

객체지향 철도 모델에 의한 다중 열차운행 시뮬레이션

최 규 형*

한국철도기술연구원*

An Object-Oriented Railway Model for Multi-Train Operation Simulation

Kyuhyoung Choi*

*Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woulam-dong, Uiwang-city, Gyeonggi-do 437-050, Korea
(Received 12 May 2003 / Accepted 24 July 2003)

Abstract : A computer simulation program to evaluate the performance of railway systems and train operation plans and the effects of new technologies is provided. The program has the functions of tracing the movements of trains on railway network following the indication of railway signalling system and obeying all kinds of operation rules. An object-oriented technique is applied to model railway system effectively, and it is expected that the program code can be reused easily for other railway simulation programs. Dedicated graphic user interface displaying the simulation outputs by animation during simulation process makes the program convenient to use. Simulation results on the train operations on Kyung-bu line show the proposed program is promising.

Key words : Computer simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Train operation(열차운행), Railway network(철도망), Object-oriented approach(객체지향기법)

1. 서론

열차운행 시뮬레이션은, 철도신호체계를 준수하면서 열차의 주행성능 및 선로조건에 따라 철도망에서 주행하는 다수의 열차들의 운행상태를 수리모델화하여 컴퓨터 상에서 시뮬레이션하는 것으로서, 선로의 구성과 열차운행 계획간의 적절한 관계를 찾아내어 고품질의 철도 서비스를 창출하기 위한 시설투자계획 및 열차운행계획 수립을 지원하는 것을 주목적으로 한다. 즉, 주어진 철도시설 조건하에서 최적의 운송효율을 얻기 위한 열차계획 수립 및 열차나 선로 사고시의 열차지연상황 파악과 그에 대한 대책수립과 같은 열차운영계획분야는 물론이고, 미리 정해지거나 예측 가능한 운송수요 및 열차

성능에 대해서 시설조건의 적합 여부를 검토하여 신선건설 및 기존선로 증설계획 수립과 같은 시설 투자계획분야 및 신기술도입 효과 분석등과 같은 여러 분야에 폭 넓게 적용되는 것을 전제로 한다.¹⁻³⁾

이와 같은 열차운행 시뮬레이션의 특성상, 철도 시스템을 구성하는 선로/역시설 및 신호장치 동작 특성을 포함하여, 열차들의 주행특성과 제동특성, 운전계획등에 대한 모델이 적절하게 수립되어야 한다. 특히, 다수의 열차가 상호간에 영향을 미치면서 동시에 운행되는 다중 열차운행 상황을 시뮬레이션 하기 위해서는, 각 열차가 일정 선로 구간을 주행하는데 따른 시각별 위치, 속도, 전력 소비등 열차의 제반 주행성능에 대한 시뮬레이션은 물론, 신호시스템과 연계하여 열차 상호간에 미치는 영향까지 시뮬레이션할 수 있어야 하므로, 열차주행성능에

*To whom correspondence should be addressed.
khchoi@krii.re.kr

대한 모델링과 더불어 선로시설 및 신호시스템에 대한 상세 모델링이 수반되어야 한다.^{4,5)}

이에 따라, 철도시스템의 고유특성 및 적용 목적에 따라 그에 적합한 열차운행 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 적용할 필요가 있기 때문에, 영국의 VISION,⁶⁾ 스웨덴의 TTS/SIMON,⁷⁾ 홍콩과 런던 지하철의 Multi-Train Simulator,⁸⁾ 일본의 Train Headway Simulator⁹⁾ 등 많은 프로그램이 개발되어 합리적인 시설 투자 및 열차운영계획을 수립하는데 적극적으로 활용되고 있다.

이상과 같은 배경을 토대로, 본 연구에서는 국내 철도시스템의 운영체계에 적합한 열차운행 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 객체지향기법을 이용하여 철도시스템을 구성하는 선로 네트워크와 신호 시스템, 열차 및 열차계획등에 대한 효과적인 수리 모델을 구축하고, 프로그램을 작성하였다.¹⁰⁾ 또한, VIS(Visual Interactive Simulation) 기법을 적용하여, 실시간 동영상 그래픽으로 시뮬레이션 진행 상황을 표시하여 결과를 분석하고 시뮬레이션 과정을 제어할 수 있도록 하였다.¹¹⁾ 개발된 프로그램에 대하여, 경부선 전구간을 대상으로 선로시설 및 열차에 대한 데이터베이스를 구축하였고, 열차운행 시뮬레이션을 수행하여 그 유효성을 검토하였다.

2. 열차운행 시뮬레이션 프로그램

2.1 프로그램 요구사항

열차운행 시뮬레이션의 기본적인 기능으로서는, 운전스케줄에 따라 열차를 출발시키고, 시간을 임의의 시간중분씩 증가시켜가면서 열차 주행성능에 따라 주행속도 및 선로상의 위치를 계산하고, 열차 위치에 따라 신호기를 제어하고 열차 진로를 설정하여 열차운행을 제어하는 것이다.

이와 같은 기본 기능에 더하여, 본 연구에서 고려한 사항은 다음과 같다.

- 1) 국내 철도시스템을 대상으로, 신호시스템의 고유 특성 및 열차운전 체계를 모의할 수 있어야 한다.
- 2) 경부선 전 선로구간을 시뮬레이션할 수 있어야 한다.
- 3) 시뮬레이션 진행상황을 그래픽 동화상으로 표

시하고, 시뮬레이션에 개입하여 열차 경로 변경 및 정차등의 열차제어, 선로 운영 상황을 임의로 변경할 수 있어야 한다.

2.2 프로그램 구성

Fig. 1에 보이는 것처럼, 입력 모듈과 시뮬레이션 모듈, 출력 모듈 및 사용자 인터페이스 모듈로 구성된다. 객체지향형 프로그래밍 언어인 MS-Visual C++을 이용하여 윈도우 환경에서 프로그램 모듈을 개발함으로써 프로그램의 수정 및 추가, 보완이 용이하도록 하였다.

입력모듈은 방대한 양에 달하는 철도망 및 열차 데이터를 입력하여 데이터베이스를 구축하고, 프로그램에서의 연산에 적합한 파일로 변환한다. 데이터베이스 관리는 MS-Access를 이용하였다.

시뮬레이션 모듈은 프로그램의 핵심으로서 철도망 모듈과 열차 모듈로 구성된다.

출력 모듈은 시뮬레이션 종료 후 그 결과를 체계적으로 제시하여 사용자를 지원하기 위한 부분으로, 열차다이나와 열차운전곡선의 작도 및 열차주행 파일 출력 프로그램으로 구성되는데, 다른 모듈과는 분리하여 독립적으로 개발하였다.

사용자 인터페이스 모듈은, 시뮬레이션 흐름을 제어하고 결과 분석을 지원하기 위하여, VIS(Visual Interactive Simulation) 기법을 적용하여 개발하였다. 즉, 선로시설 및 신호장치를 그래픽 화면으로 표시하고, 열차 위치, 속도 및 신호기 상태등을 동화상

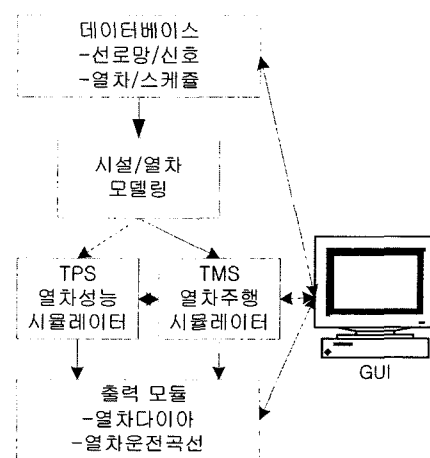


Fig. 1 Configuration of simulator

으로 표시함으로써 시뮬레이션 진행 상황을 한눈에 파악할 수 있게 하고, 열차진로 설정 및 파라미터 제어를 통해 시뮬레이션에 개입하여 열차간 상호 간섭 패턴 및 열차지연상황을 효과적으로 분석할 수 있게 한다.

3. 객체지향기법에 의한 열차운행 시뮬레이션 모델

철도시스템을 구성하는 선로/신호 관련 철도기반 시설 및 열차와 열차의 스케줄에 해당하는 시간 표로 나누어 다음과 같이 모델링하였다.

Table 1 Physical components of railway network

객체	속성(attribute) & 기능(operation)
Line (선로)	- 철도망(노드-링크)모델 데이터 - 곡선, 구배, 제한속도 데이터
LineSection (선로구간)	- 국부적인 선로 패턴 데이터 - TrackSection 데이터 생성 기능
TrackSection (궤도구간)	- 철도망 데이터
TrackCircuit (궤도회로)	- 철도망 데이터 - 궤도회로 구성 기능
Segment (선로 단위)	- 철도망 데이터 - 그래픽 표시 기능
Signal (신호기)	- 종류, 방향, 위치 데이터 - 전후방 신호기 정보 생성 기능 - 전후방 진로 정보 생성 기능
SignalRoute (열차진로)	- 궤도회로 데이터 - 전후 신호기 데이터 - 진로 설정 기능

3.1 철도시설 모델

철도망을 물리적 또는 개념적으로 의미 있는 요소들로 나누어, Fig 2에 보이는 것처럼 3단계의 계층(Hierarchy) 구조로 모델링하였다. 이 모델에서는, 어느 계층에 있어서도 노드-링크(Node-Link)의 망구조로 나타낼 수 있고, 열차의 진행경로(route)를 임의로 생성할 수 있다. 또한, 신호기와 연계된 열차의 진행 경로를 설정하기 위한 기본 단위로서 진로(Signal Route)를 Fig. 3과 같이 정의하였다.

신호기를 포함하여 철도망을 구성하는 요소들은 Table 1에 보이는 것처럼, 그 자체를 각각 하나의 객체로 정의할 수 있다. Fig. 4는, 이러한 객체들을 추상화한 클래스들간의 관계를 나타내는 클래스 다이어그램(Class Diagram)으로서, 객체지향 분석 및 설

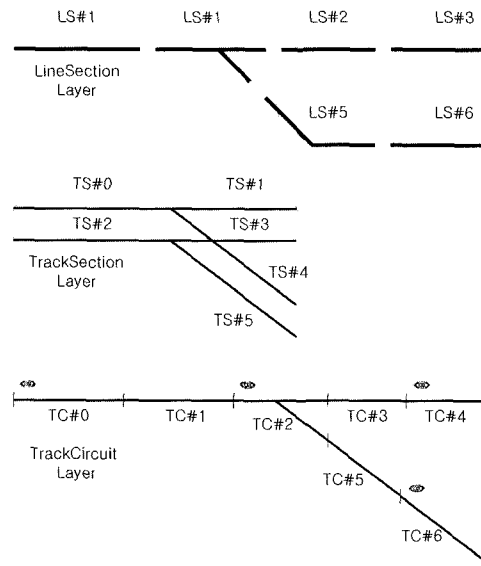


Fig. 2 Railway network model

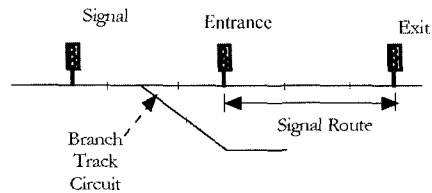


Fig. 3 Signal route model

계를 위한 UML (Unified Modelling Language) 표준에 따라 Rational ROSE/C++을 이용하여 작성한 것이다.¹²⁾ Fig. 4에서 클래스를 나타내는 사각형 블록은, 위에서부터 차례로 클래스 명, 클래스의 속성 및 클래스의 기능을 나타내며, 연결선은 클래스간의 관계를 나타낸다.

3.2 열차/시간표 모델

열차는 선로상의 주어진 경로를 따라, 신호시스템의 통제를 받으며 스케줄과 열차성능에 따라 주행하는 객체로서 모델링할 수 있다. 열차들의 주행 성능은 열차 제원, 견인력 및 제동력 특성에 의해 열차의 가/감속 성능을 구하고, 선로 및 차량제한속도를 고려하여 실제 주행하는 속도와 거리를 계산하여 실제 열차의 주행을 모의하는 것으로서, 열차성능 시뮬레이션 프로그램인 TPS(Train Performance Simulator)를 이용하여 계산할 수 있다.¹³⁾ 이에 따라,

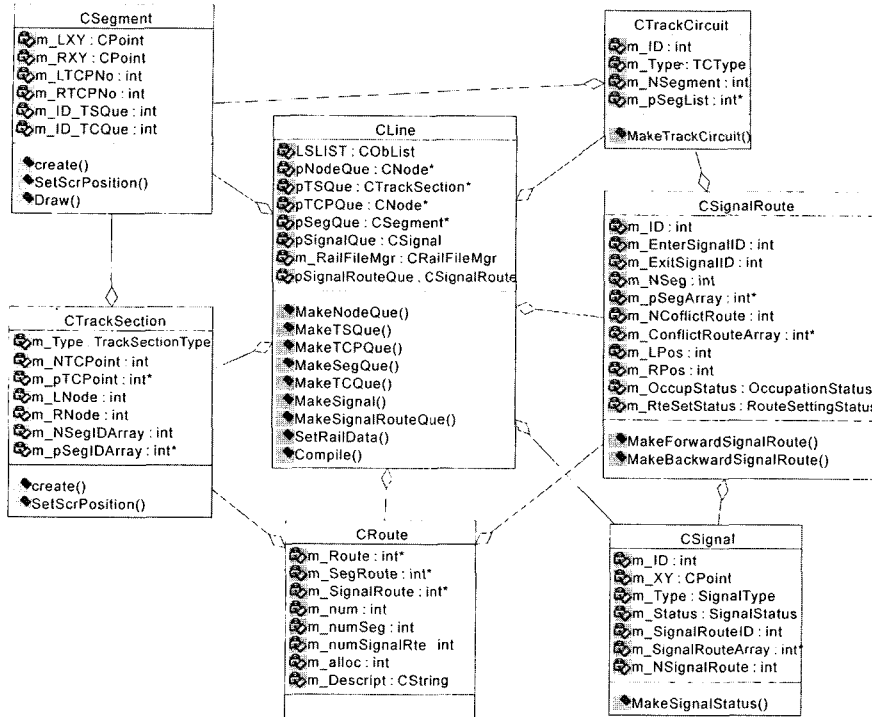


Fig. 4 Class diagram of railway facilities model

열차의 객체 모델은, Table 2에 보이는 것처럼, TPS에 필요한 데이터와 열차운행 스케줄에 필요한 데이터들이 속성으로 주어져야 하며, 열차는 자신의 스케줄 데이터를 참조하고, 열차제원 데이터를 실시간으로 TPS 모듈에 넘겨주어 시간에 따른 속도와 거리를 계산함으로써 선로 상에서의 위치를 갱신하는 기능을 갖는다.

한편, 시간표의 객체 모델은 전체 열차 및 운행중인 열차의 리스트를 포함하여, 각 열차의 출발역, 도착역, 정차역 및 통과역과 그 통과시각들을 데이터베이스로부터 입력받아 속성으로 설정한다. 또한, 출발 순서로 열차를 정렬하는 기능과 화면으로 시간표를 출력하는 기능과 화면으로부터 열차제원을 직접 변경하는 기능등의 데이터 편집에 관한 기능들을 갖는다. 특히, 시뮬레이션 시간을 기준으로 운행중인 열차의 리스트를 지속적으로 갱신하는 기능을 가지고 있는데, 출발시간이 되지 않았거나 정차중인 열차는 현재 운행되는 열차의 리스트에서 제외하여 시뮬레이션 부담을 줄이게 된다.

이상과 같이, 열차/시간표의 객체 모델에서는 시

Table 1 Physical components of railway network

객체	속성(attribute) & 기능(operation)
Line (선로)	- 철도망(노드-링크)모델 데이터 - 곡선, 구배, 제한속도 데이터
LineSection (선로구간)	- 국부적인 선로 패턴 데이터 - TrackSection 데이터 생성 기능
TrackSection (궤도구간)	- 철도망 데이터
TrackCircuit (궤도회로)	- 철도망 데이터 - 궤도회로 구성 기능
Segment (선로 단위)	- 철도망 데이터 - 그래픽 표시 기능
Signal (신호기)	- 종류, 방향, 위치 데이터 - 전후방 신호기 정보 생성 기능 - 전후방 진로 정보 생성 기능
SignalRoute (열차진로)	- 궤도회로 데이터 - 전후방 신호기 데이터 - 진로 설정 기능

간표에서 각 열차들의 스케줄을 관리하게 되므로 입력부터 출력까지의 전체 열차운행을 제어하는 객체는 시간표이며, 각 열차는 시간표 객체안에서 다루어지게 된다. 따라서, 열차(Train)와 시간표(Time-Table)라는 두 클래스 간의 관계는 Fig. 5와 같다.

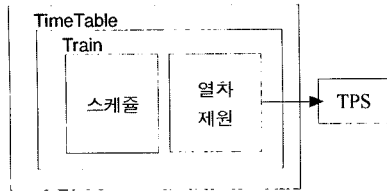


Fig. 5 Relationship between timetable and train

4. 시뮬레이션 사례

개발된 시뮬레이션 프로그램의 기능을 점검하기 위하여, 경부선 진구간에 대하여 실제로 운행되고 있는 선로시설 및 차량, 시간표에 대한 데이터베이스를 구축하였고, 이 데이터를 이용하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 열차 운행 제어 시뮬레이션

Fig. 6은 경부선 서울역-수원역간 선로를 대상으로 열차 운행 시뮬레이션을 수행한 사례로써, 5번 열차가 영등포역에 진입한 후 운행장애를 일으켜서 정차해 있을 때, 후속하는 255, 109번 열차가 신호기가 현시하는 폐색구간별 제한속도를 위반하지 않고, 신호기에 따라 열차 속도를 정확히 제어하는

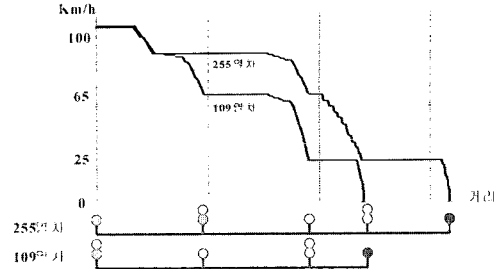


Fig. 6 Run curve outputs of train control simulation

것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 하단에는 255, 109번 열차가 진행하면서 전방에서 보게 되는 신호기의 현시상태를 나타낸다.

4.2 경부선 열차운행 시뮬레이션

경부선 서울-부산간 445km 상/하행 구간에 대하여 하행선 9:00에서 16:35까지와 상행선 6:00에서 13:45까지 운행되는 55편성의 열차에 대한 열차운행 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과로써는, 시뮬레이션 진행중에 각 열차들의 주행상황을 실시간 동화상 그래픽으로 표시하는 Mimic Diagram외에 열차들의 주행실

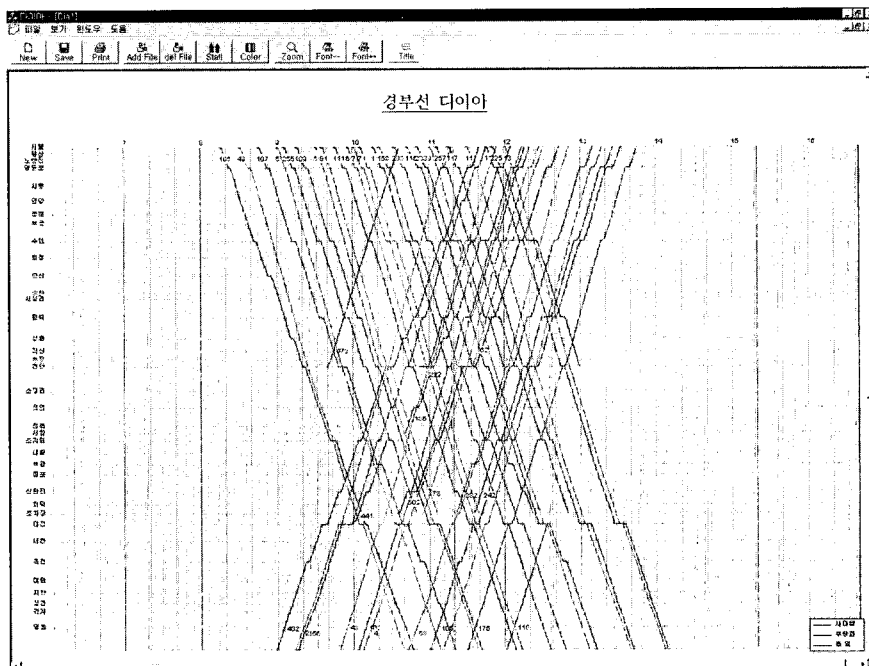


Fig. 7 Train diagram outputs of Gyeong-bu line simulation

최규형

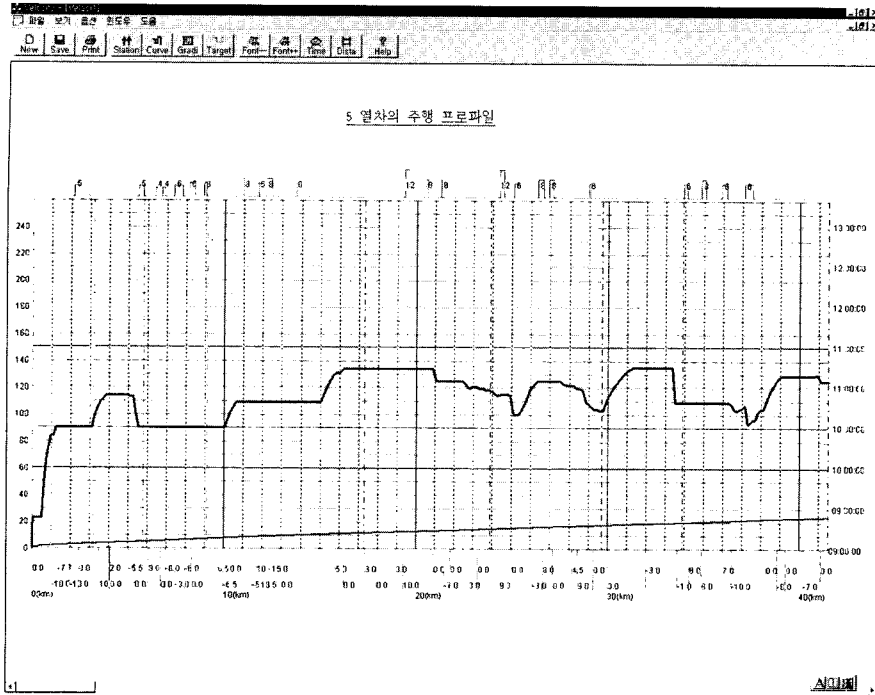


Fig. 8 Run curve outputs of Gyeong-bu line simulation

적에 따른 열차다이아와 운전곡선, 주행과일등이 출력됨으로써, 주어진 선로조건 및 차량제원, 시간표에 따른 열차들의 운행상태를 종합적으로 분석할 수 있다.

시뮬레이션 결과로 출력된 열차다이아의 한 예를 Fig. 7에 보인다. Fig. 7은, 중간 정차역이 없이 고속으로 운행하는 새마을 열차와 영동포역에서 정차하는 열차가 혼합되어 55편성의 열차가 운행되고 있으나, 열차 상호간 간섭을 받지 않고 예정된 시간표에 따라 지연없이 운행되는 것을 나타낸다.

이와 같이 운전시간표를 입력하여 시뮬레이션을 수행하면 열차운행실적에 따른 열차다이아가 자동적으로 작성되어 계획다이아와의 비교분석이 가능하며, Mimic Diagram의 그래픽 표시와 더불어 열차 운행상태에 대한 종합적인 분석이 가능하게 된다.

Fig. 8은 시뮬레이션 결과 출력된 경부선 서울-부산간을 운행하는 새마을 5번 열차의 주행곡선을 나타내고 있다. Fig. 8에서 횡축은 열차가 진행하는 거리(역)를 나타내며, 종축은 열차 주행속도를 나타냄으로써 열차들의 각 위치별 주행속도 실적을 나타

낸다. 또한, 열차들의 누적 주행시간을 나타내는 시간-거리 곡선도 같이 표시하였다. Fig. 8의 상단에는 열차주행속도에 크게 영향을 미치는 선로의 곡선구간을 수치(5=500R)로 나타내는 그래프가 있으며, 하단에는 선로 구배(%) 구간을 나타내는 막대 그래프가 부기되어 열차들의 주행실적 분석에 참고가 되도록 하였다.

이와 같이 시뮬레이션을 수행하면, 각 열차들의 주행이력을 자동적으로 그래픽 출력할 수 있게 함으로써 각 열차들의 주행실적을 분석함과 동시에 입력 데이터를 점검할 수 있다.

5. 결론

1) 철도시스템을 구성하는 선로망 구조, 신호시스템, 차량 및 운행 스케줄에 대한 수리 모델을 작성하고, 이를 토대로 철도선로상에서 다수의 열차가 운행되는 상황을 컴퓨터상에서 시뮬레이션할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 국내 철도 환경에 적합한 프로그램을 구성하기 위하여, 열차운영체제도 국내 철도신호시스템의 특성을 모의하도록 반영하

였고, 경부선 전 구간에 대한 시뮬레이션이 가능하도록 데이터베이스를 구축하였다.

2) 열차 및 신호등의 철도시스템 구성요소들은 객체지향 모델에 적합하다. 따라서, 열차운행 시뮬레이션 프로그램은 객체지향기법을 이용하는 것이 효과적이고, 프로그램 작업의 생산성 및 프로그램 코드의 재활용성 향상등을 기대할 수 있다.

3) VIS(Visual Interaction Simulation)에 의한 시뮬레이션 진행중의 결과 표시 및 분석 기법도 열차운행 시뮬레이션에 있어 매우 유력한 수단임을 확인하였다.

4) 경부선 구간에서의 실제 선로 데이터 및 열차운행 데이터를 사용하여, 열차계획에 따른 다수의 열차들의 운행상황과 사고로 인한 열차 운행장애 발생시의 열차운행상황등에 대한 시뮬레이션을 통하여 개발된 프로그램이 철도업무에 유용하게 응용될 수 있다는 것을 보였다. 즉, 철도시스템에 있어서 발생할 수 있는 모든 상황에 대해서, 컴퓨터상에서 시뮬레이션을 통하여 그 영향 및 파급효과등을 분석하는 것이 가능하다는 점과, 이에 따라 거대 복합 시스템으로써 막대한 투자비가 소요되는 철도시스템에 있어서 사전 시뮬레이션을 통하여 합리적인 철도시설 투자 및 운영계획 수립을 지원하기 위한 효과적인 지원도구가 될 수 있음을 확인하였다.

향후에는 사용자 인터페이스등의 프로그램 기능을 추가·보완하고, 프로그램의 기능을 검증할 수 있는 검증기법을 수립하여 프로그램의 성능을 검증하는 작업을 수행함으로써 프로그램의 완성도를 향상시키고, 실제 업무에의 적용이 가능하도록 실용화를 추진할 계획이다.

References

- 1) N. Nozue, "Simulation Applied in Railways," Railway and Electrical Technology, Vol.7, No.6, pp.5-11, 1996.
- 2) Y. Liu, "The Analysis of Train Transportation Simulation System", Proc. of the 4th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Mass Transit Systems, Madrid Spain, Vol.2, pp.297-444, 1994.
- 3) J. H. R. van Duin, "Methodologies for Evaluating Possible Traffic Patterns of Alternative Railroad Traces in an Early Stage of Planning," The 3rd World Congress on Railway Research, Firenze Italy, Vol.C, pp.771-778, 1977.
- 4) K. Komaya, "A Partial Simulation for Traffic System," Trans. IEE Japan, Vol.107-C, No.10, pp.923-930, 1987.
- 5) K. Abe, S. Araya, "Train Traffic Simulation Using the Longest Path Method," Trans. on Information Process Japan, Vol.27, No.1, pp.103-111, 1986.
- 6) M. McGuire, D. Linder, "Train Simulation on British Rail," Proc. of the 4th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Mass Transit Systems, Vol.2, pp.437- 444, Madrid Spain, 1994.
- 7) T. Liden, "The New Train Traffic Simulation Program Developed for Banverket and Its Design," Proc. of the 3rd Intern'l Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems, Washington DC, Vol.1, pp.533-544, 1992.
- 8) J. Allan, "Developments in Multi-train Simulation by London Underground Limited and Hongkong Mass Transit Railway Corporation," Proc. of the 3rd International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems, Washington DC, Vol.1, pp.425-443, 1992.
- 9) T. Okuda, T. Takashige, "Simulation System Evaluating the Train Headway," RTRI Report, Vol.7, No.6, pp.9-16, 1993.
- 10) G. Booch, "Object-oriented Development," IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. SE-12, No.2, pp.211-221, 1986.
- 11) K. Tsiflakos, D. B. Owen, "A Decision Support Tool for the Railway Industry Based on Computer Graphics and Intuitive Modelling Techniques," Microcomputers in Civil Engineering, Vol.8, pp.105-118, 1993.
- 12) G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson, "The

Kyuhyoung Choi

- Unified Modeling Language User Guide,”
Intervision, 1999.
- 13) T. Ahn, M. Kim, S. Han, W. Kim, “Development of Train Performance Simulator Program,” Proc. of the KIEE Summer Annual Conference, Vol.B, pp.368-370, 1998.