

다중열차 시뮬레이션을 위한 철도시스템 모델

Railway System Model for Multi-Train Traffic Simulator

김동희¹, 김성호², 오석문³

Dong-Hee Kim, Seong-Ho Kim, Seok-Moon Oh

Keywords : multi-train(다중열차), large-scale infrastructures(대규모 인프라)
traffic simulator(통행 시뮬레이터), railway system model(철도시스템 모델)

Abstract

Railway companies have been faced with many changes in the railway environment. To cope immediately with the influence of environment and to improve productivity, an efficient train operation system and related core technologies must be introduced. The railway system is composed of large scale infrastructures and high-cost trains. Simulation method is one of core technologies and also efficient tool for planning and analyzing these kinds of complex system.

In this research, we review basic simulation programming models and present a modeling for the elements of railway system such as rail-line infrastructure, train, time table and operational route. Additionally, some considerations on the development of multi-train traffic simulator for KyongBu-line are discussed.

1. 서론

시뮬레이션이란 '어떤 시스템의 행동을 이해하거나, 그 시스템 운영을 위한 여러 가지 전략들을 평가하기 위하여 실제 시스템에 대한 모델을 고안해서 그 모델을 가지고 실험을 수행하는 과정'이라고 Pegdon, Shannon and Sadowski(1995)는 정의하였다[1]. 즉, 현실문제를 반영하는 모형을 만들어 실험을 함으로써 현실문제를 이해하고, 여러 가지 대안의 결과를 예측하거나 혹은 실제의 상황을 간단한 모형을 통해서 실험을 하고 그 실험의 결과에 따라 행동 혹은 의사결정을 하는 기법이 시뮬레이션이다. 따라서 현실 시스템을 실제로 구축하지 않고도 시뮬레이션을 통하여 평가를 수행할 수 있다는 장점이 있다[2]. 특히 대규

모의 인프라와 고가의 열차로 구성된 철도수송시스템과 같이 비용이 많이 들고 실질적인 실험을 하기 곤란한 대규모 운영시스템인 경우 시뮬레이션을 이용한 시스템의 계획 및 평가가 특히 효율적이라고 할 수 있다.

열차운용분야에서 업무에 실제로 적용되고 있는 시뮬레이션 기반 지원시스템으로는 크게 열차주행상황을 충실하게 모의하기 위한 열차운용 시뮬레이션프로그램, 열차다이아 작성 작업 전산화/자동화를 위한 열차다이아작성 지원시스템, 그리고 열차운영 중 이례상황 발생시 대처를 위한 열차운전정리 지원시스템 등을 들 수 있다. 이들 시스템들은 각각 그 주요기능과 목적이 상이하므로 시스템 설계에 있어서 가장 적합한 구조와 효과적인 시뮬레이션 기법을 채용함으로써 그 효율을 극대화시켜야 한다. 특히, 열차운용 시뮬레이션은 열차운영계획의 수립 및 시설투자를 위한 사전 검토를 위하여 기본적으로 필요한 도구이며, 대부분의 해외 철도회사에서는 각기 고유의 철도환경에

¹ 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

² 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

³ 정희원, 한국철도기술연구원, 주임연구원

적합한 열차운용 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 실제 업무에 활용하고 있는 실정이다[3]. 이들 대표적인 프로그램의 예로는 영국의 VISION(visualization & interactive simulation of infrastructure & operation on rail network), MTS (Multi-Train Simulator), 스웨덴의 SIMON, 네덜란드의 HSL(High Speed Line simulator), 일본의 운전시각 단속평가 시뮬레이터 등을 들 수 있다. 국내의 경우 차량·동력 시스템, 전기·신호시스템, 노반·궤도시스템과 같은 하드웨어적 요소들에 관한 기술은 상당한 수준에 올라와 있다. 그러나 열차운용 시뮬레이션과 같은 철도 시스템 운영과 관련한 소프트웨어적 요소들에 대한 기술은 부분적이고 단속적인 연구수행으로 인하여 선진국 수준과 비교하여 많은 차이가 있는 실정이다.

본 연구에서는 고속철도 도입과 더불어 열차운용 시뮬레이터 개발을 위한 시뮬레이션 프로그램 구조모형을 검토하고, 선로인프라, 신호기 등과 같은 철도시스템 모델을 제시하고자 한다. 마지막으로 고속선을 고려한 다중열차주행 시뮬레이션 개발에 있어 고려해야 하는 사항에 관해 검토한다.

2. 열차운용 시뮬레이션 모델

거대·복잡한 철도시스템에 대한 계획·분석·평가를 위해서는 시뮬레이션을 이용한 분석은 필수적이다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 현실의 문제점을 파악하고 이에 대응하는 모델을 만들어야 하며, 모델을 만들기 위해서는 관심대상인 현실문제를 하나의 시스템으로 보는 것이 필요하다. 열차운용 시뮬레이션은 철도시스템을 모델링하고 선로상을 주행하는 다수의 열차 움직임을 모의실험을 통하여 분석하는 것이다. 일반적으로 시뮬레이션 모델은 Fig. 1과 같이 분류될 수 있다.

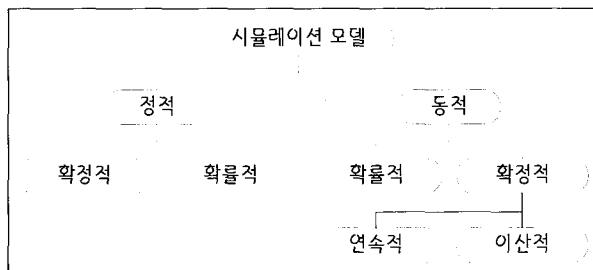


Fig. 1 시뮬레이션 모델의 분류

정적인 시뮬레이션 모델은 시간의 경과가 시스템의 상태에 영향을 미치지 않는 모델을 나타내며, 동적인 모델은 은행의 고객수와 같이 시간의 경과에 따라 시스템의 상태가 바뀌는 모델을 말한다. 또한 확정적인 모델은 공정시간, 서비스시간, 수송시간과 같은 시스템변수가 상수로 고정되어 있는 경우를 가리키며, 확률적 모델은 확률분포를 사용하는 가변적인 모델을 말한다. 시뮬레이션에서는 시간의 경과에 따라 시스템의 상태가 변화하게 되며, 따라서 시간의 관리는 중요하게 된다. 시뮬레이션 기법을 구분할 때에도 이 시간관리를 어떻게 하느냐에 따라서 하는 것은 매우 의미 있는 일이다. 이에 기초해서 시뮬레이션 모델은 연속형 또는 이산형으로 다시 나누어 질 수 있다[4].

2.1 연속형 모델(Continuous or Microscopic Model)

일반적으로 수학적 모델에 적용되는 시뮬레이션 모델로서, 엄밀하게 말하면 연속형 모델은 컴퓨터 시뮬레이션이라고 말할 수 없다. 컴퓨터는 연속적인 시간을 다루지 못하기 때문이다. 열차성능 계산프로그램(TPS ; train performance simulation)에서와 같이 주어진 선로조건, 차량성능과 열차운동방정식으로부터 열차의 주행과 신호등 설비상태를 초단위로 충실히 모의하는 방식에 사용되며, 열차운동방정식은 미분방정식으로 표현되기 때문에 수치해석 기법을 이용한다(Fig. 3). 연속형 모델에 의한 열차성능 계산의 대표적인 기법으로는 전·후향 궤적계산 (forward and backward trajectory calculation) 을 들 수 있다(Fig. 2).

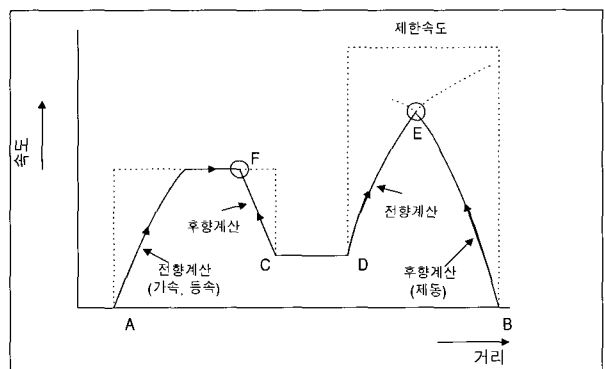


Fig. 2 전·후향 궤적계산

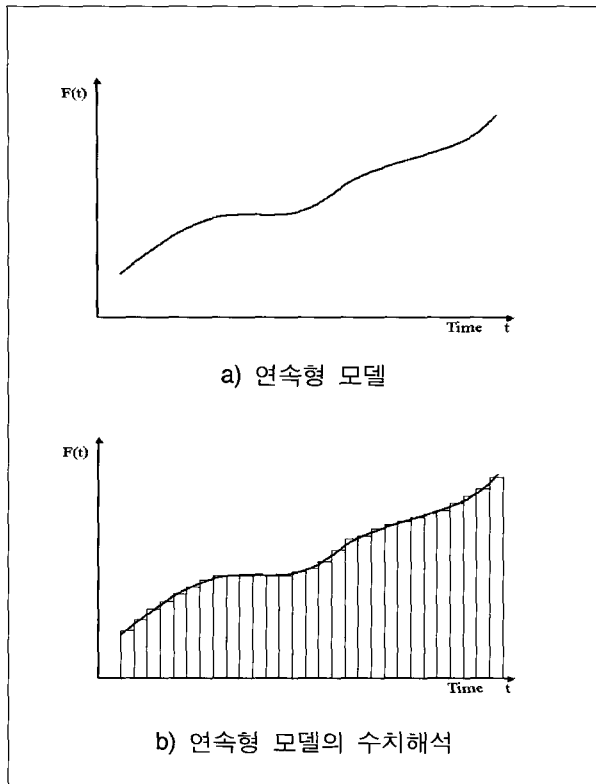


Fig. 3 연속형 모델의 시간관리

이러한 연속형 모델에서는 신호기를 매개체로 선·후행 열차간의 간섭을 반영하면서 열차운전곡선과 역간운전시분을 정확하게 계산할 수가 있다. 따라서 열차운용계획의 안정성, 시설투자에 따른 경제성, 신호보안시스템의 안전성 검토 등 열차운용을 위한 기본계획 작성에 이용될 수 있다. 그러나 초단위의 계산으로 인하여 신속한 계산이 요구되거나 다수 반복수행하여야 할 경우에는 적용하기가 곤란하다.

2.2 이산형 모델(Discrete or Macroscopic Model)

연속형 모델을 컴퓨터로 옮겨와 프로그래밍 하게 되면 바로 이산형 모델이 된다. 이산형 모델은 일정 시간값을 주기로 샘플링된 값을 모델의 변화로 반영하게 된다. 변화가 없는 시스템상태를 매 주기마다 검사해야하는 등의 문제점 해결과 수행도 향상을 위하여 일반적으로 이산사건 시뮬레이션(discrete event simulation)을 사용하게 된다[4]. 여기에서 사건이란 시스템에 상태변화를 가져오는 사건을 말하며, 이산사건 시뮬레이션은 모델의 상태변화가 일어나는 경우

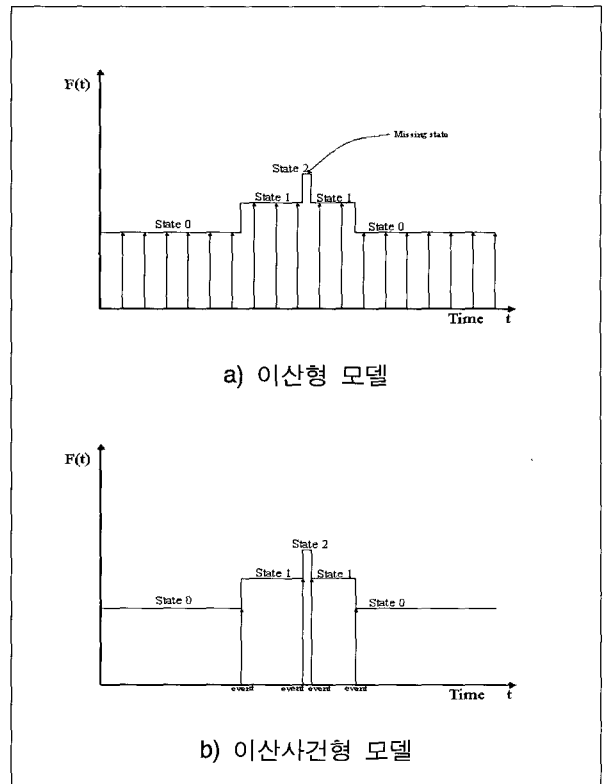


Fig. 4 이산형 모델의 시간관리

에만 시간을 진행시키는 방법이다(Fig. 4). 그러나 수학적 모델의 연속시간을 다루는 문제를 해결하는데는 부적합하다.

열차 시뮬레이션에 적용할 경우에는 열차의 도착·출발을 이벤트로 하고, 이러한 이벤트의 발화에 의한 상태천이로써 열차주행을 나타낸다. 이 모델에서는 열차 다이어와 같이 역간주행을 직선으로 근사하여 계산하므로 열차의 착발시간을 단시간에 계산할 수 있다. 이러한 장점 때문에 다이어 혼란시의 운행예측이나 계획다이어로의 복구제어(운전정리)와 같은 열차운영 및 열차다이어 작성 등과 같은 운행계획 작성에 이용될 수가 있다.

3. 철도시스템 모델

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 현실의 문제점을 파악하고 이에 대응하는 모델을 만들어야 한다. 따라서 열차주행상황을 시뮬레이션 하기 위해서는 물리적으로 존재하는 철도시스템 인프라 및 실시간으로 변

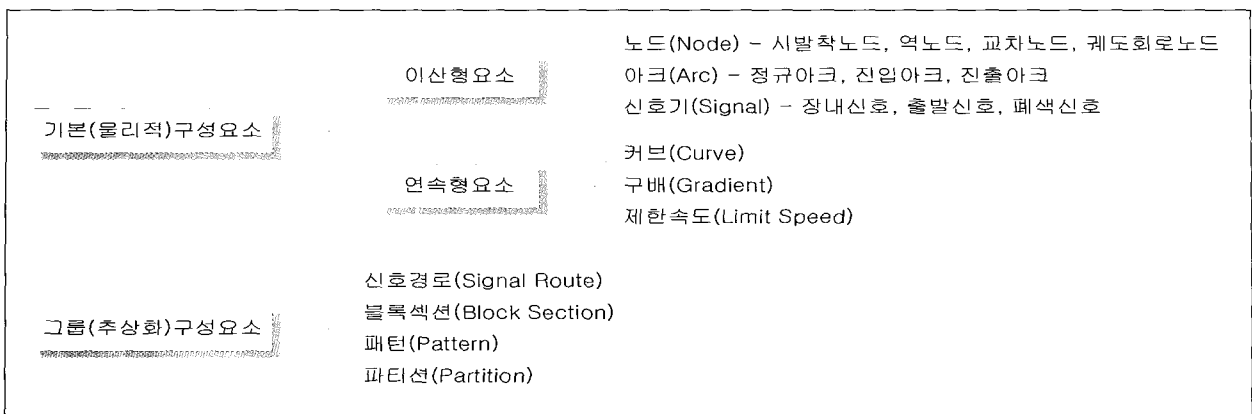


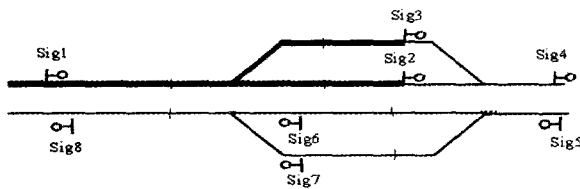
Fig. 5 인프라의 구성요소

하는 열차상황을 모델링하고 컴퓨터상에 구현해야만 하며, 모델링 방법에 따라 시뮬레이터의 성능이나 효율성은 달라지게 된다[5,6]. 본 절에서는 이를 고려한 철도시스템 모델을 제시하고자 한다.

3.1 인프라 모델

철도망 네트워크로 표현되는 인프라를 구성하는 주요자원으로는 선로, 역, 신호기, 터널, 교량 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 터널과 교량은 고려하지 않았다. Fig. 5에서는 인프라를 구성하는 기본요소에 대한 분류를 보여주고 있다.

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.



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

Fig. 6 신호시스템과 신호경로테이블

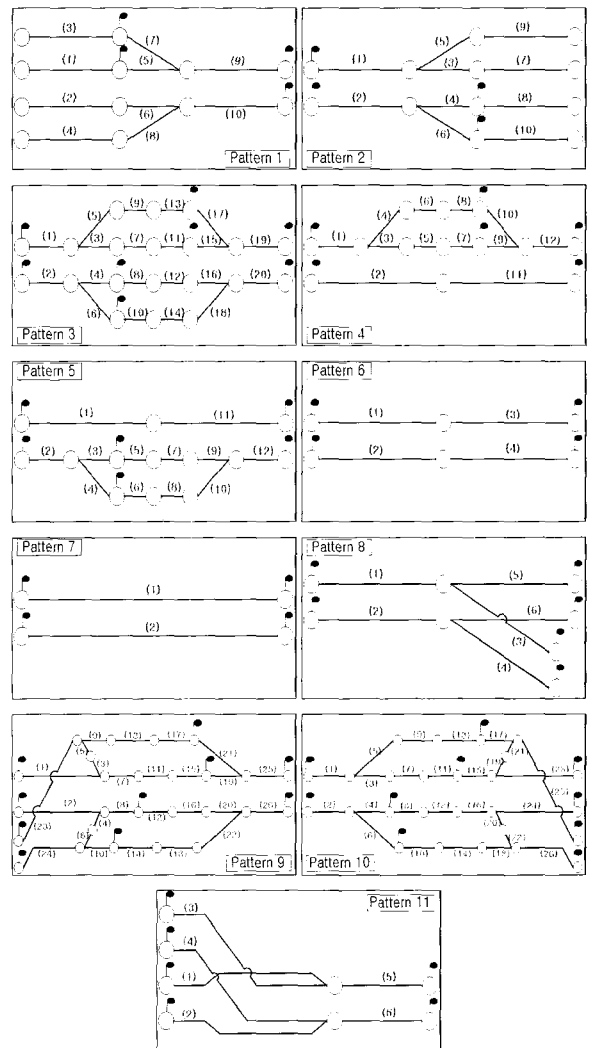


Fig. 7 기본적인 패턴의 예

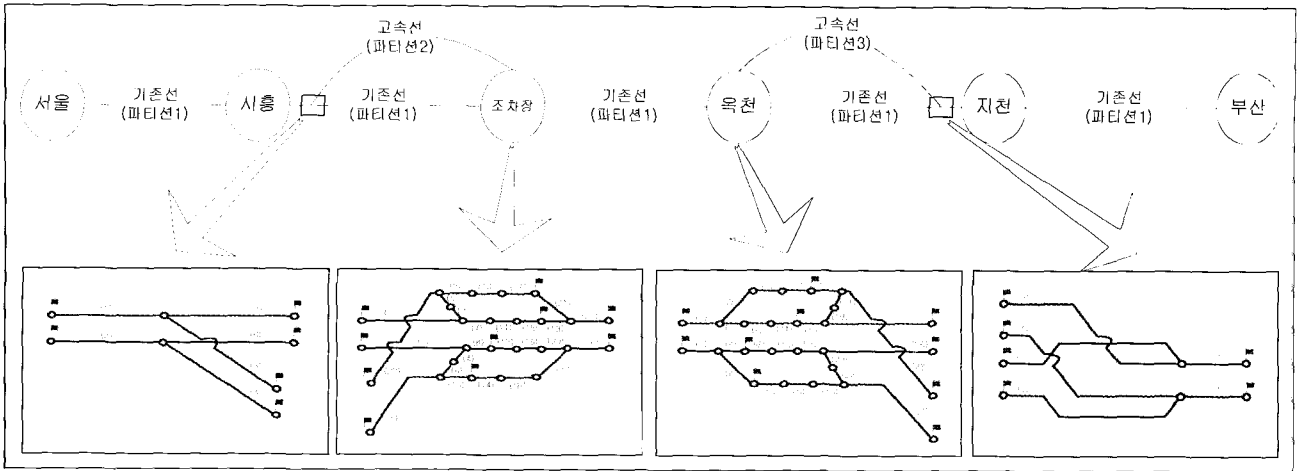


Fig. 8 분지/합류패턴과 파티션

추상화요소는 열차제어를 위하여 물리적요소를 개념상 묶은 것이다. 신호경로는 블록섹션들로 구성되어 있으며, 경합이 일어나는 다른 신호경로와의 관계를 정의하고 있다. Fig. 6에서는 신호경로테이블을 보여주고 있다. 블록섹션은 노드와 아크로 구성되며, 동시에 2대의 열차가 한 블록섹션에 존재할 수는 없다는 안전제약을 지켜야 한다. 패턴은 노드, 아크, 신호기, 블록섹션, 신호경로 정보를 포함하고 있으며, 선로를 구성하기 위한 입력최소단위로 하여 입력자료의 양을 최소화할 수 있을 것이다. Fig. 7에서는 기본적인 패턴의 예를 보여주고 있다.

파티션은 고속전용선과 같이 분지/합류구조가 존재하는 인프라 구성을 위해 필요한 개념이며, 각 파티션은 패턴들로 구성되어 있다. Fig. 8에서는 분지/합류패턴과 파티션을 이용한 인프라 구성사례를 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.

3.2 열차 및 시각표 모델

열차는 주어진 인프라 상에서 스케줄 및 열차주행 성능에 의해 운행하는 객체이며, 시뮬레이션 결과로 시간, 위치, 속도 정보와 지연/조착정보를 출력함으로써 사용자가 열차운용계획을 분석하고 평가할 수 있

게 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 운행해야하는 경로인 아크리스트를 가지고 있다.

3.3 다중열차주행 모델 (multi-Train Performance Simulation Model)

열차제원, 견인력곡선, 제동곡선(제동비) 등을 입력으로 시간에 따른 속도 및 위치를 구하는 부분으로서 열차운행 상태를 실제와 같이 묘사하는 부분이다. 주기능은 각 열차별로 현재시간의 상태를 바탕으로 Δt 시간후의 열차의 속도와 위치를 계산해내는 것이다. 이를 위해서 열차의 현재위치를 기준으로 전방에 대하여 진로를 확보하고, 확보된 구간에 대하여 신호기 상태, 정차패턴, 선로제한속도 등을 병합하여 최종제한속도를 산출한다. 이를 근거로 현재시간과 Δt 경과 시간 간의 주행모드를 결정한 후, 그에 따른 열차운동방정식을 이용하여 다음위치, 속도를 계산하게 된다. 전방구간의 신호기를 고려함으로써 선행열차의 간섭을 반영하는 다중열차주행성능을 계산할 수가 있다. Fig. 9에서는 다중열차주행 모델의 개념을 보여주고 있다.

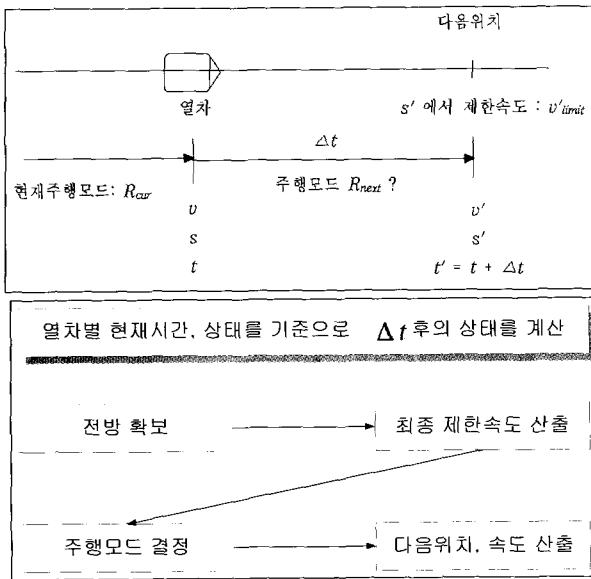


Fig. 9 다중열차주행모델의 개념

열차의 주행모드 결정을 위해서는 현재속도에서 목표속도까지 상용제동시 제동거리를 계산하여야 한다. 현재 제한속도구간의 속도와 시작위치를 각각 v_0, s_0 로, 목표속도와 위치를 각각 v_1, s_1 이라고 하였을 때, 상용제동에 따른 제동위치(B.P. ; brake position)의 계산은 다음 공식과 같다 ;

$$BP = s_1 - (v_0^2 - v_1^2) / (3.6 \cdot 2 \cdot \text{상용제동비})$$

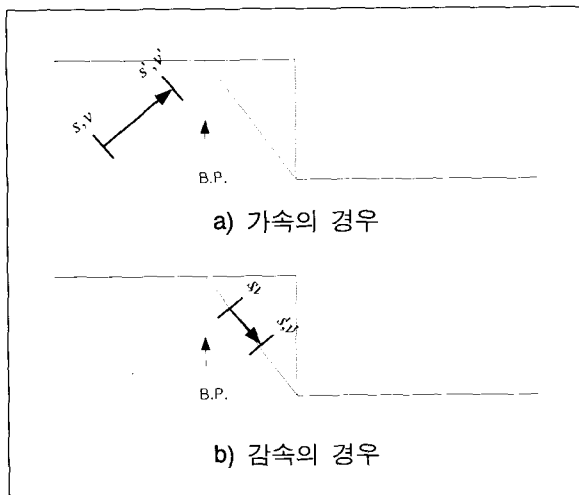


Fig. 10 주행모드결정의 예

BP가 계산되면, 전방제한속도 상황에 따른 주행모드

를 결정할 수가 있다. Fig. 10에서는 현재 열차위치가 타행구간이 아니면서 현재속도가 제한속도보다 낮고, 현 제한속도 블록이 다음 제한속도 블록보다 높을 경우의 주행모드결정 예를 보여주고 있다. 여기에서 s, v 는 각각 현재위치, 속도를, s', v' 는 다음위치, 속도를 나타내고 있다. 각 주행모드별 열차의 다음 속도, 위치를 계산하기 위한 공식은 다음과 같다.

- T : 견인력 (kg/ton)
- f : 견인력 곡선값 (kg)
- W : 열차중량 (ton)
- R_g : 구배저항 (kg/ton)
- R_c : 곡선저항 (kg/ton)
- R_s : 출발저항 (kg/ton)
- R_r : 주행저항 (kg/ton)
- X : 축중 (ton)
- N : 차축수
- A : 전면단면적 (m^2)
- v : 속도 (m/sec)
- Δt : 샘플링시간 (sec)
- s : 위치 (m)
- a : 가속도 ($km/h/sec$)
- v' : 다음속도 (m/sec)
- s' : 다음위치 (m)

견인력 : $T = \frac{f}{W}$, f : 견인력 곡선에 의한 값

구배저항 : $R_g = \frac{\text{높이}}{\text{밀변}} \times 1000$

곡선저항 : $R_c = \frac{700}{r}$, r : 곡선반경(m)

주행저항 :

$$R_r = \left[\left\{ 1.3 + \frac{29}{W} + 0.03v + \frac{0.00244}{XN} v^2 \right\} \times XN \quad : \text{기관차} \right. \\ \left. + \left\{ 1.5 + 0.012v + 0.0004v^2 \right\} \times (W - XN) \quad : \text{부수차} \right] \\ \div W$$

① 가속모드

가속도 : $a = (T - (R_g + R_c + R_s + R_r)) / 28.35$

차기속도 : $v' = v + a(\Delta t)$

차기위치 : $s' = s + v(\Delta t) + \frac{1}{2} a(\Delta t)^2$

② 등속모드 ($a=0$)

차기속도 : $v' = v$

차기위치 : $s' = s + v(\Delta t)$

③ 타행모드 ($T=0$)

가 속도 : $a = -(R_g + R_c + R_s + R_r) / 28.35$

차기속도 : $v' = v + a(\Delta t)$

차기위치 : $s' = s + v(\Delta t) + \frac{1}{2} a(\Delta t)^2$

④ 감속모드 ($a = -\text{상용제동비}$)

차기속도 : $v' = v + a(\Delta t)$

차기위치 : $s' = s + v(\Delta t) + \frac{1}{2} a(\Delta t)^2$

② 개발하고자 하는 시뮬레이션 프로그램 대상 문제의 성격 및 특징에 따라 목적과 구현기능에 적합한 시뮬레이션 모델을 선정해야만 한다. Fig. 11과 Fig. 12에서는 각각 연속형, 이산사건형 열차주행 시뮬레이션 모델의 개념을 보여주고 있다. 연속형 모델에서는 Δt 주기로 시간이 진행되면서 지정한 종료시간이 될 때까지 반복수행 된다. 매 반복마다 먼저 시간증가 구간사이에 발생한 사건을 찾아서 시스템정보를 업데이트해 주고, 다음 주기의 열차별 상태를 계산한다. 이산형 모델에서는 타이밍(timing)에서 다음에 가장 빨리 발생할 사건을 찾아서 처리해주고 시간을 그 시점으로 증가시킨 후 다른 열차의 정보를 증가된 시간만큼 업데이트 해 주는 구조를 갖게 된다.

4. 혼합 다중열차주행 시뮬레이터 개발 고려사항

본 절에서는 고속선을 고려한 혼합 다중열차주행 시뮬레이터를 개발함에 있어 누구나 한번쯤은 고려해야만 하는 사항들을 제시하고자 한다.

① 시뮬레이션 연구를 수행함에 있어 누구나 처음으로 접하는 문제는 개발도구의 선택문제이다. 이 경우 일반적으로 서로 상충하는 2가지, 즉 개발프로그램의 질과 개발의 용이성을 동시에 고려하여 선정하는 것이 중요하다. 다음 Table. 1은 기존 시뮬레이션 관련 연구들을 위한 개발도구 활용과 선정기준을 조사한 결과이다.

Table. 1 개발도구 활용과 선정기준

활용	선정기준	
시뮬레이션 언어	21	모델링 능력 66
시뮬레이션 패키지	16	사용/학습의 용이성 57
		커스터마이제이션 용이성 23
범용 프로그래밍 언어	1	가격 15
		공급자 지원 5
시뮬레이션 언어와 프로그래밍 언어	15	사용자 확대 3
시뮬레이션 언어와 패키지	14	기타 3
모든 소프트웨어	23	

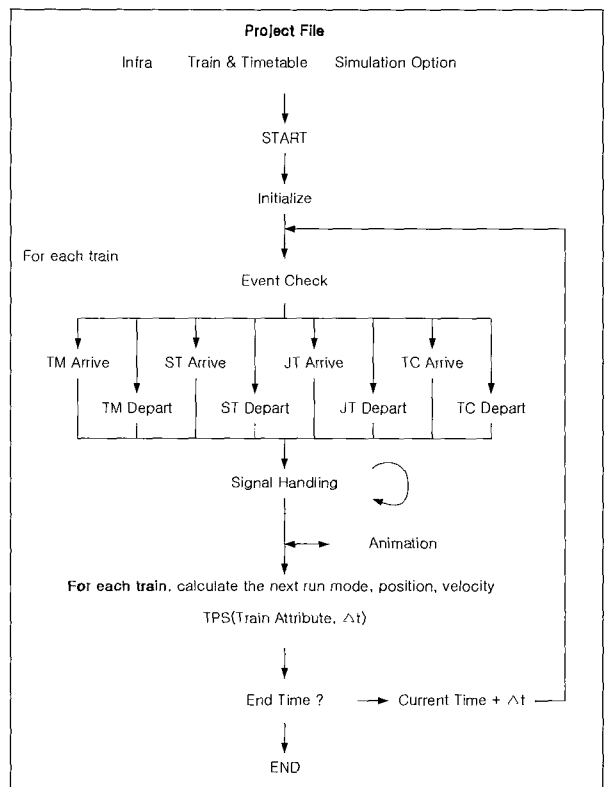


Fig. 8 연속형 모델 개념도

③ 인프라 및 열차와 같은 철도시스템 구성요소들은 최대한 객체화되어 모델링되어야 한다[7]. 또한 고속철도 도입으로 고속선/기존선 혼합구조를 반영하기 위한 유연한 인프라모델이 반영되어야 한다.

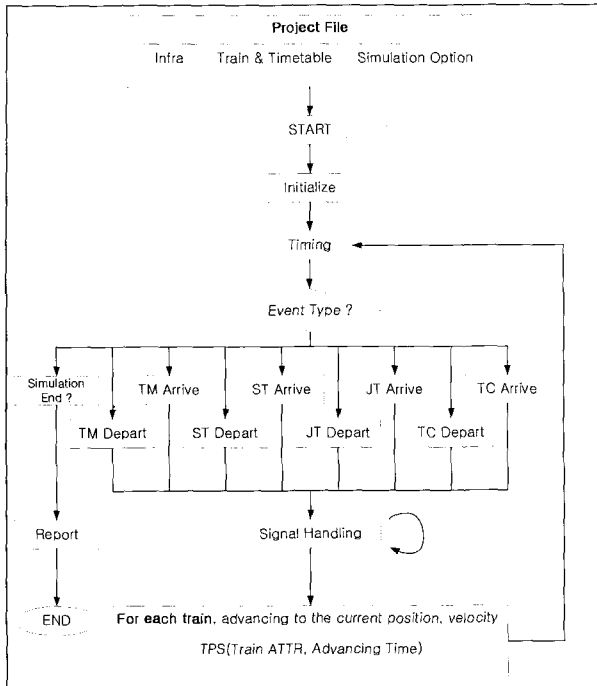


Fig. 9 이산사건형 모델의 개념도

- ④ 목적과 기능에 적절한 수준(정도)의 열차주행모델을 개발·반영할 필요가 있으며, 선·후행 열차간의 간섭으로 인한 영향 및 경합으로 인한 영향이 열차주행모델에 반영되어야만 한다. 이러한 열차간 간섭이나 경합은 신호기를 매개체로 하여 다른 열차에 영향을 미치게 되므로, ATS (automatic train stop), ATC(automatic train control), ATP(automatic train protection) 등과 같은 신호시스템 체계가 반영될 수 있어야 한다.
- ⑥ 혼합 다중열차주행 시뮬레이션의 경우 대규모 문제이기 때문에 대용량 입출력 데이터의 체계적인 데이터베이스화가 필요하며, 그래픽 인터페이스(graphic user interface) 환경적용으로 사용자편의를 최대한 도모하여야 한다[3]. 특히 대용량 자료 입력을 요하는 입력모듈의 독립성을 유지하면서 사용자 입력을 최소화시켜야 할 것이다.

5. 결론

21세기 철도수송은 교통수송수단의 중심역할을 수행하여야 하며, 낙후된 설비와 기술을 최대한 개선해

야만 하는 시급한 과제를 안고 있다. 특히 국내의 경우, 차량, 노반, 궤도 등과 같은 하드웨어 기술에 비교할 때 운영과 같은 소프트웨어적 기술은 미흡한 실정이다. 정보화시대를 맞이하여 효율적인 철도시스템 운영을 위해서는 컴퓨터 시스템이 필수적이며, 특히 열차운용 시뮬레이터는 열차운영계획의 수립 및 시설투자와 평가를 위하여 필수적인 도구라 할 수 있다. 고속철도의 도입과 더불어 그 필요성은 더욱 가중되고 있다.

본 연구에서는 고속철도 도입과 함께 혼합 다중열차주행 시뮬레이션 프로그램 개발을 위한 기본적인 시뮬레이션 모델 기술들을 검토하고, 인프라, 열차, 시각표 등과 같은 철도시스템 자원에 대한 모델링 및 열차주행모델을 제시하였다. 또한 고속선을 고려한 시뮬레이터 개발에 있어 고려사항에 관하여 검토하였다.

참 고 문 헌

1. Pegdon,C.D., R.E.Shannon and R.P.Sadowski(1995), Introduction to Simulation Using SIMAN, McGRAW-Hill
2. 김제영(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. 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