verification)

모델의 정확성 검토는 시뮬레이션 설계자가 설계한 대로 시뮬레이션을 구현 하였는가를 평가하는 방법이다. 이와 같은 평가가 꼭 필요한 것은 시뮬레이션 설계자의 의도가 정확하게 시뮬레이션에 묘사 되었는지를 검토하기 위한 하나의 절차라고 할 수 있다. 일반적으로 기 시스템의 정확성 검토는 종속 변수(Cycle Time, 각 기기의 Utilization 등)를 이용하여 시뮬레이션 종속 변수와의 동일성 검토(Test of Homogeneity)를 통하여 검증이 가능하다. 또한 새로운 시스템의 건설을 위한 타당성 검토는 실제 시스템에서의 출력자료가 없는 관계로 운영 및 설계 로직이 시뮬레이션 모델링에 정확하게 반영이 되었는지 검토를 하여야 한다. 만약에 시뮬레이션 운영 룰에 맞지 않게 모델링이 되었다면, 시뮬레이션 설계자는 운영 룰에 맞게 수정을 하고, 기 시스템이 아니라면 설계자 자신의 자체 검증을 꼭 수행하여야만 할 것이다. Fig. 5는 전기기관차 중수선 시설의 시뮬레

이션 운영 룰 중 일부분을 나타낸다.

3.7 시뮬레이션 모델의 타당성 검토(Validation)

모델의 타당성 검토는 시뮬레이션 설계자가 시스템을 모델링 후, Real System을 잘 반영하는 지를 확인하는데 사용이 된다. 시뮬레이션 모델이 운영 로직에 맞게 정확하게 구현이 되었지만, Real System과 일치하지 않거나, 전혀 다른 프로세스로 시뮬레이션 설계가 되었다면, 시뮬레이션 분석 자체가 의미가 없는 스텝이 된다. 따라서 모델의 타당성 검토는 반드시 수행하여야 하며, 초기 Layout 설계자와 전문가와의 검토를 통한 절차를 수행하여야 한다. 모델의 타당성 검토를 위하여 본 논문에서는 프로세스 분석을 통한 분석을 수행하였다. Fig. 6은 대안 2에 대한 구형 2년 검수와 신형 3년 검수 프로세스를 나타내는데 차량, 차체, 대차 그리고 각 부품의 이동 프로세스 및 시간을 확인하여 시뮬레이션 모델과 비교하여 타당성 분석을 수행 하였다.



#### 4. 전기기관차 중수선 시설의 시뮬레이션 분석

##### 4.1 종속 변수의 선정

본 논문에서는 전기기관차 중수선 시설의 종속 변수를 Table.3과 같이 선정하였다. 차량 별 평균 Cycle Time은 중수선 시설의 특성 상 일정 기간 안에 작업이 마무리 되어야 다음 차량이 입고가 되는데 차량 입고 스케줄에 맞게 작업이 이루어지는가를 확인 하는 지표로 사용된다. 각 기기 별 이용율은 중수선 시설 대부분의 작업이 수작업과 장비를 이용하는 작업이 병행 되는데 이용율이 너무 높아서 사용이 불가능 하다면 중수선 시설의 병목구간으로 되고, 이용율을 이용하여 대부분의 중수선 시설이 계획 정비의 방안으로 활용하기 때문에 종속 변수로 선정하였다. 또한 트레버서는 중수선 시설에서 차체 이동을 위한 장비로서, 가장 중요한 이동 수단이 되기 때문에 트레버서 이용율을 선정하였다[4]. 현재 제시된 대안은 모두 트레버서 1대를 이용하기 때문에 트레버서 혼잡도는 고려하지 않았다. 더 많은 종속 변수가 고려된다면, 민감도 분석을 통하여 종속 변수와 설계 변수의 선택도 가능할 것이다. 하지만 본 논문에서는 가능한 모든 변수를 종속 변수로 사용하여 분석의 정확성을 높이려고 하였다.

Table 3. Critical Factors for the Simulation

| 종속 변수                    | 단위       |
|--------------------------|----------|
| 각 차량 별 평균 Cycle Time     | Day/Hour |
| 각 기기 별 이용율 (Utilization) | %        |
| 트레버서 이용율 (Utilization)   | %        |

##### 4.2 설계 변수의 선정

설계(독립) 변수를 선정하는 방법은 종속 변수에 가장 큰 영향을 주는 요소들을 선택하여야 한다. 하지만 어떤 변수가 종속 변수에 가장 큰 영향을 주는지 확신하지 못하는 상황이라면 시스템의 특성을 반영할 수 있는 모든 변수를 선정하게 되는데, 중수선 시설의 특성상 각 작업장의 Process Time 및 Movement System의 운영 변수를 독립 변수로 사용하는 것이 가장 효율적인 선정 방법이 될 것이다. 세부 사항은 Fig.6의 프로세스 분석 시간에 제시하였다.

##### 4.3 Warm-up 분석

Warm-up 분석은 시뮬레이션 분석에 가장 기본이 되는 분석 방법이다. 시뮬레이션을 실행 하였을 때, 항상 초기 상태로부터 시뮬레이션이 수행되어지기 때문에 초기 상태

를 포함하여 분석하는데 무리가 있다. 따라서 Warm-up 분석을 통하여 시스템이안정화상태 (Steady-State)에 도달하는 시간을 분석하여 적용 하여야 한다. 그 다음 Warm-up 후의 시간을 시뮬레이션 분석을 위한 시간으로 선정하여 분석을 수행하게 된다. Warm-up 분석을 위한 종속 변수의 선정은 기 선정 된 종속 변수를 이용하여 안정화 상태를 추정하여야 한다[3]. 본 논문에서는 AutoStat V. 4.4를 이용하여 분석 한 결과 두 대안에 관한 Warm-Up Graph를 아래 Fig. 7, 8과 같은 결과를 산출 할 수 있었다[6]. 두 모델 모두 정규화 된 Warm-Up 분석은 약 40일 정도로 추정이 가능하지만, 정규화 되지 않은 분석은 약 75일 이후에 안정화 상태가 되는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 두 대안 모두 75일 이후에 분석을 실시하여, 12개월을 하나의 Scenario로 3회씩 반복한 결과를 대안의 분석 결과로 사용하였다.

##### 4.4 설계 대안의 비교, 분석 및 선정

시뮬레이션 설계 대안이 다수 존재하게 되는 경우, 실험이 완료 된 상태에서의 최적 대안의 분석, 비교, 선정을 한 가지 종속 변수 기준에서 분석을 하게 되면 다른 종속 변수와의 상호작용(Interaction)을 고려하지 못한 결과를 얻게 된다. 따라서 중수선 시설과 같이 다수의 종속 변수가 존재하는 시뮬레이션 분석에서는 다 기준 의사 결정 (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) 모형을 사용하여야 한다.

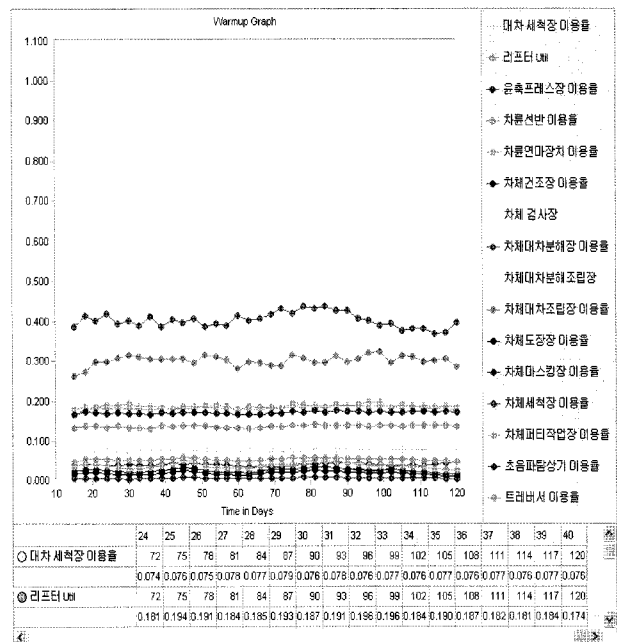


Fig. 7. Warmup Graph for the Alternative 1

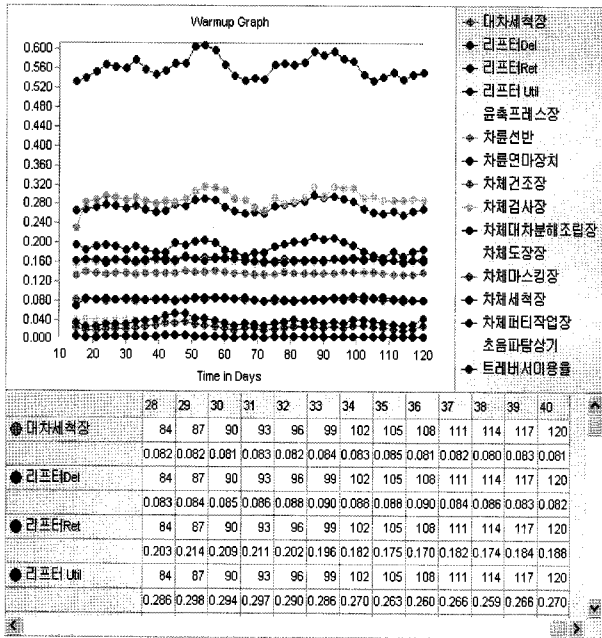


Fig. 8. Warmup Graph for the Alternative 2

Table 4. Utilization of the traverser and each workplace

| 이용률         | 대안 1   | 대안 2   |
|-------------|--------|--------|
| 트레버서        | 0.2864 | 0.2748 |
| 대차세척장       | 0.1244 | 0.1374 |
| 차체/대차 분해조립장 | 0.7526 | 0.5570 |
| 리프터 이용율     | 0.2530 | 0.2698 |
| 윤축프레스장      | 0.2270 | 0.2374 |
| 차륜선반        | 0.8708 | 0.8258 |
| 차륜연마장치      | 0.2370 | 0.2482 |
| 차체건조장       | 0.0312 | 0.0282 |
| 차체검사장       | 0.3748 | 0.2909 |
| 차체도장장       | 0.0270 | 0.0208 |
| 차체마스킹장      | 0.0218 | 0.0276 |
| 차체세척장       | 0.0086 | 0.0072 |
| 차체퍼티작업장     | 0.0558 | 0.0428 |
| 초음파탐상기      | 0.2430 | 0.2794 |

Table 5. Cycle Time for each Train (days)

| 구분 | 검수기준 | 대안 1    | 대안 2    |
|----|------|---------|---------|
| 구형 | 2Y   | 16.2572 | 15.484  |
| 구형 | 4Y   | 17.5020 | 17.185  |
| 구형 | 8Y   | 24.2731 | 21.23   |
| 구형 | T2   | 4.4271  | 3.8467  |
| 신형 | 3Y   | 15.5153 | 14.8171 |
| 신형 | 6Y   | 17.9145 | 18.0896 |
| 신형 | 12Y  | 23.9611 | 21.79   |
| 신형 | 18Y  | 29.3268 | 27.3621 |
| 신형 | T2   | 4.3753  | 4.1288  |

MCDM의 경우 가장 많이 사용되는 모형이 AHP(Analytic Hierarchy Process)와 DEA(Data Envelopment Analysis)이

다[7-9]. 선정 대안의 특성에 따라 위의 분석 기법을 활용하여 대안 선정을 하는 것이 효율적인 대안의 선정 방법이 될 것이다. 대안의 분석에서는 위의 종속 변수 선정에 관한 DATA 분석을 실시하였다. 트레버서 이용률 및 각 작업장 이용률은 AutoStat 분석 DATA를 이용하였으며, 각 차량별 CycleTime은 AutoMod Run에서 실험 완료 후 차량 별 Cycle Time을 Excel Sheet로 자동 저장을 하여 분석 DATA로 사용하였다[6]. 각 분석 DATA에 관한 요약을 Table 4와 5에 나타내었다.

대안의 비교, 선정은 위 분석 DATA를 기준으로, 다 기준 의사결정 모형인 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하였다. AHP는 대안의 선택을 위하여 각 기준 별 쌍대 비교(Pairwise Comparison)를 실시하게 되는데, 쌍대 비교를 위한 계층화 모형의 구축을 우선적으로 실시하여야 한다. 본 시뮬레이션 분석에서는 종속 변수에 의한 계층화 모형을 AHP 전용 프로그램인 Expert Choice 2000 2nd Edition을 이용하여 Fig. 9와 같이 설계 하였다 [10]. 이모형을 이용하여 각 기준에 따른 대안 별 쌍대 비교를 실시하여 결과를 산출하였다. 두 대안에 대한 합은 1이 되고, 두 값 중에서 큰 값이 우수한 것으로 분석이 되기 때문에 AHP 분석 결과 두 대안 중에 대안 2가 대안 1보다 우수한 것을 알 수 있다. 두 대안에 관하여 세부 분석을 하여보면, 트레버서 이용률은 두 대안 모두 낮기 때문에 동일하게 평가가 되었고, 각 작업장 별 이용률 및 각 차량 별 Cycle Time이 대부분 대안 2가 우수한 설계인 것으로 평가 되었다. Fig. 10은 AHP 결과를 나타낸다. Fig. 11은 AHP 결과에 따른 민감도 분석을 나타낸다. 트레버서 이용율, 각 작업장 이용율 그리고 Cycle Time 각각에 대하여 동일한 가중치를 주는 경우 대안 2가 대안 1보다 더 우수한 것을 알 수 있었다.

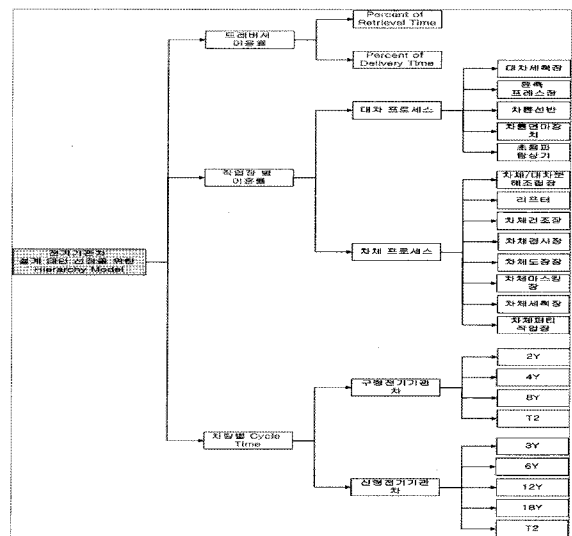


Fig. 9. Hierarchy Model for the AHP



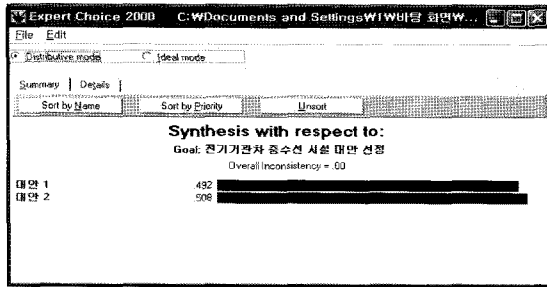


Fig. 10. Results for the AHP

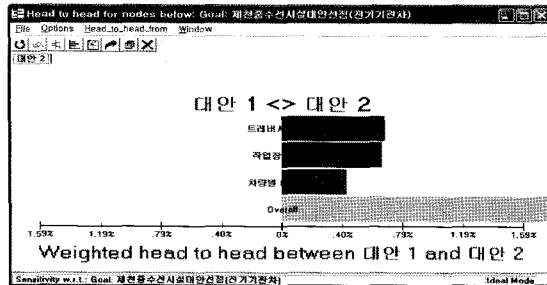


Fig. 11. Sensitivity analysis for the AHP

#### 4.5 선정 대안의 최적화

대안 2를 최종 대안으로 선정하여 대안 2의 설계 변수에 관한 최적화를 수행하였다. 최적화 수행은 AutoStat V.4.4의 Optimization Technique을 이용하였다. 이 최적화는 진화전략(Evolutionary Strategy)을 이용하는데, 본 실험에서 사용된 진화전략의 조건 및 종료 조건은 Table 6과 같다[11,12]. 시뮬레이션 수행 시간은 3년으로 하였고, 각 실험 당 반복 회수는 5회이고, 세대당의 부모의 수는 3개로 50세대 동안의 향상율(증가율)이 5% 미만이면 종료로 되고, 최대 100세대까지의 실험을 기준으로 최적화를 수행하였다.

Table 6. Conditions for the Simulation Optimization

| 시뮬레이션 최적화 조건                   |         |                                      |                |
|--------------------------------|---------|--------------------------------------|----------------|
| Simulation Parameters          |         | Termination Criteria                 |                |
| Simulation Run time            | 3 Year  | Improvement of 50 Generation Results | < 5 %          |
| Max. Replication / Solution    | 5 Times |                                      |                |
| Number of Parents / Generation | 3 EA    | Maximum Generation                   | 100 Generation |

• Fitness Functions : MAX Train Throughput

적합도 함수(Fitness Function)는 위의 차량 처리량을 선정하였다. 현 설계 대안의 최대 처리량을 기준으로 각 종속 변수의 결과를 산출 할 수 있었다. 총 처리량은 1년을 기준으로 약 133량의 결과를 보이고 있다. Fig. 12에서 보는 것과 같이 Best Fitness가 133을 나타내고 있는데, 이것은 1년

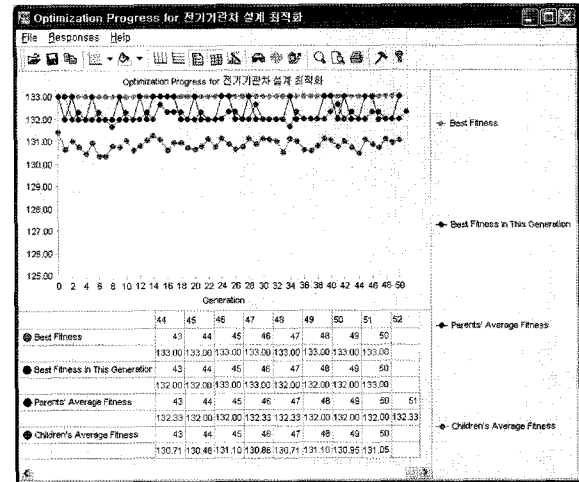


Fig. 12. Optimization Progress for the Optimal Design

Table 7. Design Parameters for the Optimal Design

| 설계 변수         | 처리 시간 | 단위 |
|---------------|-------|----|
| 1차 도장 시간      | 0.475 | hr |
| 1차 마스킹 시간     | 0.435 | hr |
| 1차 차체 건조 시간   | 0.529 | hr |
| 2차 도장 시간      | 0.461 | hr |
| 2차 마스킹 시간     | 0.412 | hr |
| 2차 차체 건조 시간   | 0.51  | hr |
| 3차 도장 시간      | 0.419 | hr |
| 3차 마스킹 시간     | 0.536 | hr |
| 3차 차체 건조 시간   | 0.58  | hr |
| 대차 도장장 시간     | 0.981 | hr |
| 대차 세척장 시간     | 1.041 | hr |
| 대차 쇼트블라스트 시간  | 0.574 | hr |
| 대차 조립 시간      | 4.07  | hr |
| 마스킹 스티커 처리 시간 | 0.518 | hr |
| 박막 시간         | 1.007 | hr |
| 소지 건조 시간      | 0.553 | hr |
| 소지 시간         | 0.479 | hr |
| 윤축 세척 시간      | 0.588 | hr |
| 윤축 프레스 시간     | 0.735 | hr |
| 입장 검사 시간      | 1.088 | hr |
| 차륜 선반 시간      | 0.800 | hr |
| 차륜 연마 장치 시간   | 0.937 | hr |
| 차체 대차 결합 시간   | 1.923 | hr |
| 차체 대차 분해 시간   | 9.499 | hr |
| 차체 세척 시간      | 0.551 | hr |
| 차체 퍼티 건조 시간   | 0.585 | hr |
| 차체 퍼티 시간      | 0.958 | hr |
| 차체 퍼티 연마 시간   | 0.958 | hr |
| 초음파탐상 시간      | 0.986 | hr |
| 출장 검사 시간      | 7.936 | hr |

을 기준으로 133량을 처리하는 것을 나타낸다. 시뮬레이션 설계 최적화에 대한 결과를 Table 7에 요약 하였다. 이 결과의 설계 변수를 시뮬레이션에 반영하여 반복 실험을 한 결과 Table 8과 같은 결과를 추정 할 수 있으며, 이 결과 값이 최적의 설계 변수인 것을 보여준다. 총 차량 처리량은 132.7량인 것을 확인 할 수 있으며, 트레버서 및 각 작업장 별 이용율은 중수선 시설의 특성 상 그렇게 높지 않은 것을 알 수 있다. 또한 검수량은 Table 1에서 제시된 재장 일수 보다 적으므로 현 전기기관차중수선 시설을 이용하여 계획 정비를 만족 시키는 것을 확인 할 수 있었다.

**Table 8. Critical Factors for the Optimal Design**

|           | 종속 변수       | 결과      | 단위    |
|-----------|-------------|---------|-------|
| 차량 처리량    | 차량 처리 대수    | 132.7   | Train |
| 트레버서      | 트레버서 이용률    | 0.3047  | %     |
| 작업장 별 이용률 | 대차 세척장      | 0.1523  | %     |
|           | 리프터 이용율     | 0.277   | %     |
|           | 윤축프레스장      | 0.2317  | %     |
|           | 차륜 선반       | 0.837   | %     |
|           | 차륜 연마장치     | 0.288   | %     |
|           | 차체 건조장      | 0.028   | %     |
|           | 차체 검사장      | 0.2969  | %     |
|           | 차체/대차 분해조립장 | 0.579   | %     |
|           | 차체 도장장      | 0.021   | %     |
|           | 차체 마스크장     | 0.0283  | %     |
|           | 차체 세척장      | 0.0073  | %     |
|           | 차체 퍼티작업장    | 0.0413  | %     |
|           | 초음파 탐상기     | 0.269   | %     |
| 구형 전기기관차  | 2Y          | 14.928  | day   |
|           | 4Y          | 16.7975 | day   |
|           | 8Y          | 21.8066 | day   |
|           | T2          | 3.7     | day   |
| 신형 전기기관차  | 3Y          | 14.3171 | day   |
|           | 6Y          | 17.0443 | day   |
|           | 12Y         | 21.8633 | day   |
|           | 18Y         | 26.4266 | day   |
|           | T2          | 3.6472  | day   |

### 5. 결론

본 논문에서는 전기기관차 중수선 시설 건설을 위하여 시뮬레이션 분석을 이용한 설계 대안에 관한 분석, 비교, 선정을 실시하였고, 선정 된 대안에 대한 최적화를 수행하였다. 기 시설의 경우에는 운영 프로세스의 변경 및 시설 추가와 같은 사항이 발생 하였을 때, 시뮬레이션을 이용하여 분석이 가능하지만, 본 논문에서는 새로운 시설의 건설을 위한 시뮬레이션 기법으로 아래와 같은 내용의 분석을

수행하였다.

- **Verification & Validation** : 시뮬레이션 모델의 정확성과 타당성은 신 시설이기 때문에 기존 시설의 분석 결과 값을 사용하지 않고, 시뮬레이션 운영 로직에 의한 정확성 검증을 실시하고, 프로세스 분석에 의한 타당성 검증을 실시하였다.
- **대안의 비교, 분석, 선정** : 설계 대안에 관한 분석은 다 기준 의사결정 방법(Multi-Criteria Decision Making)을 고려함으로써, 하나의 종속 변수가 아닌 다수의 종속 변수를 고려한 설계 대안의 선정을 실시하였다. 본 논문에서는 다 기준 의사결정 방법의 하나인 AHP 기법을 이용하여 대안 별 쌍대 비교를 실시함으로써, 최종 설계 대안을 선정하였다.
- **선정 대안의 최적화** : 선정 된 대안에 관한 결과 값을 단순히 몇 번 반복하여 설계 대안에 입력하는 것이 아닌, 시뮬레이션 최적화를 실시함으로써, 설계에 관한 최적의 설계 변수를 선정하였다.

이와 같은 분석 기법을 통하여 전기기관차 중수선 시설의 설계 대안 검증 및 설비 프로세스 최적화를 실시하였다. 분석 결과 현 전기기관차 중수선 시설은 1년을 기준으로 최적의 처리 능력은 132.7량인 것을 알 수 있었다. 또한 트레버서 및 각 작업장 별 이용률은 시설의 특성 상 높지 않은 것을 알 수 있으며, 작업 특성상 Material Flow 관점에서 설비 배치가 이루어짐으로써, 시설 내의 물류 이동을 최소화 하여 처리 시간을 단축 하였다. 중수선 시설의 특성상 설비와 작업자가 공존하는 시설인데, 이처럼 차량의 이동 최소화는 작업자는 물론 설비의 유지 보수에도 큰 장점을 보인다고 할 수 있다. 따라서 본 시뮬레이션 분석에서 제시한 대안 2의 설계 안을 전기기관차 중수선 시설에 적용을 한다면 최적의 운영 프로세스, 설비 배치 그리고 작업 동선 최소화를 고려한 최적의 시스템 인 것을 확인 할 수 있었다.

### 감사의 글

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 '2단계 BK21사업'의 지원비를 받았음

### 참고문헌

1. Meinert, T. S., Taylor, G. D. and English, J. R. (1999), "A Modular Simulation Approach for Automated Material Handling Systems", Simulation Practice and Theory, Vol.7, No. 1, pp. 15-30.
2. Narayanan, S., Bodner, D.A., Sreekanth, U., Govindaraj, T.,

- McGinnis, L. F., and Mitchell, C. M. (1998), "Research in Object-oriented Manufacturing Simulators: an Assessment of the State of the Art", IIE Transaction Vol. 30, No. 9, pp. 795-810.
3. Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., Chen, H. (2008), "Simulation based Optimization of a Train Maintenance Facility", Journal of intelligent manufacturing, V. 19, No.3, pp. 293-300.
  4. 엄인섭, 이홍철, 천현재(2007), "시뮬레이션을 이용한 철도 정비 시설의 최적 설계 방법", 한국철도학회논문집, 제 10권, 제 3호, pp. 306-316.
  5. Fu, M.C.(2002), "Optimizaiton for Simulation: Theory vs. Praticce", Informs Journal on Computing, Vol. 14, No. 3, pp. 192-215.
  6. Brooks Automations, Inc. Factory Automation Software Division (2003), "AutoMod User's Guide", Brooks Automation, Inc.
  7. 엄인섭, 이홍철, 강정윤(2004), "진화전략과 DEA를 이용한 통합 물류 시스템 분석 방법", 한국 시뮬레이션 학회지, 제 13권, 제 4호, pp. 17-29.
  8. Yang, T. and Kuo, C. A. (2003), "A Hierarchical AHP/DEA Methodology for the facilities layout design problem", European Journal of Operational Research, Vol 147, No. 1, pp. 128-136.
  9. Simuany-Stern, Z., Mehrez, A. and Hadad, H. (2000), "An AHP/DEA Methodologies for Ranking Decision Making Units", International Transactions in Operational Research, Vol. 7, No. 2, pp.109-124.
  10. <http://www.expertchoice.com/>
  11. Gosavi, A. (2003), "Simuation-Based Optimization : Parnametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning", Kluwer Academic Publishers.
  12. 강정윤, 이홍철, 엄인섭(2006), "시뮬레이션과 메타모델을 이용한 자동 물류 센터 설계 최적화", 한국 시뮬레이션 학회지, 제 15권, 제 5호, pp. 103-114.
- 접수일(2008년 11월 20일), 수정일(2009년 3월 23일),  
게재확정일(2009년 4월 10일)