

다중 열차 운용시뮬레이션 알고리즘에 관한 연구

최규형, 구세완
한국철도기술연구원, 철도신호통신연구팀

The Study on the Algorithm of Multi-Train Operation Simulation

K.H.Choi, S.W.Gu

Korea Railroad Research Institute, Railway Signalling · Telecommunication Research Team

Abstract - This paper proposed train operation simulation algorithm, algorithm to determining operational mode and algorithm for train performance program, which play a important role in multi-train operation simulation. Using railway network modelling and signalling systems modelling already developed, these algorithms was presented.

1. 서 론

열차운용시뮬레이션은 철도 현장에서의 열차운용상황을 모델링하여 컴퓨터상에서 모의 운용함으로써, 열차운용계획 및 철도시설투자계획을 분석, 평가하는 지원도구를 제공하기 위한 것이다. 즉, 여러 가지 열차운용 시나리오에 대해, 실제 현장에서 발생할 수 있는 다수의 외란 조건을 가미하면서 현실성 있는 분석을 가능하게 함으로써, 신속하고 효율적인 열차운용계획 검토를 통하여 운영계획자의 균형있는 의사결정을 지원하는 것으로, 본 연구진은 철도운영계획 실무에 사용할 수 있는 열차운용시뮬레이션 프로그램을 개발하고 있다.

열차운용시뮬레이션 프로그램은 철도네트워크, 궤도 및 신호시설의 모델링과 차량주행 특성의 모델링, 그리고 다수의 열차가 상호 영향을 미치면서 신호시스템의 제어를 받으면서 주행하는 다중 열차주행특성 모델링을 통하여, 컴퓨터상에서 다수의 열차들의 주행특성을 실시간 시뮬레이션하는 기능을 수행한다. 이 중에서, 다중열차주행특성 모델링은 열차운영계획에 의해 주어진 다수의 열차운영 스케줄에 따라 철도네트워크상에서 열차가 주행하는 상황을 모델링하는 것으로써, 선행 열차의 주행상황에 따라 선로에 설치된 신호시스템이 동작하게 되고 이것이 다시 후속열차의 주행상황에 변화를 초래하게 되는 상황과, 열차들의 진로를 제어하는 과정에서 열차간에 경합이 발생하여 분기점에 서로 진입하려고 하는 상황에서 진로 제어를 수행하는 과정등을 모델링하여야 하기 때문에, 열차운영시뮬레이션의 핵심기능이라고 할 수 있다.

본 논문에서는, 자체적으로 개발한 철도네트워크 모델과 열차주행특성 모델을 근거로 해서, 열차운행 스케줄에 맞게 열차들을 주행시키는 기능과 열차들간의 상호작용에 의하여 신호시스템이 동작하는 기능 및 신호시스템의 제어기능에 의한 열차주행특성의 변화를 실시간으로 시뮬레이션하는 모델을 제안하였다. 또한 실시간 시뮬레이션에서는 일정 시격(샘플링 시간)을 두고 열차들의 주행특성을 계산하게 되므로, 열차들의 주행거리 및 속도 계산과 신호시스템에서 부여하는 폐색구간 구분에서 샘플링 시간 만큼의 오차가 발생하게 되므로 이를 보정하기 위한 주행모드 설정 알고리즘이 제안되었다.

2. 열차운용 알고리즘

2.1 열차운용 시뮬레이션

실제 열차는 주어진 스케줄, 진행할 진로, 기관차의

주행성능과 실시간 신호기의 제어에 의해 움직이므로 각 열차의 운용상황을 정확히 시뮬레이션하기 위해서는 각 열차마다의 스케줄과 진행할 진로, 그리고, 주행성능을 바탕으로 샘플링 시간마다의 열차의 주행모드를 정확히 결정하여 실제와 유사한 운전선도를 만들어야 한다.

우선, 스케줄을 고려하지 않은 열차 한 대의 운용을 위한 알고리즘, 열차성능과 열차주행모드에 대한 알고리즘을 제안하고, 이후 스케줄을 고려한 다중열차운용 알고리즘으로 확장하도록 하겠다.

열차운용을 모의하기 위해서는 모델링된 철도 네트워크[1]와 신호시스템 모델링[2]이 정의되어 있어야 하며, 이에 대한 모델링에 따라 열차운용 알고리즘이 다소 달라질 수 있다. 열차운용 시뮬레이션은 열차가 어느 폐색구간을 점유하고 있는지에 대한 정보를 추출함으로써 시작하며 이에 따른 신호기 제어, 열차 전방에 가능한 진로 확보, 열차 전방의 확보된 진로상의 주행 프로파일 작성, 열차주행식에 의한 열차의 속도, 위치, 시간 계산 등의 순서로 이루어진다. 본 논문에서는 철도네트워크와 신호시스템, 열차스케줄등에 대한 모델링은 이미 정의되어 있다고 가정하여 실제 열차운용에 대한 알고리즘만을 설명한다.

2.1.1 열차운용 시뮬레이션의 자료구조 및 함수

전체 철도망에 대한 폐색구간(신호기와 신호기사이의 구간)들에 대한 자료를 리스트 구조로 갖고서 각 열차의 위치를 검지할 때 활용하며, 열차속도를 제어하기 위한 신호기들 자료를 리스트 구조로 저장하고, 열차의 진행하기 위해 열차가 확보한 폐색구간별 진로를 저장하는 데이터, 열차성능 프로그램과 주행 알고리즘을 수행하는 함수등이 필요하다. 이해를 돕기위해 다음과 같이 표현식을 사용하겠다.

- $SR_k (k=1, \dots, K)$: 철도망 전체의 폐색구간 리스트
- $ForwardRouteList(Tr_t)$: 시간 t에서 전방의 확보된 진로 데이터 리스트
- $Detect(Tr_t, SR_k)$: 시간 t에서 $SR_k (k=1, \dots, K)$ 로 부터 열차의 위치를 검지하고 전방 확보 가능성이 있는 진로를 리턴하는 함수
- $MakeAWay(\dots)$: 시간 t에서 전방의 확보가능성이 있는 진로 리스트를 입력받아 진로를 확보하고 이를 리턴하는 함수
- SPP_{Tr_t} : 시간 t에서 열차의 제한속도 프로파일
- $MakeSpeedProfile(ForwardRouteList(Tr_t))$: 열차 전방에 확보된 진로 리스트를 입력받아 열차의 제한속도프로파일을 생성하는 함수
- $TPS(Tr_t, SPP_{Tr_t})$: 열차 성능 프로그램 (Train Performance Program)

2.1.2 열차운용 시뮬레이션 알고리즘

앞의 절에서 정의된 변수와 함수에 의해 열차운용 시

물레이션을 수행하기 위한 알고리즘을 정리하면 다음과 같으며, 이는 현재시간 t 를 기준으로 단위 시간 Δt 동안에 일어나는 시물레이션 순서이다.

1. $Detect(Tr_i, SR_k)$: 전체 폐색구간에서 열차의 위치를 검지한다.
2. $ForwardRouteList(Tr_i) = MakeAWay(Detect(Tr_i, SR_k))$: 열차의 전방 진로를 확보하고 이를 리턴
3. $SPP_{Tr_i} = MakeSpeedProfile(ForwardRouteList(Tr_i))$: 열차의 확보된 진로에서 제한속도 프로파일 작성
4. $TPS(Tr_i, SPP_{Tr_i})$: 열차성능 프로그램 수행하여 $t + \Delta t$ 시간의 열차의 가속도, 속도, 거리 갱신

위의 알고리즘은 열차 한 대의 운용을 시물레이션하기 위한 알고리즘이며, 이를 다중열차로 확장하는 경우는 더욱 많은 자료구조와 고려할 요소와 외란들을 내재하고 있으므로 충분한 분석/설계와 실제 테스트 프로그램을 통한 피드백 과정을 거쳐서 신뢰성있는 알고리즘을 구현해야 한다. 2.2절은 이러한 과정을 거쳐서 제안하는 알고리즘에 대한 설명이다.

2.1.3 열차의 제한속도 프로파일

열차가 진행하기 위해 필요한 데이터는 확보된 진로와 열차성능 프로그램, 그리고 확보된 진로상에 열차가 지켜야 할 제한속도 프로파일이다. 열차운용 알고리즘에서 $MakeSpeedProfile(ForwardRouteList(Tr_i))$ 이 하는 역할은 입력으로 열차의 확보된 전방 몇 폐색 진로, 이미 저장된 선로데이터(곡석, 구배, 터널, 교각등), 열차 자체의 제한속도, 신호기에 의한 제한속도등을 모두 만족하는 제한속도 프로파일을 실시간으로 갱신하는 것으로서, 시물레이션 열차가 실제 운행하는 열차를 정확히 묘사하기 위해 꼭 필요한 것이다. 이 방법은 열차 주행시 속도를 제어하는 복잡한 요소들을 한가지 데이터 형태로 저장하여 다중열차운용 알고리즘 구현시 간단, 명료하게 처리하여 효율을 향상시킬 수 있다.

2.1.4 열차성능 프로그램

본래 열차성능 프로그램은 역간의 운전시분, 에너지 효율등을 계산하기 위해 많이 사용되는 프로그램이나, 열차 운행스케줄과 전체 철도 선로를 고려하며, 수백대의 열차를 대상으로 하는 다중열차 운용시물레이션의 목적에는 부합되지 않는다는 점에서 약간의 개선과 수정이 필요하다. 열차제한 속도 프로파일에 의한 열차제어와 각 역간의 운행 스케줄등을 고려해야 한다는 점에서, 단순히 열차제원과 선로 데이터의 입력에 의한 열차의 속도, 위치를 계산해서는 실제 다중열차를 시물레이션 할 때 많은 오차가 발생하며, 외란등의 예상치 못한 상황에 대처할 수 없다. 따라서, 열차의 주행모드를 더욱 세분화하여 실제 운전과 비슷하게 모의하는 것이 중요하다. 다음은 열차성능 프로그램인 TPS(...)의 알고리즘으로써 단순한 속도, 가속도, 거리를 계산하는 것 이외에 열차의 위치에 따른 주행모드의 결정을 위한 여러 가지 기능들이 추가되었다.

1. 전방의 제한속도 프로파일 검색
2. 전방의 제한속도 프로파일에 따른 주행모드 결정
3. 스케줄에 정차역이 있는지 체크하여 주행모드 재설정
4. 타행구간인지 체크하여 주행모드 재설정
5. 열차의가속도, 속도, 위치 계산
6. 현재 폐색구간의 제한속도를 초과하는지 체크
 - 6.1 주행모드에 따라 현재 제한속도를 초과하는지

체크

- 6.2 주행모드 재설정
- 6.3 열차의 가속도, 속도 재계산
7. 열차의 다음 위치 계산

위의 TPS 알고리즘에서 보듯이 열차주행모드 설정은 한가지 요소에 의해 결정되는 것이 아니라, 스케줄과 제한속도 프로파일에 의해 여러 번의 반복에 의해 결정된다. 다음은 주행모드 결정을 위한 알고리즘이다.

1. 제한속도 프로파일로부터 전방에 현재보다 낮은 제한속도가 존재하는지 체크
 - 1.1 없으면, 현재구간의 제한속도만 고려하여 주행모드 판별
 - 1.2 있으면,
 - 1.2.1 타행모드를 위한 파라미터 설정 즉 어디서부터 타행을 하며 어디서부터 감속을 해야하는지 판별
 - 1.2.2 현재속도, 전방의 제한속도와 거리에 의해 가속도 계산
 - 1.2.3 감속도 지점과 현재 위치를 고려하여 주행모드 결정
2. 이전 주행모드를 참고하여 주행모드 결정

주행모드에는 모두 6가지가 있으며, 차례로 나열하면 가속, 전방의 제한속도에 맞추어 가속, 등속, 타행, 전방의 제한속도에 맞추어 감속, 감속 등이다. 이중 감속은 상용 제동비에 의한 감속이며, 가속은 TPS에 의해 계산된 가속도와 현재 속도와 제한속도를 고려한 합수로 표현되며, 전방의 제한속도에 맞추어 가속/감속은 실제 열차 운전자의 특성을 고려하기 위한 모드이다. 타행은 전후의 주행모드와 선로상태 제한속도 프로파일등에 의해 복잡하게 결정되는 것으로 열차의 운전선도를 실제와 유사하게 하기 위한 중요한 주행모드이며, 운전자의 운전 습관을 실제에 반영하기 위한 방법이다. 그림 1은 기존 TPS에 의한 운전선도와 본 논문에서 제안하는 방법에 의한 운전선도를 비교한 그림으로 제한속도 프로파일에서 열차가 주행모드를 설정한 후 열차 성능 프로그램에 의해 주행한 운전선도를 간략히 표현한 그림이다. 그림 1.(b)가 (a)보다 실제 가속과 감속에 있어 운전자의 특성을 더욱 잘 묘사하고 있다는 것을 알 수 있으며, 따라서 역간운전시분 또한 실제와 가깝다.

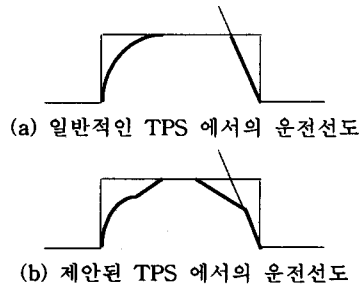


그림 1. TPS 운전선도 비교

2.2 다중 열차운용 알고리즘

다중 열차운용 시물레이션을 위해 더욱 고려할 사항은 각 열차 스케줄이고, 열차들간의 간섭의 결과가 신호기에 의해 표현되며, 이에 의해 각 열차가 제어되고 따라서 전방의 제한속도 프로파일이 연속적으로 변한다는 것이다. 또한 각 샘플링 시간 동안에 열차의 주행모드를 정확히 검지해서 적절한 주행모드를 설정하는 것이 열차의 실제 운행 상황과 유사하게 시물레이션 하는데 핵심

이라 할 수 있다.

2.2.1 열차운용 시뮬레이션의 자료구조 및 함수

다음은 정의된 주요 변수와 함수에 대한 설명이다.

- TrainQue : 현재 철도망상에서 운용중인 열차들의 집합이며, 전산학의 자료구조 큐(Queue)와는 약간 다른 자료구조를 갖는다.
- TrainOperationQue : 시발역에서 출발하지 않은 열차와 역에 정차중인 열차를 제외한 실제 운행중인 열차들의 집합
- TrainWaitQue : 시발역에서 출발하지 않은 열차와 역에 정차중인 열차들의 집합
- UpdateTrainQue(...) : 시뮬레이션의 대상인 모든 열차들 중에서 열차 스케줄상의 시발역에서 시발시간이 된 열차들의 집합을 생성하는 함수, 즉 TrainQue를 갱신하는 함수
- UpdateTrainOperationQue(...) : TrainOperationQue와 TrainWaitQue를 갱신
- CheckInStation(...) : 열차가 구내에 진입하는 지를 검색하는 함수로서 정차역인 경우와 통과역인 경우를 모두고려한다.

2.2.2 다중 열차운용 시뮬레이션 알고리즘

다중 열차운용 시뮬레이션은 복잡한 철도 시스템 전체에 대한 데이터를 참조로 하여 이루어지므로 세부적으로는 매우 복잡한 과정을 수행한다. 따라서 데이터들의 입출력등의 흐름을 설명하기는 불가능하므로, 다중 열차운용 시뮬레이션 알고리즘을 기능별, 수행순서별로 설명하겠다.

1. _OutputTMS(...) : TrainQue 의 위치, 속도등 출력데이터를 변수에 저장
2. UpdateTrainQue(...) : TrainQue 갱신
3. InitializeSignal(...) : 신호기 초기화
4. UpdateSignalQue(...) : 열차의 위치에 따른 신호기의 상태 갱신
5. InitializeSignalRteQue(...) : 모든 폐색구간에 대한 상태 초기화 :
6. InitializeForwardRteQue(...) : 각 열차의 전방진로 초기화
7. DetectTrainPos(...) : 각 열차의 위치 감지
8. Make_A_Way(...) : 각 열차의 전방의 진로설정
9. Mimic Diagram에 현시
10. UpdateOperatingQue(...) : 실제 운행 열차들에 의해 TrainOperationQue와 TrainWaitQue 갱신
11. MakeSpeedProgile(...) : 운행중인 각 열차의 확보된 진로에 대한 전방의 제한속도 프로파일 작성
13. TPS(...) : TrainOperationQue에 대해 열차의 성능 프로그램을 수행하여 Δt 후의 열차의 속도와 위치 갱신
14. CheckInStation(...) : 각 열차가 정차할 역에 도착하였는지 감지
15. ControlTrainWaitQue(...) : 정지열차에 의해 점유된 전방루트 및 신호기 해제
16. 시뮬레이션 종료시간(T)와 현재 시간(t)를 비교하여 1~15번을 반복적으로 수행

위 알고리즘에서 중요한 부분은 시뮬레이션 대상 열차들의 출발, 도착역들을 실시간으로 검색하여 TrainQue, TrainOperationQue, TrainWaitQue 등을 갱신하는 부분과 각 열차별 진로를 확보하고 제한속도 프로파일을 작성하여 주행모드를 결정하는 부분이다.

3. 결 론

다중 열차운용 시뮬레이션은 철도시스템 전체에 대한

시뮬레이션이며, 이는 열차운용 알고리즘에 의해서 뿐만 아니라, 철도 네트워크 모델과 신호시스템 및 각 열차의 진로에 대한 모델링등을 토대로 구현되어야 한다. 본 논문에서는 현재 개발중인 열차운용 시뮬레이션 프로그램 개발중에서 가장 핵심적인 다중 열차운용 시뮬레이션을 수행하기 위한 열차 주행모드 설정, 열차 성능 프로그램, 전체 다중 열차운용 알고리즘들을 제안하였다.

열차 제한속도 프로파일을 작성하는 부분과 열차 주행모드를 결정하는 것은 열차들간의 상호간섭을 고려하는 다중 열차운용 시뮬레이션의 성능을 좌우하는 요소로서, 이에 대한 연구는 지속적으로 수행되어야 하며, 실시간으로 몇 백대의 열차를 전체 철도 노선에 대해 더욱 빠르게 시뮬레이션하기 위해서는 효율적인 알고리즘과 자료구조에 대한 전산학적인 고찰이 이루어져야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 최규형, 구세완, 객체지향기법에 의한 철도선로 및 열차운행 모델링, '98 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.393-395, July, 1998
- [2] 최규형, 구세완, 열차운용 시뮬레이션을 위한 신호시스템 모델링, '98 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.202-209, Nov., 1998
- [3] Allan, J, "Developments in multi-train simulation by Lodon Underground Limited and Honkong Mass Transit Railway Corporation", Computers in Railway Management, 1992. pp.425-
- [4] Asuka, M, "A simulation method for rail traffic using microscopic and macroscopic models", Computers in Railway : Railway Technology and Environment, 1996. pp.287-
- [5] Abe, K(安部 恵介), "最長徑路法を用いた列車運行シミュレーション", 情報處理學會論文誌, Vol.27, No.1, 1986, pp103-111
- [6] Hirao, Y(平尾裕司), "列車制御シミュレーション", 鐵道と電氣技術, 1996.6