

시뮬레이션 기반 열차 중수선 시설의 최적 설계 방법

엄 인 섭	정 수 동	오 정 현	이 흥 철
고려대학교 정보경영공학부박사	(주)삼안 철도설비부	(주)삼안 철도설비부	고려대학교 정보경영공학부교수

1. 서론

한국의 철도는 100년 이상의 전통을 가지고 운영 중에 있다. 특히 2004년 고속 철도의 도입으로 전동차, 전기관차, 디젤 전기관차, 디젤동차, 객차, 그리고 화차 등의 차종을 운영하고 있으며 철도 선진국의 대열에 들어섰다고 하여도 과언은 아닐 것이다.

하지만 가장 중요한 철도 안전시설의 하나인 중수선 시설의 설계 및 운영에 있어서는 국내 고유의 작업 방식 보다는 제조사에 의한 또는 철도 선진국의 중 정비 시스템을 받아들여 운영 중에 있다. 따라서 국내 자체 적인 중수선 시설의 운영을 위하여 체계적이고, 계획적인 설계 및 분석이 요구되는 현실이다. 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. 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 있다¹⁾. 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

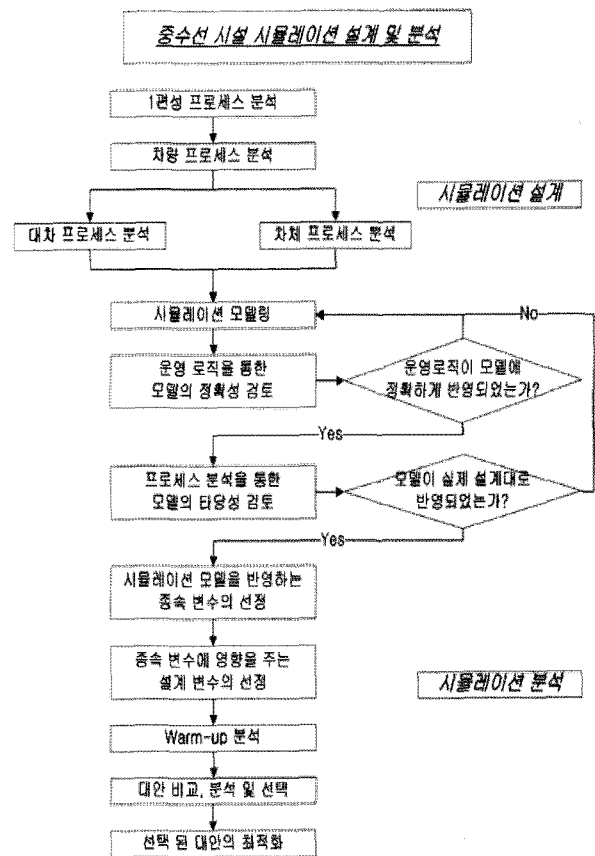


그림 1. Simulation Design and Analysis for the Train Overhaul Maintenance Facility

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 선정 한 후 Warm-up 분석을 수행하였다. 안정화 상태 이후에 대안의 비교, 분석을 수행하여 대안의 선정을 수행 한 후, 진화전략(Evolution Strategy)을 이용하여 선정된 대안의 최적화를 수행하였다. 그림 1은 중수선 시설의 시뮬레이션 설계 및 분석에 관한 순서도를 나타낸다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 철도 중수선 시설의 기존 연구에 대하여 알아보고, 3장에서는 시뮬레이션 설계를 위한 가정, 모델링, 정확성 그리고 타당성을 검토하였고, 4장에서는 warm-up 분석, 대안 비교, 분석 그리고 선정 방법 등을 나타냈으며, 시뮬레이션 최적화로 중수선 시설의 최적 운영 방안을 제시하였다. 그리고 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 기반한 다 기준 최적화 (Multi-Objective Optimizer) 소프트웨어를 이용하여 중수선 시설의 스케줄 최적화를 수행하였다³⁾.

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 산출하였다⁴⁾.

2.2 시뮬레이션 최적화

시뮬레이션 최적화 문제는 시스템의 특성을 반영한 종속 변수와 설계 변수의 선정을 통하여 변수들 간의 상호 관

계(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 제시하였다⁵⁾.

- 순위와 선택(Ranking and Selection), 다중비교 절차(Multiple Comparison Procedure) 그리고 순위 최적화(Ordinal Optimization)
- 확률 추론(Stochastic Approximation)
- 반응Table. 면분석(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)

3. 중수선 시설의 시뮬레이션 설계

3.1 중수선 시설 시뮬레이션 가정

중수선 시설의 시뮬레이션 모형을 설계하기 위하여 본 논문에서는 다음 조건을 시뮬레이션 가정으로 제시하였다.

- (1) 시뮬레이션 수행 시간(Run Time)
- (2) 각 설비 별 고장 시간 및 수리 시간
(MTBF : Mean Time Between Failure,
MTTR : Mean Time To Repair)
- (3) 차량 대기 위치
- (4) 트레버서 이용 규칙(Dispatching Rule)
- (5) 도장장 운영 룰
- (6) 차체/대차의 충돌 방지에 관한 시뮬레이션 운영 룰
- (8) 이동 장비(크레인 또는 소형 지게차) 이용 룰
- (9) 작업자의 작업 시간 및 운영 규칙

3.2 중수선 시설 검수량 검토

중수선 시설은 앞서 언급했듯이 계획적으로 시설의 이용이 이루어진다고 할 수 있다. 따라서 중수선 시설의 검수

량을 검토하여 시뮬레이션의 입력 변수로 선정을 하여야 한다. 검수량 검토에 관한 식은 아래와 같다.

일 검수량

$$A = \frac{N}{T} \cdot \beta \cdot \gamma = \frac{N}{T} \cdot (1 - \frac{T}{T'}) \cdot \left[\frac{365}{D} \times (1 + \alpha) \right]$$

$$A = \frac{NK}{S} \cdot (1 - \frac{S}{S'}) \cdot \left[\frac{365}{D} \times (1 + \alpha) \right]$$

임시 검수량

$$B = N \cdot \lambda \cdot \frac{\gamma}{365} = N \cdot \lambda \cdot \frac{1}{D} (1 + \alpha)$$

기호설명

A: 일 검수량

N: 작업 대상 차량수

T: 해당 검수 및 청소주기 일수

T': 상위 검수 및 청소주기 일수

S: 해당 검수주기(Km)

S': 상위 검수주기(Km)

D: 연간 작업 일수

β : 상위 작업과의 중복 계수 ($\beta = 1 - (\frac{T}{T'})$)

γ : 가동 일수 계수 ($\gamma = (\frac{365}{D}) \times (1 + \alpha)$)

α : 작업 파동율(10% 적용)

λ : 임시 검수 파동율(10% 적용)

위 식을 적용하여 중수선 시설의 검수량 및 재장량의 산출이 가능할 것이다.

3.3 중수선 시설 프로세스 분석

중수선 시설의 투입 차량은 편성 단위로 입고가 되기 때문에 편성별, 차량별로 구분하여 분석을 실시하여야 한다.

3.3.1 중수선 시설 편성 분석

1편성이 최소 1량 이상이기 때문에 2량 이상의 편성은 각 차량 별 분해를 수행하여야 하며, 중수선 시설에서 각 차량별 정비가 수행된 후, 차량 조립 및 시운전 및 주행 시험을 실시하게 된다. 그림 2는 1편성에 관한 중수선 시설 운

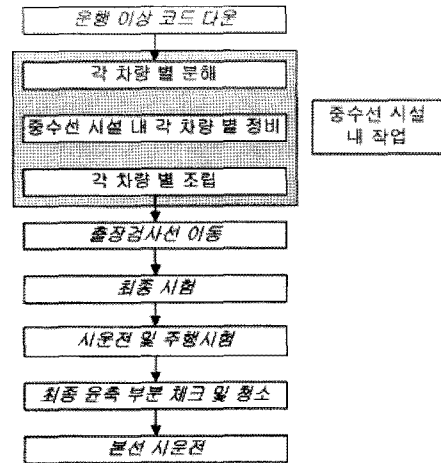


그림 2. Operational Process for the Train

영 프로세스를 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 편성 단위의 분석은 중수선 시설 내의 입고 전과 후의 운영 프로세스이기 때문에 편성 단위의 프로세스 분석을 수행 후, 차량 별 분석을 수행하여야 한다.

3.3.2 중수선 시설 차량 분석

중수선 시설의 편성 단위 분석 후 차량 단위의 분석을 실시하게 되는데, 차량 단위의 분석은 중수선 시설의 내부에서 운영되는 프로세스를 분석하는데 기반을 두어야 한다. 각 차량은 차체와 대차로 분해된 후, 대차는 대차 정비 프로세스를 수행하고, 차량은 가대차에 상차한 후 차체 정비 프로세스를 수행하여야 한다. 그림 3와 4은 대차와 차체에 관한 운영 프로세스를 나타낸다.

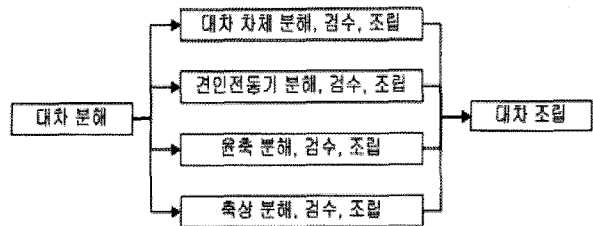


그림 3. Operational Process for the Coach's Wheel Parts

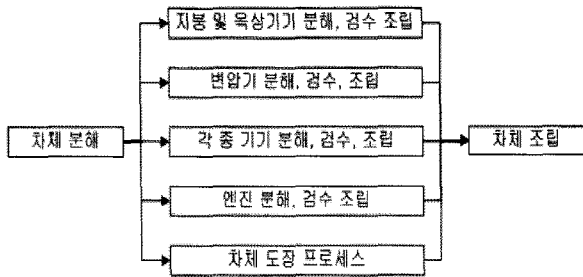


그림 4. Operational Process for the Coach's Body Parts

표 1. Simulation Design Method for the Train Overhaul Maintenance Facility

수행 내용	세부 내용
입력 데이터 준비	• 시뮬레이션 투입 변수의 선정 및 분포 추정
시뮬레이션 설계 계획	• 세부 설계 계획 선정
차량 분해 및 조립 모델	• 차량 분해 조립 순서에 의한 모델링 수행
트레버서 모델	• 트레버서 이용률 및 혼잡도 분석을 위한 세부 모델링
차량 별 내부 분해 모델	• 지붕, 엔진 및 기타 부품 분해 및 조립을 위한 모델링
차체 수선장 모델	• 차체 수선장 모델링
세척, 페팅, 마스크, 도장 및 건조 작업장	• 각각의 시스템 모델링
대차 및 가대차 저장소	• 대차 및 가대차 이용 로직 모델링
대차 프로세스 모델	• 대차 취거, 검수, 조립, 취부에 따른 모델링
운영 프로세스 모델	• 차체, 대차, 각 부품에 따른 모델링

3.4 중수선 시설 시뮬레이션 모델링

중수선 시설의 시뮬레이션 모델링은 표 1과 같은 수행 내용을 기준으로 시뮬레이션 모델링을 수행하여야 한다. 시뮬레이션 모델링의 수행은 일반적인 범용 시뮬레이션 프로그램인 GPSS/H, SLAM II, SIAMN IV, SIMULA 등을 이용하는 경우와 SIMPLE++, AutoMod II, Promodel 등 시스템의 특성을 고려한 시뮬레이션 전용 프로그램, 그리고 C, FORTRAN, PASCAL, BASIC 등 일반 프로그램 언어를 이용하여 시뮬레이션 소프트웨어를 만들어서 사용하는 것이 가능할 것이다⁶⁾. 위에서 제시한 방법 모두 능숙한 설계자 일지라도 많은 시간이 소요되는 작업이 될 것이다. 따라서 시뮬레이션 설계자가 시스템의 특성을 가장 잘 반영

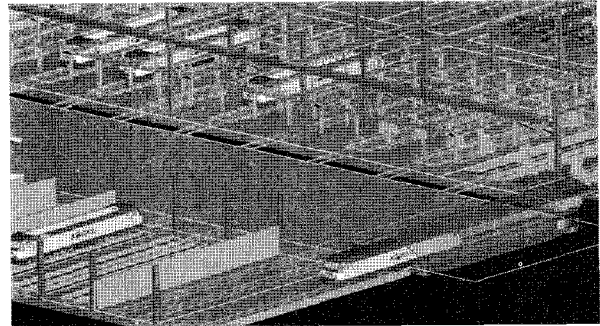


그림 5. Case Study for the Train Maintenance Overhaul Facility

하는 시뮬레이션 모델링 방법을 선정하여 중수선 시설에 적용하여야 할 것이다. 그림 5는 AutoMod II를 이용하여 시뮬레이션 모델링을 한 열차 중수선 시설의 사례 연구를 나타낸다.

3.5 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. 그림 6은 주요 공정 별 시뮬레이션 운영률을 나타낸다.

3.6 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, 시뮬레이

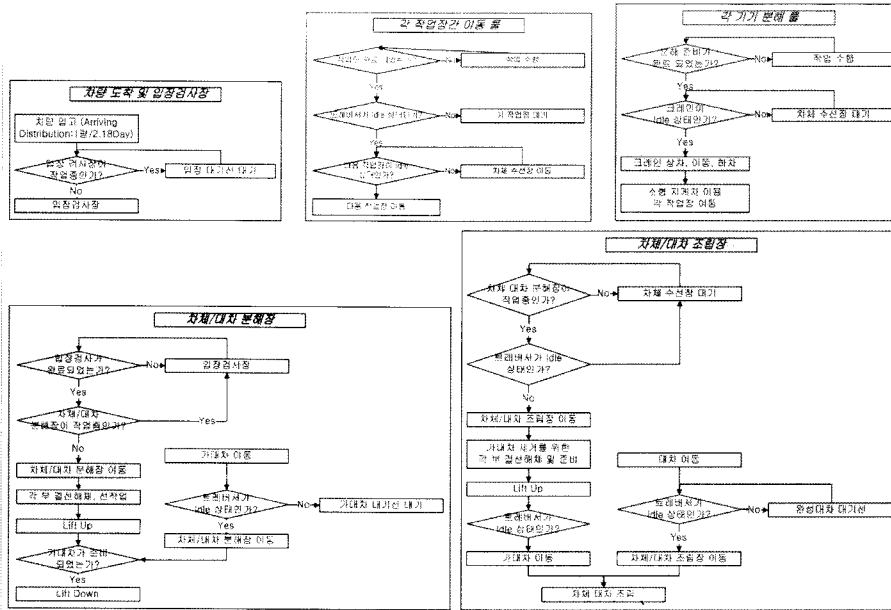


그림 6. Simulation Operation Rules for the Train Overhaul Maintenance Facility

선 분석 자체가 의미가 없는 스텝이 된다. 따라서 모델의 타당성 검토는 반드시 수행하여야 하며, 초기 Layout 설계자와 전문가와의 검토를 통한 절차를 수행하여야 한다.

4. 중수선 시설의 시뮬레이션 분석

4.1 종속 변수의 선정

시뮬레이션 종속 변수의 선정은 시스템을 평가하는 기준이 되는 변수로서, 현 시스템에서 가장 큰 영향을 주는 변수를 선정하여야 한다. 일반적으로 종속 변수는 표 2와 같은 변수가 선정이 되는데 각 기준은 설계자에 의한 주관적인 선정이 될 것이다. 그렇지만, 가장 시스템의 특성을 반영하는 변수의 선정을 통하여 종속 변수의 선정이 이루어져야 할 것이다.

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

표 2. Critical Factors for the Simulation

종속 변수	단위
1 편성 평균 Cycle Time	Day/Hour
각 차량 별 평균 Cycle Time	Day/Hour
각 기기 별 이용률 (Utilization)	%
트레버서 이용률 (Utilization)	%
트레버서 혼잡도 (Congestion)	%

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. 표 3은 중수선 시설의 일반적인 시뮬레이션 설계 변수를 나타낸다.

4.3 Warm-up 분석

Warm-up 분석은 시뮬레이션 분석에 가장 기본이 되는 분석 방법이다. 시뮬레이션을 실행 하였을 때, 항상 초기 상태에서부터 시뮬레이션이 수행되어지기 때문에 초기 상태를 포함하여 분석하는데 무리가 있다. 따라서 Warm-up 분석을 통하여 시스템이안정화상태 (Steady-State)에 도달하

는 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 선정된 종속 변수를 이용하여 안정화 상태를 추정하여야 한다⁹⁾.

4.4 설계 대안의 비교, 분석 및 선정

시뮬레이션 설계 대안이 다수 존재하게 되는 경우, 실험이 완료된 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. MCDM의 경우 가장 많이 사용되는 모형이 AHP (Analytic Hierarchy Process)와 DEA (Data Envelopment Analysis)이다^{7,8,9)}. 선정 대안의 특성에 따라 위의 분석 기법을 활용하여 대안 선정을 하는 것이 효율적인 대안의 선정 방법이 될 것이다.

4.5 선정 대안의 최적화

4.4에서 선정된 대안을 설계 변수대로 적용하는 것이 아니고, 종속 변수를 최적화 시키는 설계 변수의 시스템 적용을 고려하여야 한다.

일반적으로 종속 변수의 최적화를 위하여서는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 신경망 모형(Neural Network), 목적 계획법(Goal Programing), 경험적 방법(Heuristic Method)등이 사용된다¹⁰⁾. 또한 가능한 모든 입력 변수에 대한 실험을 통하여 종속변수에 대한 다 목적 비선형 계획법 (Multi-Objective Non-Linear Programming)을 구성하고, 해를 구함으로써 최적의 설계 변수의 선정도 가능할 것이다¹¹⁾. 이와 같은 분석 기법을 통하여 중수선 시설의 설계 변수 적용을 위한 최적화를 수행 후 실제 시스템에 적용을 수행하여야 할 것이다.

표 3. Design Parameters for the Simulation

설계 변수	단 위
차량 초기 세척장	Hour
차량 입장 검사장	Hour
각 부 결선 해체	Hour
각 기기 취거 준비	Hour
차체 Lift Up	min
차체 Lift Down	min
차체 대차 분리	Hour
각 기기 취거	Hour
트레버서 (상차, 이동, 하차)	m/min
소형 지게차(속도, 가속도)	m/min, m/sec ²
크레인(주권, 횡행, 주행)	m/min
차체 세척장	Hour
차체 퍼팅 작업장	Hour
차체 마스킹장	Hour
차체 도장장	Hour
차체 건조장	Hour
차체 각 부품 취거	Hour
차체 각 부품 검수	Hour
차체 각 부품 조립, 시험, 취부	Hour
대차 분해	Hour
대차 세척장	Hour
대차 쇼트 블라스트	Hour
대차 도장장	Hour
대차 각 부품 취거	Hour
대차 각 부품 검수	Hour
대차 각 부품 조립, 시험, 취부	Hour
차체 조립	Hour
차체 대차 조립	Hour
차량 출장 검사장	Hour
각 부 시험	Hour
총괄 기능 시험	Hour
시운전 출장	Hour

5. 결론

본 논문에서는 철도 중수선 시설의 시뮬레이션 설계를 통한 최적 설계 및 분석 절차를 제시하였다. 시뮬레이션 설계를 위하여 검수량 검토를 통한 중수선 시설의 계획 정비 시스템의 검수 차량을 예측하였고, 프로세스 분석을 통하여 편성 단위의 분석을 실시하였고, 차량은 차체와 대차로 구분하여 분석 수행 후 시뮬레이션 모델링 방안을 제시하였다.

시뮬레이션 분석에서는 모델의 정확성과 타당성 검증 방법을 위하여 운영 룰 분석과 프로세스 분석 제시함으로써 신 설비의 분석에 적용하는 방법을 제시하였다. 또한 중속 변수와 설계 변수의 선정 방법은 중수선 시설의 특성을 가장 잘 반영하는 변수의 선정에 초점을 맞추어 선정하고, 대안의 선정과 선정된 대안의 최적화 방법을 제시하였다. 대안의 선정은 일반적인 다 기준 의사 결정 모형 중에 시뮬레이션 설계자가 가장 효율적인 분석 기법을 활용하여 선정하여야 할 것이며, 선정된 대안의 최적화는 본 논문에서 제시된 방법 이외에도 최적화 기법의 활용이 가능할 것으로 생각되어 진다.

본 논문에서 제시한 시뮬레이션 설계 및 분석 방법은 복잡한 시스템의 효율적인 분석방안이 될 것이며, 이를 통하여 실질적인 설계 전에 문제점을 보완할 수 있는 체계적인 설계 및 분석방안이 될 것이다. ☺

♣ 참고 문헌

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 장비 시설의 최적 설계 방법", *한국철도학회논문집*, 제 10권 제 3호, pp. 306-316
5. Fu, M.C.(2002), "Optimization for Simulation: Theory vs. Practice", *Informis Journal on Computing*, Vol. 14, No. 3, pp. 192-215
6. Banks, J. (1990), "The Simulation of Material Handling System", *Simulation*, Vol. 55, No. 11, Simulation Councils Inc., San Diego, CA, pp. 261
7. 엄인섭, 이홍철, 강정운(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. Sinuany-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. Gosavi, A., *SIMULATION-BASED OPTIMIZATION: Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS
11. 강정운, 이홍철, 엄인섭(2006), "시뮬레이션과 메타모델을 이용한 자동 물류 센터 설계 최적화", *한국 시뮬레이션 학회지*, 제 15권, 제 5호, pp. 103-114