선로용량 산정과 민감도 분석의 신뢰성 향상에 관한 연구

- A Study on the Reliability Improvement of the Integrated System and Sensitivity Analysis for Line Capacity -

김 무 룡 *
Kim Moo Ryong
김 한 신 *
Jin Han Xin
이 창 호 **
Lee Chang Ho
김 봉 선 *
Kim Bong Sun
김 동 희 ***
Kim Dong Hee
홍 순 흠 ***
Hong Soon Hum

Abstract

Line capacity calculation has been used to determine optimum efficiency and safe train service for train scheduling plan and investment priority order throughout detecting bottleneck section. Because of some problems of Yamagisi and UIC methods for line capacity calculation, developing of the method of line capacity caculation and evaluation for the Korea circumstance is important.

This paper deals with the reliability improvement on the integrated system of TPS(Train Performance Simulator), PES(Parameter Evaluation Simulator), LCS(Line Capacity Simulator) and simulation and sensitivity analysis for line capacity.

Keyword : Simulation, Reliability, Sensitivity, Integrated System

* 인하대학교 산업공학과
** 인하대학교 아태물류학부
*** 한국철도기술연구원

2005년 10월 접수; 2005년 10월 수정본 접수; 2005년 10월 게재 확정

1. 서 론

선로용량을 산정하는 것은 열차운전 계획상 최적의 효율과 안전하게 운행할 수 있는 열차운영계획의 수립에 있어서 선로의 애로구간을 판단하고 수송력의 증강에 필요한 투자우선순위 결정이라는 목적을 가지고 있다. 선로용량을 산정하기 위한 산정식은 야마기시 데루오가 제시한 용량 산정법과 UIC방식과 같은 방법의 적용을 시도하였지만 경험식에 기반한 산술계산 방식의 한계와 동적인 특성을 고려하지 못하고 일률적인 산정 및 평가기법으로 선구별 특성을 반영하지 못하는 한계를 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 따라서 한국실정에 적합하면서 동적인 특성을 반영할 수 있는 선로용량 산정 및 평가기술의 개발은 중요한 의미를 가지고 있다.[6][7][8]

본 연구는 열차성능 시뮬레이션 프로그램(TPS, Train Performance Simulator), 모수적합 시뮬레이션 프로그램(PES, Parameter Evaluation Simulator), 선로용량 시뮬레이션 프로그램(LCS, Line Capacity Simulator)의 효율적인 활용을 위한 신뢰성 있는 선로용량 계산 통합프로그램의 구축과 민감도 분석체계를 개발하는데 있다. 이를 위해서 사용자 인터페이스 및 결과를 분석하기 위한 통합데이터베이스의 구축과 통합프로그램의 유효성과 결과의 타당성을 증명하기 위해 실제 선구에 적용하여 상세 시뮬레이션을 수행하고 실험결과를 분석하기 위한 통합프로그램 민감도 분석체계의 구축도 함께 수행한다

2. 이론적 배경 및 검토

2.1 기존의 선로용량 계산 모델

2.1.1 열차성능 시뮬레이션 프로그램(TPS)

선로, 신호기와 같은 인프라 정보, 열차제원과 시각표 및 운행루트정보, 견인력곡선, 제동곡선등을 기반으로 시간에 따른 속도와 위치를 구하여 열차의 운행상태를 실제와 같은 상황에서 시뮬레이션을 수행한다. TPS에서 산출된 구간별 · 열차종별 TPS 성능 데이터를 PES로 넘겨주는 역할을 한다.[6]

2.1.2 모수적합 시뮬레이션 프로그램(PES)

PES는 TPS와 LCS간의 중간단계로서 TPS에서 PES의 입력데이터인 구간별 · 열차종별 TPS시간을 외란삽입에 따른 운영스케쥴의 강인성 분석을 통한 모수평가 의사결정자료를 산출하여 사용자에게 제공한다. 의사결정자는 모수 수준별 도출된 강인성 척도들을 통하여 타당한 모수 수준을 선택할 수 있고, 이렇게 결정된 모수들은 LCS로 넘겨주는 역할을 수행한다.[2][3][4][5]

2.1.3 선로용량 시뮬레이션 프로그램(LCS)

선구내 단위구간을 대상으로 하여 열차혼합패턴을 고려한 확률실험에 의한 시뮬레이션이며, PES에서 추정된 모수를 사용하여 실제로 선로용량을 추정할 수 있게 한다.[1][6]

2.2 기존모델의 문제점 고찰

2.2.1 선로용량 계산 프로그램의 문제점

지금까지 개발된 선로용량 계산 시뮬레이션 프로그램들은 각 모델이 독립적으로 구현되어 있어서 통합 실험을 수행하기에는 많은 불편한 점이 존재했다. 그러므로 반복실험을 통한 시뮬레이션을 할 때 발생할 수 있는 사용자의 불편함이나 각 모델의 활용에 있어서의 효율성 측면에서 문제점이 발생하였다.

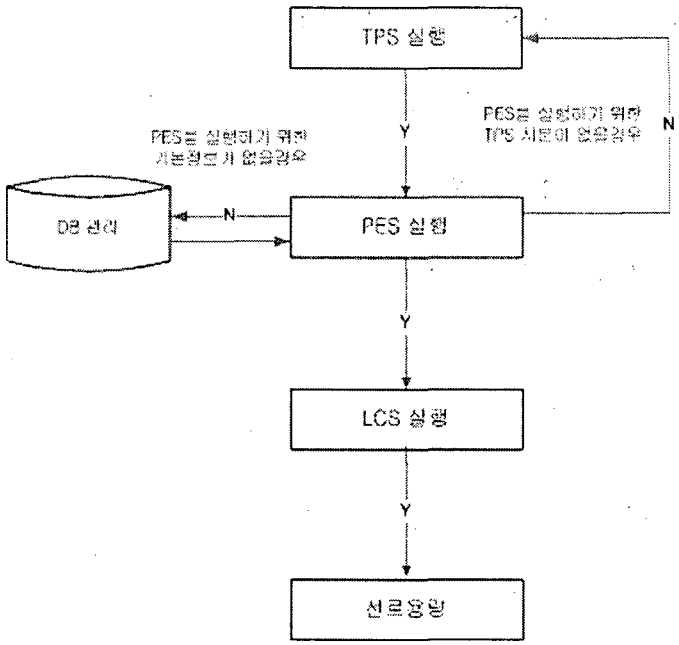
2.2.2 민감도 분석 체계의 문제점

지금까지의 민감도 분석 체계는 선로용량 계산 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 선로용량을 산출하고 산출된 선로용량을 이용하여 열차비율의 변화와 열차종의 변화, 그리고 열차속도를 향상 시켰을 때에 선로용량의 변화를 비교한 민감도 분석을 사용자가 직접 수동으로 실시하였다.[5][6] 하지만 이러한 민감도 분석은 사용자가 산출된 선로용량을 가지고 직접 비교하고 분석을 하여야 하기 때문에 많은 불편한 점이 존재해 왔고, 선로용량에 영향을 미치는 인자들의 영향정도를 분석하는데 있어서 3가지의 영향인자에 대해서만 분석을 하였기 때문에 영향인자의 수가 너무 적다는데 문제점이 있다. 또한 한 가지 영향인자만을 통해서는 인자가 갖는 고유특성 등으로 인한 한계성 측면에서도 문제점이 존재하였다.

3. 연구모형의 설계

3.1 통합프로그램의 기본 개념

통합프로그램의 기본 개념은 < 그림 1 >에서 보는 바와 같다. 즉 TPS 실행을 통하여 구해진 TPS시분 데이터는 통합데이터베이스에 자동으로 저장이 된다. 여기서 만약 PES 수행에 필요한 기본정보가 없을 경우에는 통합데이터베이스 관리에서 필요한 데이터를 저장할 수 있다. PES 수행에 필요한 데이터들이 준비되면 PES를 실행하고 난 뒤 PES 수행 결과를 자동으로 LCS로 넘겨주기 때문에 사용자는 LCS 수행에 필요한 데이터를 직접 입력할 필요가 없게 된다. 이러한 방법으로 LCS를 실행하게 되면 최종적으로 선로용량이 산출된다. 또한 PES에서 처음 통합프로그램을 실행할 때 TPS시분 정보가 없을 경우에는 TPS 수행으로 되돌아 갈 수 있게 통합프로그램의 체계를 설계하였다.[7]

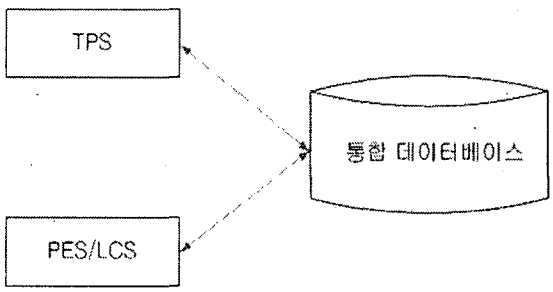


< 그림 1 > 통합프로그램 체계

3.2 통합프로그램 설계 및 구축

3.2.1 데이터베이스 설계방법

독립적으로 존재한 데이터베이스를 하나의 데이터베이스로 통합하는 과정에서 < 그림 2 >와 같은 개념으로 데이터베이스를 설계하였다. 하나의 데이터베이스를 두고 TPS, PES와 LCS 프로그램에서 필요로 하는 데이터를 저장하고 데이터가 필요할 때 불러오는 방식으로 데이터베이스를 설계하였다.[7]

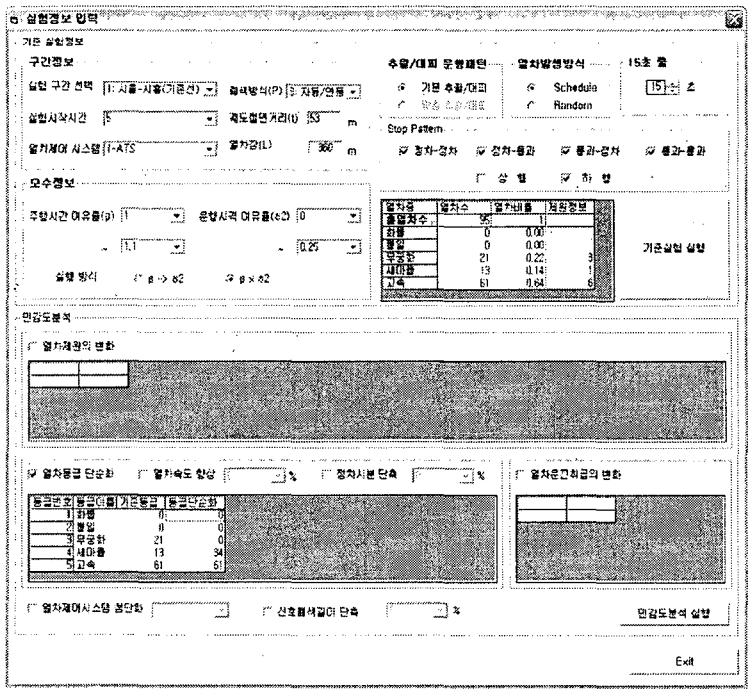


< 그림 2 > 통합데이터베이스 개념도

통합프로그램에서 사용할 데이터베이스는 위에서 설명한 데이터베이스 개념을 바탕으로 구축하였다.

3.2.2 통합프로그램 구현 및 절차

통합프로그램의 구축에 있어서 우선 통합프로그램을 수행하는데 필요한 TPS, PES, LCS의 프로그램과 통합데이터베이스를 우선적으로 고려하여 구축하여야 한다. 그리고 TPS를 수행한 후 TPS 데이터를 PES에 넘겨주고, PES는 모수적합도 분석을 통해서 구한 모수를 다시 LCS부분으로 넘겨주어야 하기 때문에 PES에서 구한 모수를 LCS로 넘겨주는 부분을 사용자가 인터페이스에 직접 입력함으로써의 불편함과 데이터를 잘못 입력하는 실수도 나올 가능성이 존재하므로 이 부분도 역시 고려하여야 한다. 또한 단위구간 평균 출발·도착 시격과 같은 경우에는 데이터베이스에서 해당 모수에서의 수행 결과를 찾아야 하는 번거로움도 존재해 왔다. 따라서 통합프로그램을 구축하는데 있어서 이러한 문제점을 해결할 수 있게 설계되어야 하고 각 모듈의 통합 관점에서 TPS→PES→LCS로의 실험 수행의 흐름이 원활하게 하는 방향으로 구축되어야 한다. 통합프로그램에서 PES실행과 민감도 분석을 위한 인터페이스는 다음 < 그림 3 >과 같다.[7]



< 그림 3 > PES실행과 민감도 분석 인터페이스

통합프로그램은 다음과 같은 흐름으로 수행되고 같은 순서로 통합프로그램을 구축하였다.

1) TPS를 실행하고 구간별, 열차종별, 정차패턴별 성능 데이터(TPS 시분)를 산출하여 통합데이터베이스에 저장한다.

2) TPS를 수행하고 난 뒤 PES를 실행 할 것인지 판단하고 PES를 실행하려고 한다면 PES 준비단계로 넘어가고 만약 여기서 통합프로그램을 끝내려고 하면 TPS만 수행하게 된다.

3) PES 준비 단계는 PES실험을 수행하기 위한 준비 단계로 기준실험정보를 설정하게 된다. 기준실험정보에는 구간정보, 모수정보, 추월/대피 운행패턴, 열차발생방식, 15초 룰, 정차 패턴, 열차발생방식에 따른 열차수, 열차비율, 제원정보를 포함한다. 여기에서 해당 정보를 설정하게 된다. 구간정보에서는 실험구간 선택, 실험시작시간, 폐색방식, 신호확인거리, 궤도절연거리, 열차장을 설정한다. 모수정보에서는 주행시간 여유율(β)과 운행시격 여유율(δ_2)을 설정한다. 그리고 추월/대피 운행패턴, 열차방생방식, 15초 룰, 정차 패턴 정보와 열차발생방식에 따른 열차수, 열차비율, 제원정보를 설정할 수 있다.[5]

4) PES 실행 준비가 완료되면 β를 고정하고 β에 따른 δ_2의 변화를 알아보는 $\beta \rightarrow \delta_2$ 방식과 β를 고정하지 않고 β와 δ_2의 변화를 모두 알아보는 $\beta \times \delta_2$ 방식을 결정할 수 있다.

5) PES 실행 방식을 선택하고 PES/LCS 실험을 수행하게 된다. 실험이 수행되고 나면 강인성 분석을 위한 데이터인 최대 파급시간, 총파급시간, 전체열차 평균파급시간, 지연열차 평균파급시간, 총 파급역수, 당열차 파급역수, 전체열차 평균파급역수, 지연열차 평균파급역수, 파급열차수와 단위구간 평균 출발·도착 시격을 저장하게 된다.

6) 강인성 분석을 통하여 β와 δ_2를 설정하고 나면 자동으로 선행 구간 수 조정 여유율(δ_{11})과 후행 구간 수 조정 여유율(δ_{12})이 구해지게 된다.[5]

7) 실험선구의 기본정보와 강인성 분석을 통한 모수를 이용하여 LCS에서 선로용량이 구해지고 민감도 분석을 위한 기준 정보로서 데이터베이스에 저장이 된다.

8) 선로용량을 구한 후 민감도 분석의 실시 여부에 따라서 통합프로그램을 종료하거나 민감도 분석 수행으로 단계가 넘어간다.

9) 민감도 분석을 수행하기 위하여 열차제원의 변화, 열차등급 단순화, 열차속도 향상, 정차시분 단축, 열차제어시스템 첨단화, 신호폐색길이 단축, 열차운전취급의 변화의 정보를 바꾸면서 단순 민감도 분석이나 복합 민감도 분석을 실행한다.[6]

10) 민감도 분석이 끝나게 되면 결과는 나중에 민감도 분석 결과를 분석하기 위해서 해당하는 데이터베이스에 저장이 되고 통합프로그램은 종료된다.

통합프로그램이 구현이 되면 선로용량이 산출이 되는데, 이때 정확한 선로용량의 분석을 위해서는 선로용량에 영향을 미치는 인자들을 도출하고 이들의 영향정도를 분석하는 민감도 분석이 필요하다. 이를 위해서 한국철도기술연구원에서 제시한 선로용량에 영향 주는 요인의 단계별 분류를 참고하여 선로용량 영향인자를 추출하여 민감도 분석을 실시하여야 한다.[5][6] 본 연구에서는 PES에 관련된 영향인자인 열차등급의 단순화, 열차속도 향상, 정차시분 단축, 열차제어시스템 첨단화, 신호폐색길이 단축, 열차운전취급의 변화에 대한 단순 민감도 분석과 한 가지 영향인자만을 통해서는 인자가 갖는 고유특성 등으로 인한 한계성으로 인하여 두 개 이상의 인자를 변화시키는 복합 민감도 분석으로 나누어 실시할 수 있도록 프로그램을 구축하였고, 선로용량을 산출한 다음 사용자의 선택으로 바로 민감도 분석을 실시할 수 있도록 하였다.[6]

4. 실증분석

4.1 시나리오설정 및 수행순서

선로용량 계산 시뮬레이션을 수행하기 위한 시나리오는 선구별로 서울-시흥, 조차장-옥천, 신동-동대구 구간에 대하여 설정하였고 수행순서는 다음과 같은 순서로 실시하였다.

1) 기초정보입력
2) 강인성 분석($\beta \rightarrow \delta_2$ 방식과 $\beta \times \delta_2$ 방식에 따라 두 가지의 형태로 모수적합도 분석)
3) 선로용량 산정

4.2 시뮬레이션 수행과 분석

열차는 각각 Schedule을 기준으로 열차를 발생하는 방식과 Random으로 열차를 발생하는 방식으로 구분하여 실험하였고(열차의 운행스케쥴에 의해 열차를 발생시키는 방식인 Schedule과 열차를 지정된 비율에 의해서 무작위로 발생시키는 방식인 Random의 두가지 형태가 있다.) 시뮬레이션 수행 결과는 다음 < 표 1 >과 같다.[7]

< 표 1 > 각 구간의 선로용량(Schedule, Random)

구 간	Schedule 발생					Random 발생				
	β	δ_2	δ_{11}	δ_{12}	선로용량	β	δ_2	δ_{11}	δ_{12}	선로용량
서울-시흥	1.06	0.00	1.47	0.67	167	1.09	0.00	1.32	0.92	168
조차장-옥천	1.06	0.20	0.00	-0.99	194	1.06	0.15	0.00	-0.71	183
신동-동대구	1.05	0.05	0.24	0.00	125	1.05	0.00	-5.03	0.00	128

본 연구에서는 모수적합도 분석을 통하여 구하여진 β와 δ_2를 프로그램에서 사용자가 선택하게 되면 기존의 연구에서 사용자가 직접 분석을 통하여 LCS 프로그램에 수동으로 입력한 번거로움이 없이 간단히 최종 산출물인 선로용량이 산출되게 된다.

4.3 선로용량 민감도 분석

4.3.1 단순 민감도 분석

열차등급 단순화(운행열차의 종류를 단순화시키는 것으로서, 본 실험에서는 무궁화 열차가 담당하던 여객수송을 새마을 열차로 대체하였을 때의 실험)에 대한 단순 민감도 분석은 다음 < 표 2 >과 같다. [7]

< 표 2 > 열차등급 단순화 후 선로용량 변화 (Schedule, Random)

구 간	열차발생방식	민감도 분석 종류	선로용량	향상도
서울-시흥	Schedule	기존결과	167	100 %
서울-시흥	Schedule	열차등급 단순화	231	138.3 %
서울-시흥	Random	기존결과	171	100 %
서울-시흥	Random	열차등급 단순화	232	135.7 %
조차장-옥천	Schedule	기존결과	194	100 %
조차장-옥천	Schedule	열차등급 단순화	202	104.1 %
조차장-옥천	Random	기존결과	199	100 %
조차장-옥천	Random	열차등급 단순화	207	104 %
신동-동대구	Schedule	기존결과	125	100 %
신동-동대구	Schedule	열차등급 단순화	128	102.4 %
신동-동대구	Random	기존결과	123	100 %
신동-동대구	Random	열차등급 단순화	126	102.4 %

4.3.2 복합 민감도 분석

열차등급 단순화와 열차속도 향상(선구에서 운행되는 모든 열차의 운행속도를 기존 대비 10%와 20% 향상시키는 실험)에 대한 복합 민감도 분석은 다음 < 표 3 >과 같다.[7]

< 표 3 > 열차등급 단순화와 열차속도 향상 후 선로용량 변화 (Schedule, Random)

구 간	열차발생방식	민감도 분석 종류	선로용량	향상도
서울-시흥	Schedule	기존결과	167	100 %
서울-시흥	Schedule	열차등급 단순화 열차속도 10% 향상	278	166.5 %
서울-시흥	Schedule	열차등급 단순화 열차속도 20% 향상	286	171.3 %
서울-시흥	Random	기존결과	176	100 %
서울-시흥	Random	열차등급 단순화 열차속도 10% 향상	273	155.1 %
서울-시흥	Random	열차등급 단순화 열차속도 20% 향상	282	160.2 %
조차장-옥천	Schedule	기존결과	194	100 %
조차장-옥천	Schedule	열차등급 단순화 열차속도 10% 향상	213	109.8 %
조차장-옥천	Schedule	열차등급 단순화 열차속도 20% 향상	219	112.9 %
조차장-옥천	Random	기존결과	200	100 %
조차장-옥천	Random	열차등급 단순화 열차속도 10% 향상	216	108 %
조차장-옥천	Random	열차등급 단순화 열차속도 20% 향상	223	111.5 %
신동-동대구	Schedule	기존결과	125	100 %
신동-동대구	Schedule	열차등급 단순화 열차속도 10% 향상	136	108.8 %
신동-동대구	Schedule	열차등급 단순화 열차속도 20% 향상	141	112.8 %
신동-동대구	Random	기존결과	126	100 %
신동-동대구	Random	열차등급 단순화 열차속도 10% 향상	135	107.1 %
신동-동대구	Random	열차등급 단순화 열차속도 20% 향상	140	111.1 %

5. 결론

본 연구에서는 기존에 독립적으로 구현된 TPS, PES, LCS 프로그램이 가지고 있는 문제점을 분석하여 보다 효율적인 프로그램의 활용을 위해서 선로용량의 계산을 위한

통합프로그램을 구축을 하였다. 통합프로그램을 구축을 위해서 우선 통합프로그램 체계를 설계하였고 통합체계를 기준으로 통합데이터베이스를 구축하였다. 통합체계와 통합데이터베이스를 바탕으로 통합인터페이스 구축 및 통합프로그램을 개발하였다. 또한 통합프로그램의 유효성과 결과의 타당성을 증명하기 위해 실제 선구에 적용하여 상세 시뮬레이션을 수행하였고, 실험결과를 분석하기 위한 통합프로그램 민감도 분석체계의 구축도 함께 수행하였다. 특히 정확한 선로용량의 분석을 위해서 각 열차들의 등급을 단순화 시키는 것, 열차의 속도를 향상시키는 것, 열차의 정차시분을 단축시키는 것, 열차제어시스템을 첨단화 시키는 것, 신호 폐색길이를 단축시키는 것, 그리고 열차운전 취급의 변화 등을 이용하여 선로용량의 변화를 분석해 보았다. 그리고 기본인자만을 변화시키는 단순 민감도 분석과 한 가지 영향인자만을 통해서는 인자가 갖는 고유특성 등으로 인한 한계성으로 인하여 두 개 이상의 인자를 변화시키는 복합 민감도 분석으로 나누어 분석을 실시하였다. 이러한 연구 개발의 결과 신뢰성 높은 선로용량 산정체계를 확보할 수 있고, 사용자 중심의 인터페이스 구축을 통한 통합프로그램의 편리성을 확보할 수 있다. 그리고 선로용량에 영향을 미치는 인자에 대한 민감도 분석으로 선로용량 계산 통합프로그램의 활용가치를 극대화시키는데 기여할 수 있다.

6. 참 고 문 헌

[1] 김동희, 홍순흠, 김봉선, 2002, "철도선로의 용량추정체계", 안전경영과학회지, 제4권 제3호

[2] 이병권, 김학식, 이창호, 김봉선, 김동희, 2003, "철도선로용량 계산을 위한 모수 평가모형 개발", 안전경영과학회 추계학술대회

[3] 이창호, 김봉선, 김학식, 이병권, 2003, "선로용량 산정을 위한 모수적합 시뮬레이션", 대한산업공학회 추계학술대회 논문집

[4] 이창호, 김봉선, 김학식, 이병권, 김동희, 홍순흠, 2003, "철도선로용량 계산을 위한 강인성 분석모형에 관한 연구", IE Interfaces Vol.16. Special Ed., 대한산업공학회

[5] 임찬식, 김한신, 이창호, 김봉선, 김동희, 홍순흠, 2004, "선로용량 계산 통합프로그램 및 민감도 분석 체계 개발", 안전경영과학회 추계학술대회

[6] 선로용량 계산 시뮬레이션 프로그램 개발(Ⅰ), 2004, 한국철도기술연구원, 철도청 연구보고서

[7] 선로용량 계산 시뮬레이션 프로그램 개발(Ⅱ), 2005, 한국철도기술연구원, 철도청 연구보고서

[8] 수송계획 및 제어관리 최적화, 2001, 한국철도기술연구원

[9] 철도운영체계 개선을 통한 수송능력 증대방안, 1997, 교통개발연구원

저 자 소 개

김 무 룡 : 현재 인하대학교 산업공학과 대학원 석사과정.
주요 연구분야는 ERP, 물류관리

김 한 신 : 현재 인하대학교 산업공학과 대학원 박사과정.
주요 연구분야는 CRM, ERP, SCM

이 창 호 : 현재 인하대학교 아태물류학부 교수로 재직중.
인하대학교 산업공학과 학사, 한국과학기술원 산업공학과 석사·박사 취득. 주요 연구분야는 인천항의 물류관리, RFID를 활용한 응용시스템, 항공산업관련 스케쥴링과 중소기업의 ERP개발 등

김 봉 선 : 현재 인하대학교 산업공학과 교수로 재직중.
인하대학교 산업공학과 학사·석사, 독일 Karlsruhe대학교 경제학 박사 취득. 주요 연구분야는 생산관리, 서비스경영 등

김 동 희 : 현재 한국철도기술연구원 재직중.
인하대학교 산업공학과 학사·석사·박사 취득
주요 연구분야는 의사결정지원시스템, 시뮬레이션 등

홍 순 흠 : 현재 한국철도기술연구원 재직중.
서울대학교 전기공학과 학사·석사·박사 취득.
주요 연구분야는 철도운영정보시스템 등