

시뮬레이션을 활용한 열차 스케줄 작성에 관한 연구: OpenTrack을 중심으로

Developing the Train Schedule by Micro Simulation Method: Focused on the OpenTrack

이상호*, 박범환†

Sang-Ho Lee*, Bum Hwan Park*†

Abstract Various methods have been tried and implemented to develop an efficient train schedule. They include the timetabling methods based on optimization model or simulation model as well as the heuristics from expert experience. In case of urban railway, most timetables have been developed by means of their own process from the experiences, but nowadays they sometimes suffer from the difficulties in making up a new timetable by their own process when there occur a serious change in their operation environment like the modification of headway, running time, or introduction of new stations, etc. In our study, we present how the simulation software OpenTrack is used to develop a timetable. Especially, we describe in detail the way of implementing the real instance into OpenTrack and developing a new timetable under new operating environment as well as calculating headway and running time.

Keywords : Train Schedule, Simulation, OpenTrack

초 록 효율적인 열차 스케줄 작성을 위해, 경험적인 방법론부터 최적화 모형을 활용한 수학적 방법론, 시뮬레이션을 활용한 방법 등 다양한 방법론이 모색되고 있다. 도시 철도의 경우, 대부분의 스케줄은 현장 담당자의 노하우에 의해 작성되고 있지만, 시설물의 변경에 따른 운전 시분 및 시격의 변경, 급행이나 셔틀과 같은 새로운 운행 패턴의 도입 시에는, 경험적인 방법론만으로 효율적인 열차 스케줄을 작성하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 OpenTrack이라는 열차 운행 시뮬레이터를 활용하여 열차 스케줄을 어떻게 효과적으로 작성할 수 있는지를 살펴본다. 특히 9호선을 대상으로 OpenTrack에서의 네트워크 구성 방법, 파라미터 설정, 운전 시분 계산 방법 등에 대해 알아보며, 운행 패턴의 변경 사항을 반영하기 위한 새로운 스케줄 작성을 위한 시뮬레이션 적용 방안을 제시하고자 한다.

주요어 : 열차스케줄, 시뮬레이션, OpenTrack

1. 서론

최근 열차 스케줄 작성에 관한 효율적인 해법 혹은 작성 프로세스에 관한 관심이 커지고 있다. 고속 열차의 경우 SRT와의 선로 배분을 위한 스케줄 작성 [1, 2], 도시철도 분야에서의 급행화 및 셔틀과 같은 다양한 운행 패턴 구성[3,4,5,6], 공항철도에서처럼 혼용 운행

* 한국교통대학교 철도·경영물류학과 석사과정 (서울9호선운영㈜)

† 교신저자: 한국교통대학교 철도경영·물류학과(beomi72@hanmail.net)

시 효율적인 운행 스케줄 작성[7] 등 최적화 방법론, 시뮬레이션, 경험적 기법을 비롯한 다양한 해법이 제시되고 있다.

일반적으로 열차 스케줄 작성에 가장 큰 영향을 주는 두 가지 기술적 요소는 운전 시분(running time)과 열차간 최소 시격(minimum headway)인데, 이 두 가지 요소는 철도 인프라(주로 궤도와 신호 시스템) 및 차량 성능에 의해 결정된다. 유럽의 경우, 역과 역간 궤도 중심의 총체적인(aggregated) 네트워크 상에서, 전체 여정시간의 최소화과 같은 네트워크 차원의 최적화된 열차 스케줄을 찾기 위한 거시적(macroscopic) 최적화와, 구체적인 인프라 조건에 의해 도출되는 운전 시분이나 최소 시격과 같은 기술적 요소를 고려하여 열차 스케줄의 세부적인 가능성(feasibility), 경합 확인을 위한 시설의 점유시간(occupation) 계산, 스케줄의 안정성(stability) 등을 위한 미시적인(microscopic) 시뮬레이션을 유기적으로 결합하고 있다[8].

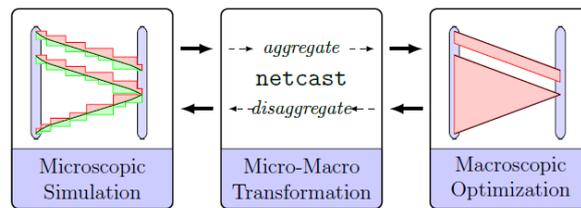


Fig. 1 Micro-Macro Framework for timetabling [8]

최근에는 보다 잘 정의된 열차 스케줄 개발 프로세스를 정의하고, 미시적, 거시적 시뮬레이션을 효과적으로 결합하기 위한 ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management and across Europe) 프로젝트의 경우, Fig. 1의 두 가지 과정의 결합에서 더 나아가 Fig. 2와 같은 세 가지 층위의 효율적인 결합 프로세스를 제시하고 있다[9]. 여기서 Fine-Tuning Module은 주로 에너지 소비 최소화를 위한 모듈로서, 네트워크의 세부화 정도는 미시적 시뮬레이션과 동일하다.

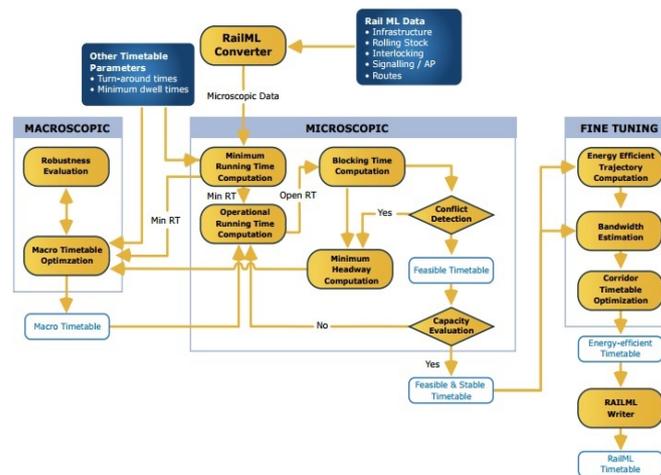


Fig. 2 Three-level framework for performance-based timetabling [9]

위 체계에서 보듯이 미시적 시뮬레이션은 최적화 모형 혹은 수작업에 의해 개발된 열차 스케줄의 가능성을 사전에 검토할 뿐만 아니라, 에너지 소비, 효율적인 운전 곡선 도출, 안전성 평가 등에 있어 핵심 수단이라 할 수 있다.

한국의 경우, 열차 스케줄의 주요 입력 요소인 역간 운전 시분 도출을 위한 열차성능시뮬레이션(Train Performance Simulation: TPS)을 제외하면, 열차간의 간섭, 대피, 시설의 점유 시간, 시설의 변화에 따른 열차들의 움직임을 모두 확인해볼 수 있는 OpenTrack이나 Railsys와 같은 미시적 시뮬레이션은 [6,7]의 연구를 제외하고는 현실에서 거의 활용되고 있지 않다. 다음 그림은 차량, 인프라(궤도 및 신호), 스케줄과 OpenTrack의 주요 입력자료와 출력 자료를 나타낸 것인데, TPS에서 제공하는 운전선도 외에도 스케줄 작성, 시설 점유 시간 등 다양한 기능을 가지고 있다[10]. Railsys 또한 이와 대동소이한 기능을 가지고 있다.

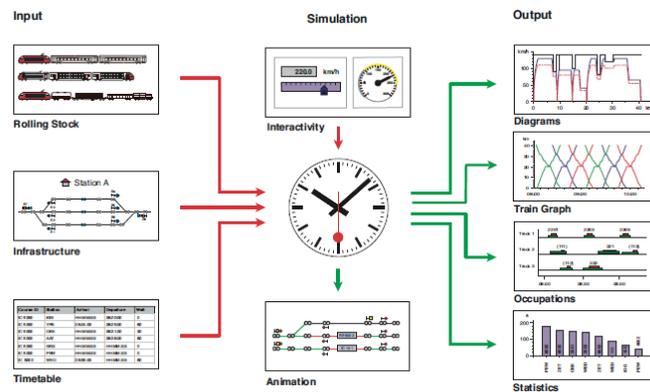


Fig. 3 OpenTrack : Input and Output [10]

미시적 시뮬레이션은 UIC 406 leaflet[11]에서 제안한 시뮬레이션에 기초한 선로 용량 산정에 있어서도 핵심적인 기능을 수행한다[12,13]. 용량 산정을 위해서는 폐색의 점유시간을 나타내는 Blocking time들이 겹치지 않으면서 최대한 조밀하게 구성되도록 열차 스케줄을 압축해야 하며, 이를 이용하여 열차간 최소 시격을 도출하게 된다. Railsys의 경우, 이와 같은 스케줄의 압축 방법(compression method)을 포함하고 있어, OpenTrack에 비해 선로 용량 산정에 보다 효과적이라 할 수 있다. 그러나 이러한 선로 용량 계산 또한 기존의 해석적 방식(예를 들어 UIC 405 방식)과는 달리, 용량을 최대화하는 열차 스케줄 작성이라는 문제로 바라볼 수 있다는 측면에서, 선로 용량 계산 또한 스케줄 작성과 다름 없으며, 미시적 시뮬레이션은 이를 위한 핵심적 도구라 할 수 있다.

본 연구는 OpenTrack 시뮬레이션 툴을 이용한 열차 스케줄의 효율적 작성에 관한 연구로, 특히 시설의 변화나 운영 조건의 변화에 따라 시뮬레이션을 어떻게 활용하여 스케줄을 작성할 수 있는지를 보여주고자 한다. 이를 위해 2장에서는 서울 9호선 인프라를 이용하여, OpenTrack의 입력, 파라미터 설정, 시뮬레이션 방법 등에 대해 기술하고, 이를 활용한 스케줄 작성 절차 및 새로운 열차 스케줄을 분석할 것이다.

2. 시뮬레이션을 활용한 스케줄 작성

2.1 OpenTrack 입력 데이터 구조

OpenTrack의 주요 입력 요소는 시설 정보(궤도 및 신호), 차량 정보, 스케줄 정보로 대별될 수 있다. 먼저 시설정보의 경우, 확장자가 .opentrack 인 메인 화면에서 직접 네트워크를 그리는 방식으로 입력한다. 궤도의 속성이 바뀌거나 신호기가 있는 시점을 vertex로, vertex사이를 edge로 연결한다. Edge의 주요 속성은 길이, 곡선반경(radius)과 구배(gradient), 최고속도 등이다.

이렇게 구성된 edge를 따라 열차가 다니는 경로는 route - path - itinerary 3가지 층위로 단계적으로 구성된다. 먼저 route란 열차가 진로 설정의 최소단위이며 일반적으로 두 개의 신호기 혹은 하나의 폐색이 된다. 이러한 route가 여러 개 모여 하나의 path가 되며, 네트워크에서 열차의 최종적인 전체 진로는 itinerary가 된다. 어떤 열차가 출발역부터 도착역까지 대안 경로를 가질 경우, 이는 우선순위가 포함된 여러 개의 itinerary로 설정된다. 이러한 itinerary는 별도의 데이터베이스(.dest)로 보관된다.

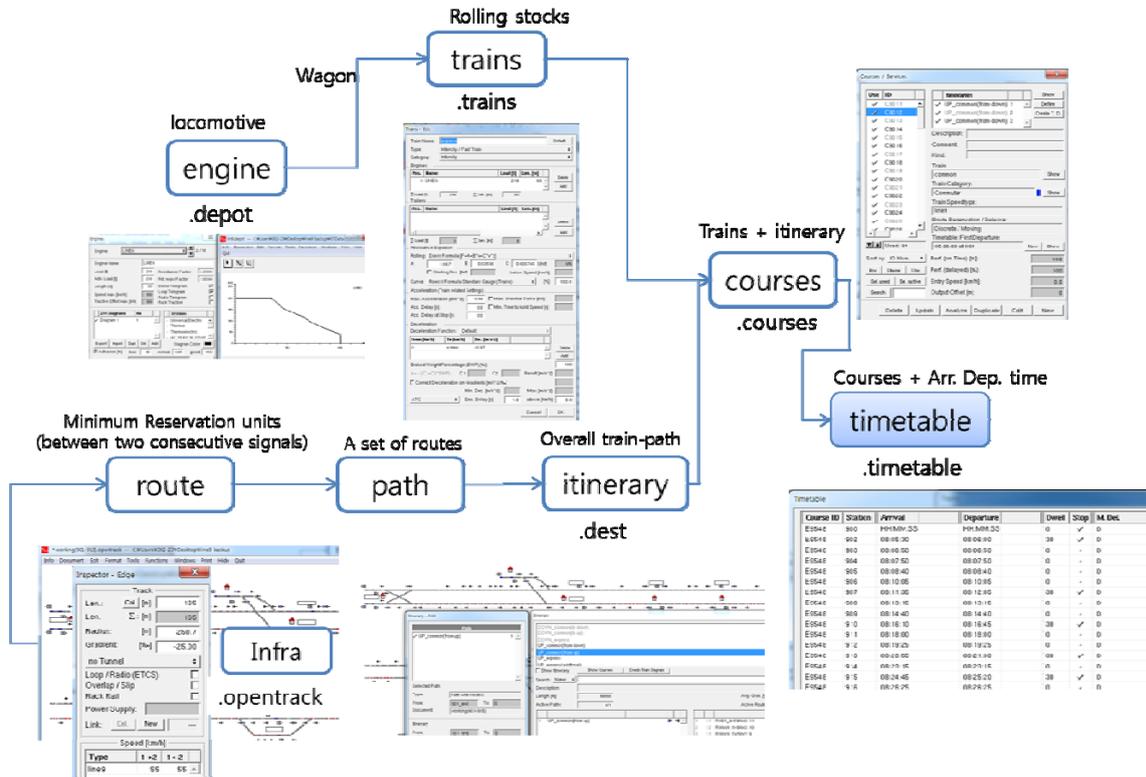


Fig. 4 OpenTrack Input Data Structure

차량의 경우 동력을 가지고 있는 engine과 객차까지 포함한 차량 정보는 .train 데이터베이스에 저장되며 차량 정보와 열차의 전체 진로를 나타내는 itinerary를 개별적인 이름(열차번호)으로 저장하면 course가 되고, 각 course에 역별 출도착시간을 할당하면 timetable이 구성된다. 이 시간표는 .timetable 데이터 베이스에 저장된다.

2.2 서울9호선 사례

현실에 존재하는 철도 시스템을 미시적 시뮬레이션에 입력할 때, 궤도 및 차량 정보는 매우 간단하다. 이에 반해 신호 시스템의 경우, 기존에 활용되고 있는 Railsys나 OpenTrack이 유럽에서 개발되어 그 시스템이 기본적으로 내장하고 있는 신호 방식이 한국에서 사용하고 있는 신호 방식과 서로 다른 경우가 많아 신호 시스템을 입력할 때에는 많은 주의가 요구된다.

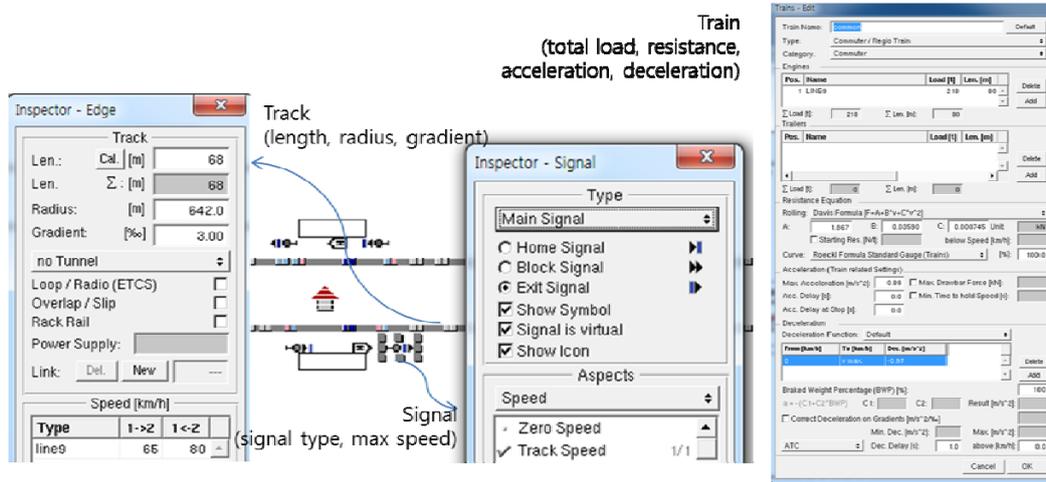


Fig. 5 signal plan and the corresponding OpenTrack parameters

서울 9호선의 신호 방식은 지상 신호는 모두 배제되고 디지털 궤도회로로 구성된 폐색 (block)에 기초하여, 궤도 회로로부터 연속적으로 수신되는 선행 열차가 속한 폐색의 위치 정보에 따라, 차량 성능을 고려한 가·감속 운전을 수행하는 distance-to-go 방식의 ATC 시스템이다. 먼저 지상신호가 없는 폐색을 표현하기 위해 OpenTrack의 가상의 폐색 신호기 (virtual block signal)를 설정하고, 역의 경우 역내 구간으로 진입하는 마지막 폐색에 장내 신호기(virtual home signal), 역내 구간을 벗어나는 첫 번째 폐색에 가상의 출발 신호기(virtual exit signal)을 설정한다. 차량 정보에서는 Davis Formula 형태의 주행 저항식 (rolling resistance)을, 선행 열차와 간격 제어를 위한 감속(deceleration) 기능에서 ATC 기능을 설정하면 된다.

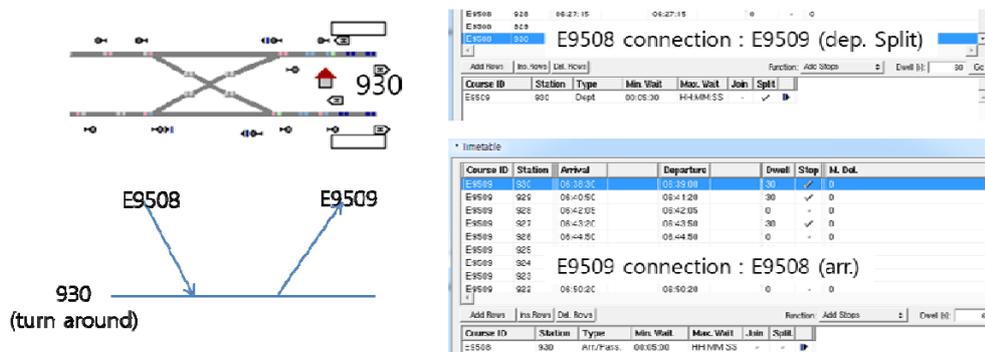


Fig. 6 routing plan and OpenTrack set-up

도시철도 네트워크의 시뮬레이션 구현에 있어 또 다른 어려운 점은 일반 철도 스케줄링과 달리 차량 운용 계획을 동시에 작성한다는 점이다. 즉 회차(turn-around)에 의해 새로운 열차번호를 부여 받는 경우, 연결되는 열차끼리 ‘connection’ 을 설정함으로써, 차량 운용을 입력할 수 있다. Fig.6에서 보듯이 E9508열차와 E9509열차가 동일한 차량에 의해 운행될 경우, 각 열차 별로 930역에서의 connection 열차를 그림과 같이 설정하면 된다.

2.3 시뮬레이션을 활용한 열차 스케줄 작성

2.3.1 TPS 비교

앞에서 서술한 방식으로 개화역부터 종합운동장역까지 총 30개 역으로 구성된 9호선 구간을 OpenTrack 네트워크를 구성하였다. 시뮬레이션이 정상적으로 작동하는지를 확인하기 위해 9호선에서 참조하는 운전시분과 OpenTrack으로부터 도출한 운전시분을 비교해 보았다.

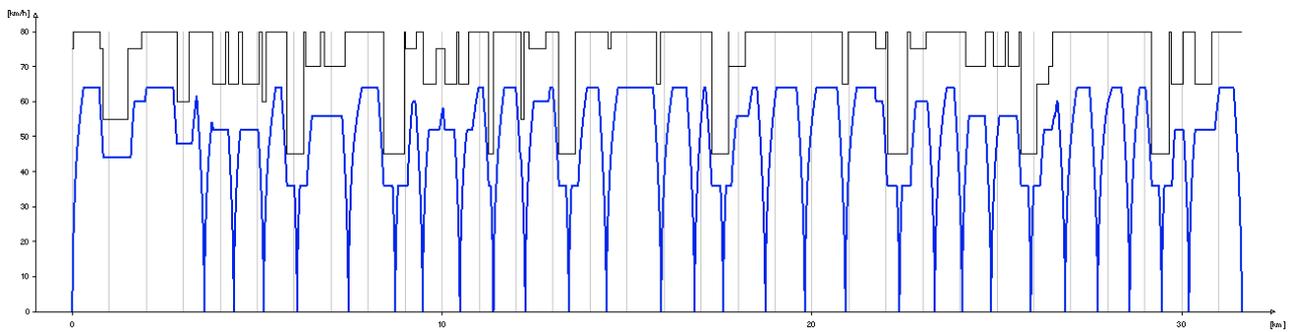


Fig. 7 TPS result of line9 commuter train in OpenTrack

일반열차 상선		정차시간(초)	기존자료(초)			Opentrack(초)	차이 (Tight-Opentrack)	
출발역	도착역		Tight Running	Intermediate Running	Loose Running			
901	개화	902 김포공항	30	277.0	291.1	304.9	294	-17.0
902	김포공항	903 공항시장	30	87.4	91.2	95.8	85	2.4
903	공항시장	904 신방화	25	79.7	85.3	90.8	87	-7.3
904	신방화	905 마곡나루	30	96.5	101.5	105.8	98	-1.5
905	마곡나루	906 양전향교	25	121.5	132.3	146.6	135	-13.5

Fig. 8 Comparison with existing data (commuter train)

급행열차 상선		정차시간(s)	기존자료(초)			Opentrack	차이 (Tight-Opentrack)	
출발역	도착역		Tight Running	Intermediate Running	Loose Running			
902	김포공항	903 가양	30	323.0	357.0	406.9	352	-29.0
907	가양	908 열차	30	197.0	207.0	220.7	207	-10
910	열차	911 당산	30	203.4	224.9	253.1	216	-12.6
913	당산	914 여의도	30	162.3	178.8	208.4	173	-10.7

Fig. 9 Comparison with existing data (express train)

OpenTrack에서는 시뮬레이션 실행 시 주어진 제한 속도 내에서 차량의 최대성능으로 가 · 감속을 하여 운행 하기 때문에 타력운행으로 인한 에너지의 효율화, 승객의 승차감 등을 고려하지 않는다. 따라서 운영사에서 활용하는 기존 시뮬레이션 자료의 역간 운전시분을 최대한 참고하여 일반열차는 75%, 급행열차는 80%의 성능(Performance)으로 열차주행성능시뮬레이션(Train Performance Simulation : TPS)을 실행하여 Fig. 7과 같은 운전선도를 도출하였

다. Fig.8과 Fig.9는 운영사가 참조하는 운전시분과 OpenTrack에서 도출한 운전시분의 일부를 비교한 것이다. 여기서 성능이란 최대 가속력의 백분율을 의미한다.

2.3.2 시뮬레이션을 활용한 열차 스케줄 작성 과정

본 절에서는 마곡나루역이 새로운 급행 정차역이 된다고 가정했을 때, 완행과 급행이 1:1 비율로 투입되는 첨두 시간대 9호선 열차 스케줄을 작성해보고자 한다. 기존의 스케줄 작성 과정은 운전시분과 최소 시격이 주어져 있는 상태에서, 다이어상의 기울기, 출발시간을 조정하는 방식으로 이루어진다. OpenTrack에서는 운전시분과 열차간 최소 시격은 시뮬레이션을 통해 자동으로 계산되고, 폐색단위에서 언제 열차의 지연이 발생하고 있는지를 확인할 수 있다는 점에서, 현재 활용되고 있는 열차 스케줄 작성 과정과는 상당한 차이가 있다.

혼잡한 시간대의 도시 철도 열차 스케줄 작성의 경우, 스케줄 보다 차량의 운용 가능성이 더욱 중요한 문제로 인식되기 때문에 일반적인 도시철도 열차 스케줄은 시간표 작성 시 반드시 차량 운용 계획을 고려하게 된다.

운행계획의 첫번째 단계는 투입 가능한 차량 수에 의존하여 급행 열차간, 완행 열차간 최소 운행 시격을 계산하는 것이다. 현재 첨두 시간에 투입 가능한 차량 수 33편성을 기준으로 약 6분 40초를 도출하였다.

그 다음 단계로 상행의 완행-급행 운행 패턴을 구성하였는데, OpenTrack 시뮬레이션을 활용할 경우, 차량의 폐색단위 주행 성능(지연, 정지 등)을 눈으로 확인할 수 있기 때문에, 완행의 대피역 선정 및 정차 시분을 보다 유연하고 즉각적으로 선정할 수 있다. Fig.10은 이러한 과정을 통해 구성된 3개의 완행, 1개의 급행 간의 패턴을 구성한 것이고 이러한 패턴은 6분 40초 운행 시격으로 반복된다.

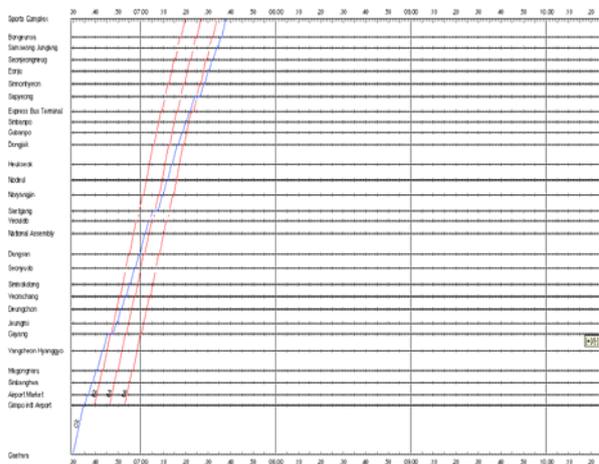


Fig. 10 Determining Overtaking stations

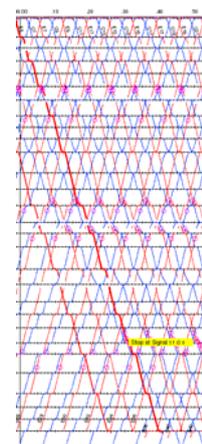


Fig. 11 Detailed train movement in timetable

하행 패턴도 동일한 방식으로 구성하고, 차량 운용을 위해 상행 종착역에서의 회차 조건을 고려한 하행 열차의 출발 시간을 선정한다.

위의 과정을 통해 작성된 상행 하행 패턴을 시간표로 작성하여 시뮬레이션하면 아래와 같

은 세부적인 열차의 움직임을 확인할 수 있다. 예를 들어, 굵은 선으로 표시된 열차의 경우, 특정 폐색에서 신호대기로 기외정차 11초를 사전에 확인할 수 있다. 이는 운전시분이나 선행역에서의 정차 시분을 조정함으로써 해소될 수 있다. 그런데 OpenTrack에서는 운전시분을 임의로 조정할 수는 없으므로 주로 선행역에서의 정차시분을 조정함으로써 이루어진다. Fig.11은 이렇게 구성된 최종 열차 시간표를 나타낸 것이다.

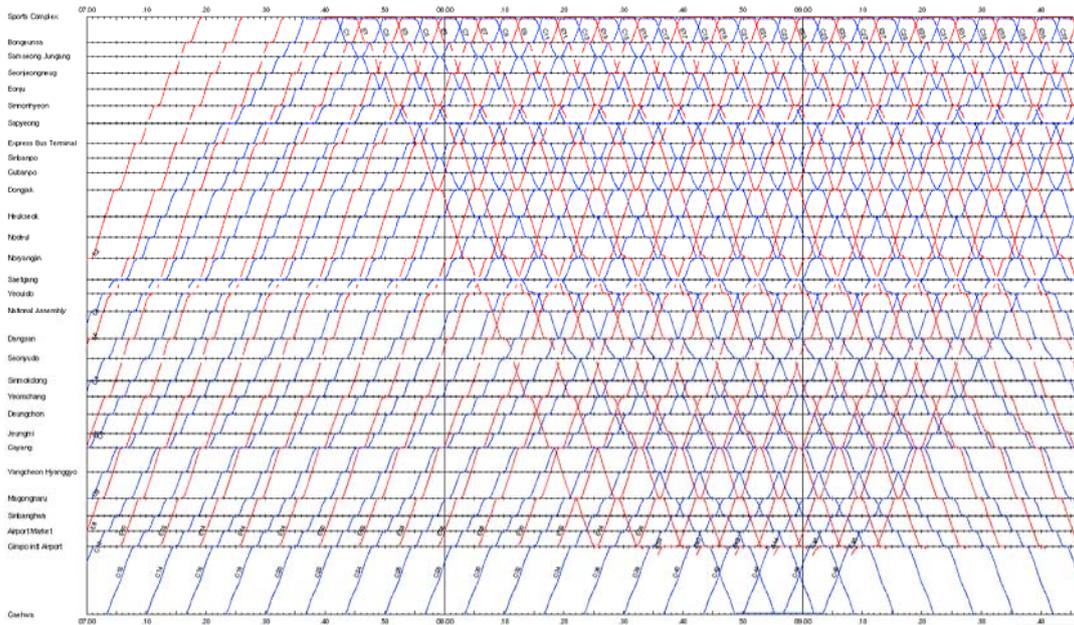


Fig. 12 Final Timetable

3. 추후 연구 방향

본 연구에서는 OpenTrack 시뮬레이션을 활용한 열차 스케줄 작성과정에 대해 살펴보았다. 시뮬레이션을 활용할 경우, 별도의 TPS 수행 결과나 열차간 최소 시격을 입력 요소로 요구하지 않으며, 폐색단위의 열차의 움직임을 상세하게 파악할 수 있어 즉각적이고 유연한 열차 시각표를 설정할 수 있다.

그러나 급행 완행의 패턴 선정, 차량 운용 계획을 고려한 상하행 패턴의 구성 등은 무수히 많은 경우의 수를 고려해야 하므로 미시적 시뮬레이션 보다는 거시적 최적화가 필요하다. 이는 바로 Fig. 1에서 제시한 미시적 시뮬레이션과 거시적 최적화의 유기적인 결합에 관한 연구로 이어질 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2017년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음

참고문헌

[1] B. H. Park, K. W. Chung (2014), An Efficient Model and Algorithm to Allocate Rail Track Capacity

- Considering Line Plans, *Journal of the Korean Society For Railway*, 17(6), pp. 466-473
- [2] J.-B. Choi, Jinsun Lee (2017) A Study on Model of Train Slot Allocation for Railway Network with Multi Operating System, *Journal of the Korean Society For Railway*, 20(1), pp. 142-155
- [3] S.-I. Han, D.-K. Lee (2010) Study of Improving the Operation Diagram of Seoul Metro Line 9 by Diversifying Train Patterns, *Journal of the Korean Society For Railway*, 13(1), pp. 125-130.
- [4] M. Kim, J. Kim, K. Koe (2016) Study on Optimization for Scheduling of Local and Express Trains Considering the Application of High Performance Train, *Journal of the Korean Society For Railway*, 19(2), pp. 234-242
- [5] H. Seon, S.-H. Ryu, K.-H. Choi (2011) An Overtaking-station-selection Algorithm Based on Realtime Simulation for the Optimization of Mixed Operation of Express and Regular Trains of Urban Transit, *Proceedings of Fall Conference of Korean Society For Railway*, 2011, pp. 490-497
- [6] H.-L. Rho (2011) At which station would be installed subsidiary-main track?, *Proceedings of Spring Conference of Korean Society For Railway*, 2011, pp. 490-497
- [7] M. P. Lee (2015) Study of the Optimal Mixed Operation for Commuter and KTX train in Airport Railroad, Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology.
- [8] T. Schlechte (2012) Railway Track Allocation: Models and Algorithms, TU Berlin, Ph. D Thesis, 2012
- [9] R. M. P. Goverde, N. Besinovic, A. Binder, V/ Cacchiani et al. (2016) A Three-level Framework for Performance-based Railway Timetabling, *Transportation Research Part C*, Vol. 67, pp. 62-83
- [10] A. Nash, D. Huerlimann (2004) Railroad Simulation Using OpenTrack, *Proceedings of Computers in Railways (COMPRAIL) 2004*.
- [11] UIC 406 (2004), Capacity.
- [12] A. Landex et al. (2008), Capacity Measurement with the UIC 406 Capacity Method, *Proceedings of Computers in Railways (COMPRAIL) 2008*.
- [13] D. Huerlimann and A. B. Nash, OpenTrack Version 1.6 Manual