

# 고속선을 고려한 다중열차주행 시뮬레이터 개발 Development of Multi-Train Traffic Simulator considering High-Speed Line

김동희\*                      김영훈\*\*  
Kim, Dong-Hee              Kim, Young-Hoon

## Abstract

Many changes in the railway environment has directly affected to the railway company. To cope immediately with the influence of environment and to promote productivity, the railway company has to introduce an efficient train operation system and related core technologies. The railway system is composed of large-scale infrastructures and high-cost trains. Simulation method is one of core technologies and also is efficient tool for planning and analyzing this kind of complex system.

The purpose of this research is to develop multi-train traffic simulator considering high-speed train for GyongBu-Line. To achieve this objective, the elements of railway system was analyzed, and as a result, a data structure modeling for the railway system such as rail-line infrastructure, train, timetable and operational route is presented. The developed simulator is composed of three major part ; input-module, main-module, and output module. The concept and brief explanation of each module will be treated.

## 1. 서론

한정된 철도시설 및 차량을 이용하여 수송서비스 최대화를 도모하고 철도경영을 개선하기 위해서는 효율적인 운영체계의 구축과 이에 필요한 기반기술 확보가 선행되어야 한다. 철도운영기술은 열차의 안정적·효율적인 운행을 확보하고 제한된 철도시설을 어용하여 최대한의 수송서비스를 제공하기 위한 철도시스템의 핵심기술이다. 선진외국에서는 철도시스템의 거대·복잡화에 따라 철도 경쟁력 향상이 절실히 요구되면서 운영효율향상을 위한 기술개발에 많은 투자를 하여 높은 성과를 나타내고 있다. 최근 컴퓨터 및 정보통신분야의 발달에 따라 이들 기술의 도입에 따른 철도 시스템 운영기술을 급속히 발전시키고 있다. 철도운영과 관련된 핵심기술은 철도자원활용 최대화를 위한 운영최적화로부터 컴퓨터를 활용한 운영수익극대화에 이르기까지 광범위한 분야로 구성 되어 있어, 이에 대한 체계적이고 지속적인 연구가 필요할 것이다.

거대·복잡한 인프라와 고가의 열차로 구성된 철도수송시스템의 경우 수리모형에 근거한 최적화개념의 도입은 한계를 보이고 있으며, 시뮬레이션용 이용한 시스템의 계획 및 평가가 효율적인 것으로 알려져 있다. 특히 열차운용시뮬레이션은 다이어 작성지원시스템, 운전정리지원시스템 등과 더불어 열차운영계획의 수립 및 시설투자를 위한 사전검토를 위하여 기본적으로 필요한 도구이며, 해외 선진철도회사에서는 각기 고유의 철도환경에 적합한 열차운용 시뮬레이션 프로그램을 개발 하여 실제업무에 활용하고 있는 실정이다. 국내의 경우 차량·동력시스템, 전기·신호시스템, 노

\* 한국철도기술연구원 철도운영시스템연구팀 신입연구원

\*\* 한국철도기술연구원 철도운영시스템연구팀 주임연구원

반·궤도시스템과 같은 하드웨어적 요소들에 관한 기술은 상당한 수준에 올라와 있으나, 열차운용 시뮬레이션과 같은 철도시스템운영과 관련된 소프트웨어적 요소들에 대한 기술은 부분적이고 단속적인 연구수행으로 인하여 선진국 수준과 비교하여 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 경부선을 모델로 하여 2004년부터 운행하게 될 고속열차를 고려한 다중열차주행 시뮬레이션 프로그램 개발결과를 제시하고자 한다. 시스템은 비주얼베이직과 액세스데이터베이스를 이용하여 윈도우즈환경으로 개발되었으며, 자료의 입력과 편집을 위한 입력모듈, 시뮬레이션 수행을 위한 메인모듈, 그리고 수행결과를 표시하는 출력모듈로 구성되어 있다. 특히 열차스케줄의 강인성(robustness)과 운전정리계획 검토를 할 수 있도록 외란설정과 운전정리를 위한 사용자 개입이 가능하도록 설계되어 있다. 본 논문의 2절에서는 시뮬레이션을 위한 철도시스템 모델링 결과를 제시한다. 3절에서는 제시된 모델링을 기반으로 개발된 다중열차주행 시뮬레이터의 구조를 설명하고, 마지막으로 결론을 맺도록 한다.

## 2. 철도시스템 모델

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 현실의 문제점을 파악하고 이에 대응하는 모델을 만들어야 한다. 따라서 열차주행상황을 시뮬레이션 하기 위해서는 물리적으로 존재하는 철도시스템 인프라 및 실시간으로 변하는 열차상황을 모델링하고 컴퓨터상에 구현해야만 하며, 모델링 방법에 따라 시뮬레이터의 성능이나 효율성은 달라지게 된다. 본 절에서는 이를 고려한 철도시스템 모델을 제시하고자 한다.

### 2.1 인프라 모델

철도망 네트워크로 표현되는 인프라를 구성하는 주요자원으로는 선로, 역, 신호기, 터널, 교량 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 터널과 교량은 고려하지 않았다. 그림 1에서는 인프라를 구성하는 기본요소에 대한 분류를 보여주고 있다.

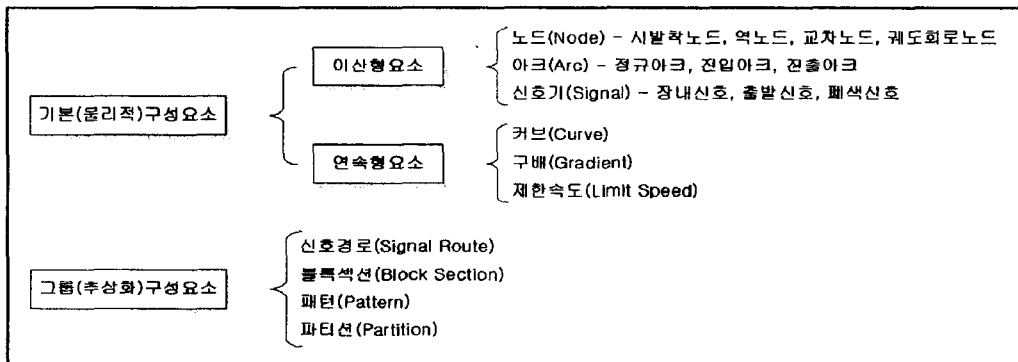
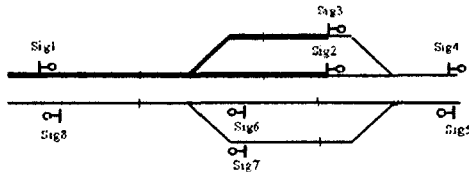


그림 1. 인프라의 구성요소

인프라는 크게 물리적요소와 추상화요소 구분할 수 있으며, 물리적요소는 노드, 아크, 신호기와 같은 이산형요소와 커브, 구배, 제한속도와 같은 연속형요소로 구성된다. 아크는 노드간을 연결하는 선로를 나타내며, 각각 길이 및 제한속도 속성을 가진다. 신호기는 궤도회로노드와 짝을 이루게 되며, 신호기가 없는 궤도회로도 존재할 수 있다.

추상화요소는 열차제어를 위하여 물리적요소를 개념상 묶은 것이다. 신호경로는 블록섹션들로 구성되어 있으며, 경합이 일어나는 다른 신호경로와의 관계를 정의하고 있다. 그림 2에서는 신호



**Signal Route Table**

	Signal Route ID			
	1	2	3	4
Enter Signal ID	1	1	2	3
Exit Signal ID	2	3	4	4
Block Section	1, 2, 3	1, 2, 4	5	5
경합 Signal Route	2	1	4	3

그림 2. 신호시스템과 신호경로테이블

경로테이블을 보여주고 있다. 블록섹션은 노드와 아크로 구성되며, 동시에 2대의 열차가 한 블록 섹션에 존재할 수는 없다는 안전제약을 지켜야 한다. 패턴은 노드, 아크, 신호기, 블록섹션, 신호경로 정보를 포함하고 있으며, 시뮬레이터에서는 이를 선로를 구성하기 위한 입력최소단위로 하여 입력자료의 양을 최소화할 수 있을 것이다. 그림 3에서는 기본적인 패턴의 예를 보여주고 있다.

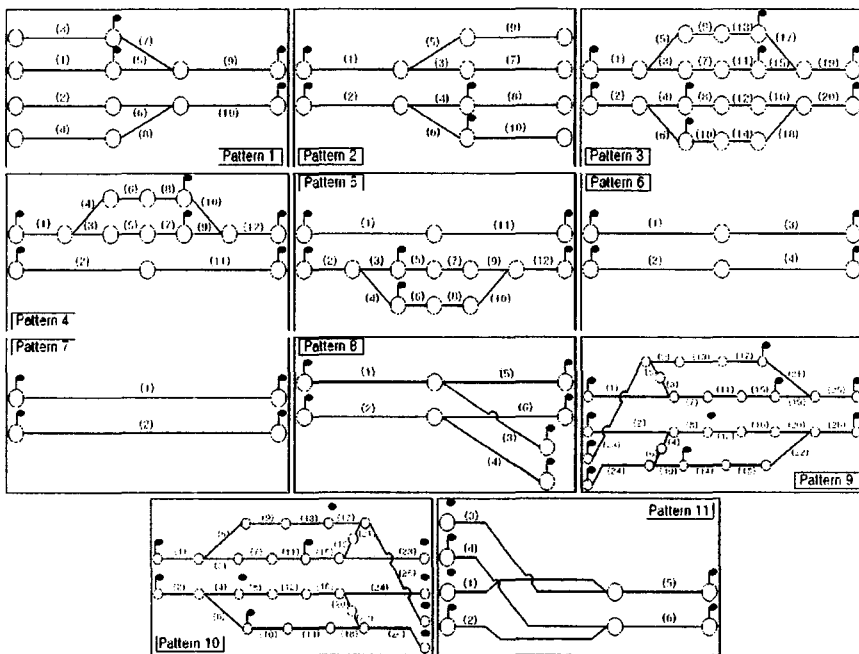


그림 3. 기본 패턴의 예

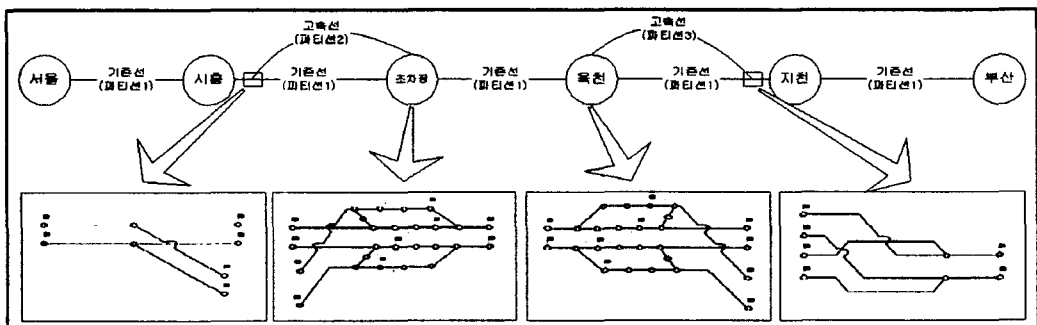


그림 4. 분지/합류패턴과 파티션 사용 예

파티션은 고속전용선과 같이 분지/합류구조가 존재하는 인프라 구성을 위해 필요한 개념이며, 각 파티션은 패턴들로 구성되어 있다. 그림 4에서는 분지/합류패턴과 파티션을 이용한 인프라 구성 사례를 보여주고 있다.

커브, 구배, 제한속도는 열차의 주행속도에 영향을 미치는 선로주변조건이며, 시작/끝위치 및 특성값과 같은 자료구조를 갖는다. 이들 특성값에 따라 해당구간에서 열차주행속도는 영향을 받게 된다.

## 2.2 열차&시각표 모델

열차는 주어진 인프라 상에서 스케줄 및 열차주행성능에 의해 운행하는 객체이며, 시뮬레이션 결과로 시간, 위치, 속도 정보와 지연/조착정보를 출력함으로써 사용자가 열차운용계획을 분석하고 평가할 수 있게 지원해준다. 열차&시각표 모델은 열차제원, 시각표, 그리고 운행루트요소로 구성되며, 열차제원 정보에는 열차번호, 기관차의 종류, 길이, 무게와 최고속도, 상용제동비, 단면적, 기관차수, 부수차의 무게, 길이와 같은 정보가 포함된다. 시각표에는 각 역에서의 도착/출발시간을 정의하고, 운행루트에는 각 열차가 운행해야 하는 경로인 아크리스트를 가지고 있다.

## 2.3 다중열차주행 모델

열차제원, 전인력곡선, 제동곡선(제동비) 등을 입력으로 시간에 따른 속도 및 위치를 구하는 부분으로서 열차운행 상태를 실제와 같이 묘사하는 부분이다. 주기능은 각 열차별로 현재시간의 상태를 바탕으로  $\Delta t$  시간후의 열차의 속도와 위치를 계산해내는 것이다. 이를 위해서 열차의 현재 위치를 기준으로 전방에 대하여 진로를 확보하고, 확보된 구간에 대하여 신호기상태, 정차패턴, 선로제한속도 등을 병합하여 최종제한속도를 산출한다. 이를 근거로 현재시간과  $\Delta t$  경과시간 간의 주행모드를 결정한 후, 그에 따른 열차운동방정식을 이용하여 다음위치, 속도를 계산하게 된다. 전방구간의 신호기를 고려함으로써 선행열차의 간섭을 반영하는 다중열차주행성능을 계산할 수가 있다. 그림 5에서는 다중열차주행 모델의 개념을 보여주고 있다. 그림 6에서는 현재 열차위치가 타행구간이 아니면서 현재속도가 제한속도보다 낮고, 현 제한속도 블록이 다음 제한속도 블록보다 높을 경우의 주행모드결정과 위치, 속도 계산의 예를 보여주고 있다. 여기에서  $s$ ,  $v$  는 각각 현재 위치, 속도를,  $s'$ ,  $v'$  는 다음위치, 속도를 나타내고 있다.

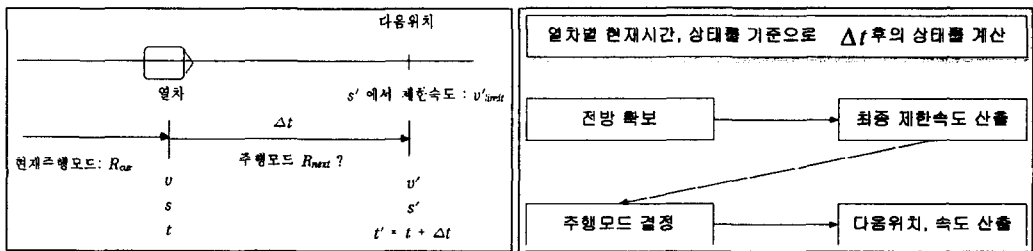


그림 5. 열차주행모델의 흐름도

## 3. 시뮬레이터의 구조

본 절에서는 2절에서 제시한 철도시스템 모델링 결과를 바탕으로 개발된 다중열차주행 시뮬레이션 프로그램(이하 시뮬레이터라 칭함)의 개념을 설명한다. 시뮬레이터는 경부선을 대상으로 하여 개발되었으며, 선행열차로부터의 간섭을 세밀하게 묘사하여 실제와 유사한 다중열차주행 실험

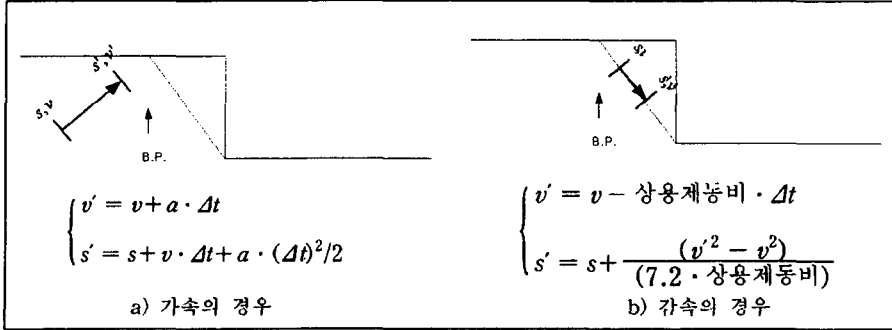


그림 6. 주행모드결정과 위치, 속도계산 예

이 가능해야만 한다. 시뮬레이션 진행 중에 열차 및 선로, 신호기 상태를 CTC표시판넬(LDP)과 유사하게 그래픽으로 현시하여 시각적으로도 수행과정을 관찰할 수 있어야 하며, 그 결과로 열차 주행곡선 및 운행다이어, 그리고 조작/지연 및 신호정보 등을 출력할 수 있어야 한다. 특히 고속선의 도입과 더불어 고속열차와 기존열차의 혼합주행이 가능하여야 하며, 외란이나 운전정리 반영이 가능하여야 한다.

개발된 시뮬레이터는 크게 입력모듈, 메인모듈, 출력모듈로 구성되어 있으며, 실험수행도중 외란 및 운전정리 반영을 위한 사용자개입이 가능하도록 설계되어 있다. 모듈간에는 프로젝트파일 및 주행결과파일들을 매개체로 독립성을 유지하도록 구성되어 있으며, 대용량의 데이터를 취급하는 이유로 데이터베이스와 연계되어 있다. 그림 7에서는 시뮬레이터의 전체구조를 보여주고 있다.

### 3.1 입력모듈

입력모듈은 시뮬레이션 수행을 위하여 필요한 선로망 데이터, 신호기 데이터, 그리고 구배, 커브, 제한속도와 같은 철도망 인프라 데이터와 열차제원, 열차시각표, 운행투트와 같은 데이터를 사용자로부터 입력받는 역할을 수행한다. 입력된 데이터들은 시뮬레이터에서 요구되는 형태로 연산·조정되어야 하며, 그 결과로 데이터베이스 파일이 생성된다. 저장된 자료는 추후에 편집이 가능하다. 그림 8에서는 입력모듈의 개념을 보여주고 있다.

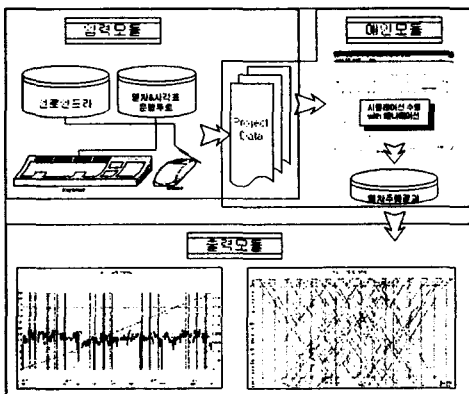


그림 7. 시뮬레이터의 전체구조

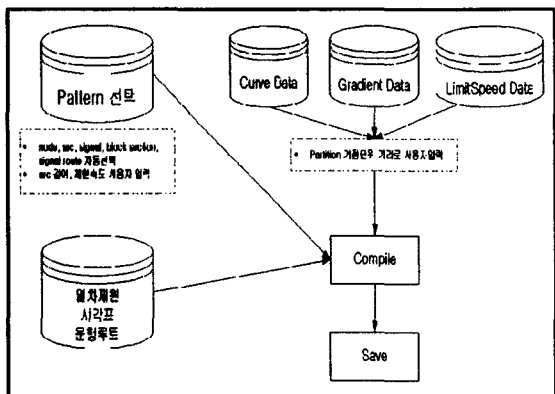


그림 8. 입력모듈의 구조

### 3.2 메인모듈

입력모듈에서 구성 혹은 편집한 인프라 및 열차관련 데이터를 이용하여 다중열차 시뮬레이션을 수행하는 모듈이며, 입력데이터와 시뮬레이션옵션으로 구성된 프로젝트데이터를 구성하는 부분과 선택된 프로젝트데이터를 기반으로 실험을 종료조건까지 반복수행하는 시뮬레이션 로직부분으로 구성되어 있다. 시뮬레이션 로직은  $\Delta t$  주기로 반복수행되며, 현재시스템 상태를 업데이트하는 부분과  $\Delta t$  후의 시스템 상태를 계산하는 부분으로 구성되어 있다. 후자의 부분에 다중열차주행모델 엔진이 사용되었다. 또한 애니메이션 온/오프 기능을 통해 시각적인 실행과정보기와 수행속도를 향상시킬 수 있다. 그림 9에서는 메인모듈의 흐름도를 보여주고 있다.

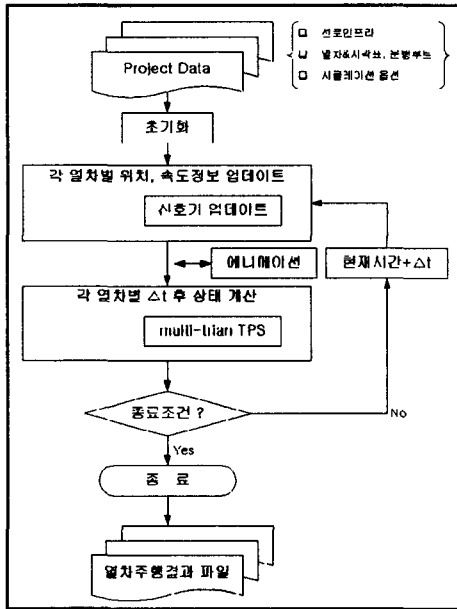


그림 9. 메인모듈의 흐름도

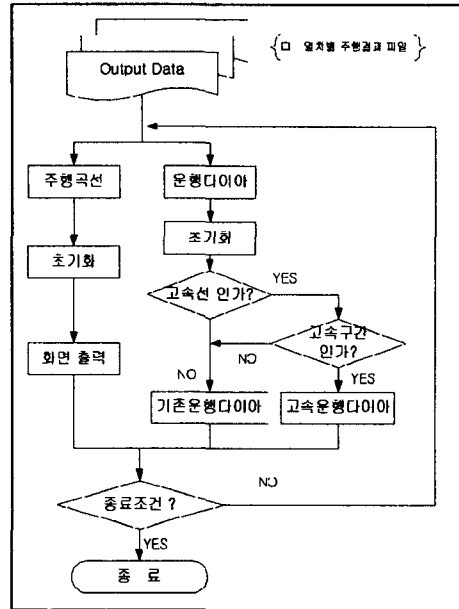


그림 10. 출력모듈의 흐름도

### 3.3 출력모듈

출력모듈은 메인모듈에서 다중열차주행 시뮬레이션 실험수행 결과로 저장된 주행결과파일을 토대로 열차주행곡선, 열차운행다이아, 조차/지연정보, 신호기정보 등을 사용자에게 보여주는 모듈이다. 주행곡선은 각 열차별로 운행거리 대비 주행속도 및 주행시간 정보를 그래프로 출력하게 되며, 이를 통해 위치별로 신호기와 선로조건 등으로 인한 미세한 속도변화를 관찰할 수 있다. 운행다이아는 다수 열차의 주행시간 대비 운행위치 정보를 그래프로 출력하게 되며, 이로부터 운행경로상의 역간 주행상황과 정차상황, 그리고 선후행 열차간의 간섭으로 인한 영향을 파악할 수 있다. 그림 10에서는 출력모듈의 주행곡선 및 운행다이아를 위한 흐름도를 보여주고 있다. 그림 11과 그림 12는 각각 주행곡선과 운행다이아 출력결과이다.

### 3.4 외란과 운전정리

열차운행에 있어 외란(disturbance)이라 함은 계획상의 열차스케줄에서 예측하지 못한 사고, 지연 등으로 인하여 계획된 열차운행에 영향을 주는 것을 말한다. 외란의 발생시 열차지연이나 경합

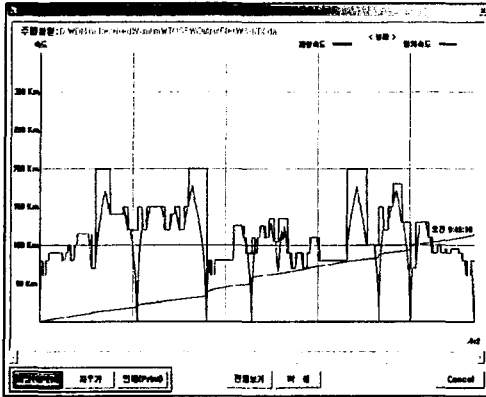


그림 11. 열차주행곡선

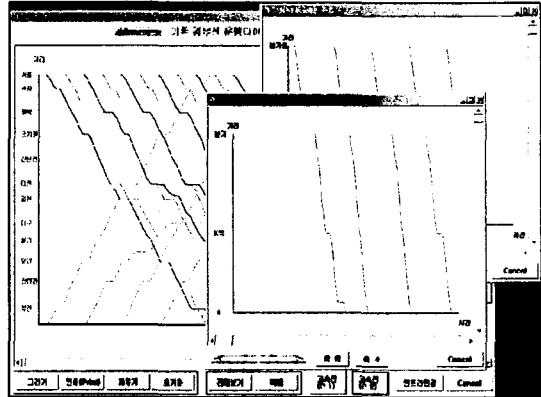


그림 12. 열차운행다이아

과 같은 현상이 발생되며, 원인해소나 시간경과시 자동으로 정상스케줄에 가깝게 회복되어야 하며 이러한 성격의 스케줄의 강인성(robustness)이라 한다. 또한 정상회복으로의 진행을 빠르게 하기 위하여 운전정리를 수행하게 된다.

본 시스템은 시뮬레이션 수행도중에 선로 혹은 열차의 고장발생, 정차지연과 같은 외란을 수동으로 발생시키고, 열차운행경로변경, 정차패턴변경, 출발시각변경과 같은 운전정리를 위한 사용자 개입이 가능하도록 설계되었다. 또한 사용자개입 후 개입시점에서부터 실험은 계속 수행된다. 그림 13에서는 5개역으로 구성된 샘플데이터와 시뮬레이터를 이용하여 지연영향과 정차패턴변경을 통한 운전회복효과를 보여주고 있다. (a)에서 T1열차가 지연출발하였을 경우 T2열차에 미치는 영향을 (b)에서 보여주고 있으며, T1열차를 역3에서 대피시켰을 경우 T2열차의 운전회복 결과를 (c)에서 보여주고 있다. 그림 14는 이들 각 경우의 T2열차의 주행곡선 변화이다.

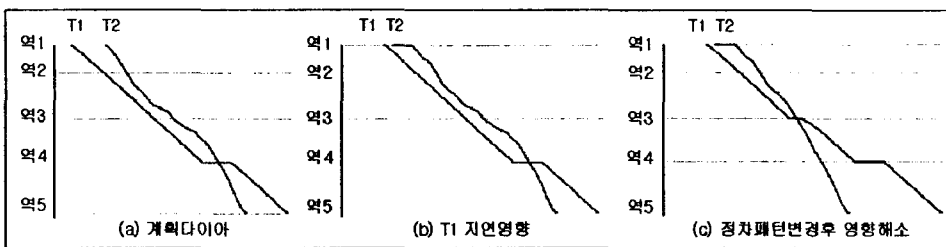


그림 13. 외란영향 및 운전정리 결과

#### 4. 결론

철도수송은 21세기 교통수송수단의 중심역할을 수행할 것으로 기대되며, 낙후된 설비와 기술을 최대한 개선해야만 하는 시급한 과제를 안고 있다. 특히 국내의 경우, 차량, 노반, 궤도 등과 같은 하드웨어 기술에 비교할 때 운영과 같은 소프트웨어적 기술은 미흡한 실정이다. 열차주행 시뮬레이션은 열차운영계획의 수립 및 시설투자과 평가를 위하여 필수적인 도구라 할 수 있다. 경부고속철도의 도입과 더불어 그 필요성은 더욱 가중되고 있다.

본 연구에서는 고속선을 고려한 다중열차주행 시뮬레이터 개발결과를 제시하였다. 시뮬레이션을 위한 철도시스템 자원에 대한 모델링을 제시하고, 시스템의 구성 및 개념을 설명하였다. 특히 외란설정을 통한 스케줄 강인성 검토, 다이아 검증, 그리고 실시간 계스케줄을 위한 운전정리 수행

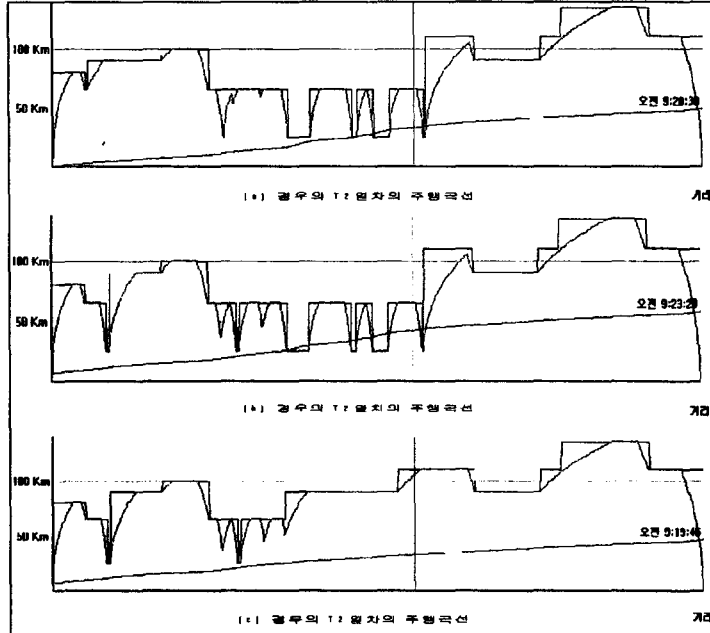


그림 14. 그림 13에서의 주행곡선

을 위한 사용자개입을 반영하였다.

추후과제로는 시뮬레이터의 수행성능개선과 함께 입출력디자인개선이 있어야 하겠다. 또한 현재 미비한 기능 중, 수동방식의 외란설정이 아닌 확률실험이 가능한 자동외란설정기능과 자동운전정리기능, 그리고 경합검출 및 관리분석기능에 관하여 고려할 계획이다. 마지막으로 고속선을 고려한 환경에서 다양한 시나리오 분석을 통해 선로용량검토 및 혼합열차운용방안에 대한 연구가 있어야 하겠다.

#### 참고문헌

1. 김동희, 오석문(2000), "경부선 혼합 열차운용 시뮬레이션 개발에 관한 고찰", 한국철도학회 추계학술대회발표논문집
2. 김재영(1994), 컴퓨터 시뮬레이션, 박영사
3. Ceric,V.(1997), Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations, Mathematics and Computers in Simulation 44
4. Law,A.M. and W.D.Kelton(1991), Simulation Modeling & Analysis, McGraw-Hill
5. Montigel,M.(1992), Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs, Computers in Railways III Vol.2 : Technology
6. Okumura,S. and S.Ishida(1992), Railway Network Simulation System Based on Object-Oriented Technology, Computers in Railways III Vol.1 : Management
7. Pcgdon,C.D., R.E.Shannon and R.P.Sadowski(1995), Introduction to Simulation Using SIMAN, McGRAW-Hill
8. Siu,L.K. and C.J.Goodman(1992), An Object-Oriented Concept for Simulation of Railway Signalling and Train Movements, Computers in Railways III Vol.1 : Management