

열차 지연 예측을 위한 DEVS 기반 시물레이션 모델 개발

길준혁 · 이상화 · 권수영 · 배장원[†]

Development of a DEVS-Based Simulation Model for Predicting Train Delays

Jun Hyeok Gil · Sang Hwa Lee · Soo Young Gwon · Jang Won Bae[†]

ABSTRACT

Trains play a pivotal role in modern transportation systems due to their high speed and transport efficiency. However, train operations can be disrupted by unusual events such as technical failures, human errors, and natural disasters, which may lead to the propagation of delays, reduced service reliability, and significant economic losses. This study analyzes the causes of train delays during such unusual events and investigates how CTC (Centralized Traffic Control) affects delay patterns at a microscopic level. To this end, a simulation model was developed based on the DEVS(Discrete Event Systems Specifications) formalism, which enables the representation of train operations and interactions. The simulation results showed that the MAPE(Mean Absolute Percentage Error) between the scheduled and simulated arrival times was 0.36%. By applying the single-track blockage scenario, the model was able to analyze train operations, classify the causes of delays, predict delays, and identify changes in operation times for each train. The outcomes of this study are expected to serve as a practical foundation for devising train control strategies and formulating policy measures for managing unusual events.

Key words : Train Delay Prediction, DEVS, Simulation, Unusual Situations, CTC

요약

열차는 고속성과 수송 효율을 바탕으로 현대 교통체계에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 하지만 기술적, 인적 문제나 자연재해와 같은 이례상황으로 인해 열차 운행에 차질이 발생할 수 있으며, 이는 지연 확산과 서비스 신뢰도 저하, 경제적 손실로 이어질 수 있다. 이에 본 연구에서는 이례상황 발생 시 지연의 원인을 분석하고, CTC(Centralized Traffic Control)를 통해 열차 운행을 통제했을 때 열차의 지연 양상을 미시적 수준에서 파악하였다. 이를 위해 열차의 운행과 상호작용을 표현할 수 있는 DEVS(Discrete Event Systems Specifications) 형식론 기반의 시물레이션 모델을 개발하였다. 시물레이션 결과, 열차의 스케줄 상 도착 예정 시간과 비교한 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)는 0.36%를 보였으며, 단선 불통 시나리오를 적용하여 열차 운행 과정을 파악하고 지연 원인을 분류할 수 있을 뿐만 아니라 지연을 예측하고 열차별 운행 시간의 변화를 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 향후 철도 관제의 열차 통제 전략 수립 및 이례상황 대응 정책 마련에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 열차 지연 예측, DEVS, 시물레이션, 이례상황, CTC

1. 서론

열차는 대용량, 고속, 높은 안전성 등의 장점으로 인해 대중교통 분야에서 점점 더 중요한 위치를 차지하고 있으며, 대규모 승객 수송과 화물 운송에 큰 역할을 담당하고 있다(Suo et al, 2023).

철도 차량 시장은 전 세계적으로 2023년 1,411억 3,000

Received: 20 April 2025, Revised: 22 June 2025,
Accepted: 17 July 2025

[†] **Corresponding Author**: Jang Won Bae
E-mail: jangwon_bae@koreatech.ac.kr
School of Industrial Management, Korea University of
Technology and Education

만 달러로 평가되었으며, 2030년까지 1,800억 달러로 성장할 것으로 예측되고 있다(Gwon, 2024). 특히 대한민국은 운영 효율성, 교통 혼잡 해소, 안전하고 편리한 이용 환경 조성 등을 주요 추진 방향으로 수립함에 따라 고속·일반·광역 철도망을 전국적으로 확대하고 있다(Park, 2022). 이처럼 철도는 국가 교통망의 핵심 인프라로 자리 잡고 있으며, 효율적인 운영과 지속적인 확장이 이루어지고 있다. 이에 따라 철도 운영의 안정성과 강건성은 매우 중요한 요소로 평가되고 있다(Harrod et al, 2019).

하지만 열차 운행은 전염병, 지진, 자연재해 등의 장애로 인해 정기적으로 영향을 받고 있다(Dekker, 2021). 또한 신호 시스템 오류, 정전, 선로 장애와 같은 기술적 문제뿐만 아니라 인적 오류까지 다양한 원인으로 인해 열차 운행이 중단되거나 지연되는 상황이 발생하고 있다. 이러한 상황은 예측하기 어려운 사고나 비상상황과 같은 이례상황을 초래하여 철도 운영에 큰 지장을 주고 서비스 품질에 악영향을 미친다. 특히 철도 시스템은 상호 연결된 네트워크로 구성되어 있으며, 한 구간에서 발생한 지연은 다른 구간으로 확산되어, 후속 열차 운행에까지 큰 영향을 미칠 수 있다(Harrod et al, 2019). 나아가 열차 지연은 승객들의 일정 차질에 대한 보상 비용 증가와 물류 지연 등을 유발하여 대규모 경제적 손실을 초래할 수 있다(Dekker, 2021).

따라서 이례상황이 발생했을 때 열차 지연 시간을 예측하여 대응하는 것이 필요하다. 이때 M&S(Modeling and Simulation)는 복합적인 철도 시스템 개발에 필요한 구성 요소들을 가상으로 구성하여 시스템 분석에 활용할 수 있으며, 현실을 고려한 What-if 질문에 대해 해결책을 탐색할 수 있다(Lee et al, 2018; Cho, 2016).

이에 본 연구에서는 이례상황 발생 시 열차의 지연 시간을 예측하여 열차 통제에 대한 의사결정을 지원하기 위해 M&S를 적용하였다. 구체적으로, 열차 운행 및 관제 과정을 미시적 관점에서 모델링하고, 각 열차가 철도 네트워크에서 개별적으로 운행되고 통제될 수 있도록 DEVS 형식론(Discrete Event Systems Specifications) 기반의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이션 결과, 스케줄 상 도착 예정 시각과 비교할 때 전체 열차에 대한 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)는 0.36%를 보였으며, 이례상황 발생 시 열차별 운행 유형 및 과정, 열차 운행 시간의 변화와 지연의 원인을 확인할 수 있었다. 따라서 시뮬레이션을 통해 이례상황에 대응하기 위한 열차 통제 방안의 결과를 사전에 검토하여 실질적인 의사결정에 기여할 것으로 기대할 수 있다.

2. 고속선 운행 및 선행 연구

2.1 고속선 운행 개요

2.1.1 고속선 운행 시스템

고속선은 열차가 주요 구간을 시속 200km/h 이상으로 주행하는 철도를 의미하며, 고속선 운행은 열차의 출발부터 도착까지 전 과정을 포함한다. 열차 운전은 기관사가 기기 조작을 통해 열차를 움직여 출발지부터 목적지까지 안전하게 도착시키는 행위를 의미하며, 운행은 열차가 스케줄(시간표)에 맞춰 선로를 따라 이동하는 전체 과정을 의미한다.



Fig. 1. High-Speed Railway Network between Seoul Station and Busan Station

Fig. 1은 본 연구에서 고려하는 구간인 서울역과 부산역 간 경부고속선을 나타낸 그림이다. 열차는 두 방향으로 운행되기에 경부고속선을 두 줄로 표현하였다. 하선(T1)은 서울역에서 부산역으로 이어진 선로를 의미하며, 하행은 하선을 따라 운행하는 것을 의미한다. 반대로, 상선(T2)은 부산역에서 서울역으로 이어진 선로를 의미하며, 상행은 상선을 따라 운행하는 것을 의미한다.

고속선의 안정적인 운행을 위해서는 폐색구간 단위로 열차의 최대 속도를 통제하는 것이 필요하다. 폐색구간은 열차의 충돌 또는 추돌을 방지하기 위해 하나 이상의 열차가 동시에 진입할 수 없도록 일정한 거리로 분할한 선로 구간을 의미한다. 이때 각 열차는 선행 열차와의

간격을 유지해야 한다. 이를 위해 각 폐색구간에는 열차의 최대 운행 속도가 존재하며, 열차는 이를 준수하며 운행한다.

Fig. 2는 역 간 고속선의 T1 폐색구간 일부와 최대 통제 속도를 나타낸 그림이다. 노란색 삼각형 기호는 T1에 설치된 폐색경계표지를 의미한다. 폐색구간은 폐색경계표지 사이의 구간으로 정의되며, 신호기 위에 표기된 km/h는 폐색구간 내 최대 통제 속도를 의미한다. 또한 폐색구간과 역의 위치는 서울역을 기준으로 특정 지점까지의 거리를 나타내는 키로징을 사용하여 나타내며, 신호기 아래 km와 m로 키로징을 표현하였다.

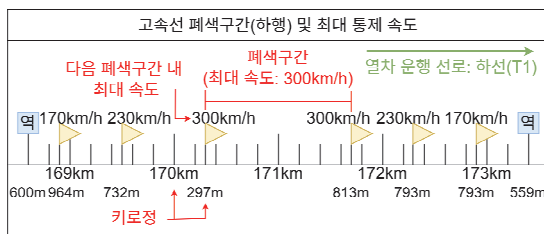


Fig. 2. High-Speed Railway Block Section and Maximum Controlled Speed

고속선 운행은 편성 단위로 관리된다. 편성이란 열차를 운행하기 위해 여러 차량이 물리적으로 연결된 열차의 기본 단위이며, 각 편성에는 이를 식별하기 위해 고유한 편성번호가 부여된다. 각 편성번호에는 시·종착역과 출·도착시각이 표현된 운행 스케줄을 가지고 있으며, 스케줄에 따라 열차를 구분하기 위해 열차번호가 부여된다. 이로 인해 편성번호는 운행 스케줄에 따라 여러 개의 열차번호가 부여될 수 있다. Table 1은 편성번호 1C1041의 열차 운행 스케줄 예시를 나타낸다. 이때 운행 스케줄이 서로 다른 3개의 열차번호(5번, 22번, 71번)는 물리적으로 동일한 열차로 운행된다.

Table 1. Example of Train Schedule

편성 번호	열차 번호	시발역	출발 시각	종착역	도착 시각	운행 방향
1C1041	5번 열차	서울역	09:00	부산역	11:00	T1 (하행)
	22번 열차	부산역	11:30	서울역	13:30	T2 (상행)
	71번 열차	서울역	14:00	부산역	16:00	T1 (하행)

또한 편성번호 내에서 운행 중인 열차가 종점에 도착한 후, 동일한 편성번호를 사용하여 다시 운행되는 열차를 반복열차라고 한다(Ji et al, 2021). 예를 들어 22번 열차는 5번 열차가 서울역에서 부산역까지 운행이 종료되어야 운행되므로 22번 열차는 반복열차가 되며, 정해진 출발 시각에 맞춰 부산역에서 서울역으로 운행을 시작하게 된다.

2.1.2 고속선 열차 운행 프로세스

Fig. 3은 고속선 열차 운행 프로세스를 나타낸 것으로, 특히 이례상황 발생 여부에 따른 CTC(Centralized Traffic Control)의 열차 통제 절차를 보여준다.

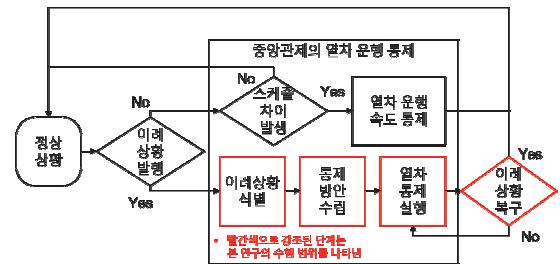


Fig. 3. Train Operation Process

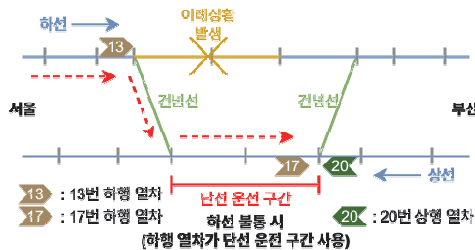
정상상황은 사전에 수립된 열차별 스케줄을 기준으로, 역 간 이동과 승객승하차 시간이 일정한 범위 내에서 유지되는 것으로 명명하였다. 정상상황에서 CTC는 선행 열차와의 간격 유지 혹은 경미한 지연 등으로 인해 스케줄과 차이가 발생하는 것에 대응하여 열차 운행 속도를 통제함으로써 정상 운행 상황을 유지한다.

그러나 열차 운행 중에는 신호 시스템 오류, 선로 장애, 충돌·추돌 사고, 인적 오류 등으로 인해 정상적인 운행 상태를 유지할 수 없는 상황을 의미하는 이례상황이 발생할 수 있다. 이례상황은 열차 운행에 차질을 발생시키기에, CTC는 발생한 이례상황과 그로 인해 영향을 받는 열차들을 식별한 후, 이례상황에 대응할 수 있는 열차 통제 방안을 수립하여, 개별 열차의 운행을 통제한다. 이례상황이 지속되는 동안 CTC는 열차 통제를 계속 유지하며, 이례상황이 복구되면 다시 열차를 스케줄에 따라 정상 운행하도록 한다. 본 연구에서는 정상상황에서 CTC의 열차 통제가 아닌, 이례상황 발생 시 CTC의 열차 통제 과정과 그로 인한 열차 지연 시간 예측에 집중하였다.

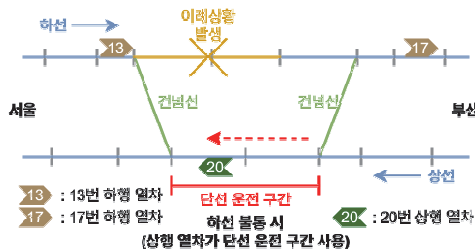
2.1.3 고속선 이례상황 발생 및 관리

이례상황은 영향을 받는 선로의 수에 따라 두 가지 유형으로 구분된다. 한쪽 선로에서만 운행이 불가능한 경우를 단선 불통이라 하며, 양쪽 선로 모두에서 운행이 불가능한 경우 양방향 불통이라 한다. 본 연구에서는 단선 불통인 상황만을 상정하여 시뮬레이션을 구성하였다.

단선 불통이 발생한 경우, CTC는 이를 대응하기 위해 운행 가능한 단일 선로를 교행으로 사용하는 단선 운행 방식으로 열차를 통제한다. 교행은 단선 구간에서 두 열차가 마주 올 때 상대 열차가 다 지나갈 때까지 기다린 뒤 출발하는 열차 운행 방식을 의미하며, 열차 간 충돌을 방지한다. 철도에는 단선 운행을 하기 위해 열차가 반대 선로로 이동할 수 있도록 하선과 상선을 연결하는 건널선이 설치되어 있다. 이때 열차가 건널선을 이용하여 반대 선로로 이동하면, 상·하행 열차가 모두 이용하는 구간이 발생하며, 이를 단선 운전 구간이라 한다.



(a) Case where the downbound train uses the single track operation section



(b) Case where the upbound train uses the single track operation section

Fig. 4. Example of Single Track Operation under T1 Track Blockage

Fig. 4는 하선이 불통일 때 단선 운행의 예시를 나타낸다. 초록색 선은 건널선을 나타내며, 빨간색 선은 단선 운전 구간을 나타낸다. 노란색 X에서 이례상황이 발생하여 T1의 일부 폐색구간의 운행이 불가능한 경우, CTC는 열차

를 한 대씩 교행으로 통제한다. (a)는 17번 하행 열차가 먼저 단선 운전 구간을 이용하는 것을 나타낸다. 이때 20번 상행 열차는 교행으로 통제되기에 단선 운전 구간을 사용하지 못하고 대기하게 된다. (b)는 17번 하행 열차가 단선 운전 구간을 모두 이용한 후, 20번 상행 열차가 단선 운전 구간을 이용하는 것을 나타낸다. 이때 13번 하행 열차는 교행 운행 통제로 인해 대기하게 된다.

2.2 선행 연구

열차 운행과 지연 분석을 위해 시뮬레이션 기술을 적용한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 선행 연구들은 크게 효율적인 열차 운행을 위한 연구와 열차 지연 완화를 위한 연구로 구분할 수 있었다.

효율적인 열차 운행을 위한 연구로는 Cha et al.(2011)과 Choi et al.(2020)의 연구가 있다. Cha et al.(2011)은 실제 열차 운행 시에는 예측과 달리 다양한 요인으로 인해 수송 수요에 대한 시간적, 시기적 파동이 생길 수 있기에, 이를 고려하여 열차 운행 계획과 서비스 품질을 사전에 검토할 수 있는 기술이 요구된다는 것을 확인하였다. 이에 연속적인 수요 파동을 반영할 수 있는 시뮬레이션 방법 및 모델을 제시하였으며, 열차 운행 계획과 전략을 검토하는 데 이용할 수 있음을 확인하였다. 또한 Choi et al.(2020)은 부산 도시철도 시스템이 다른 대중교통보다 활용도가 높지만, 높은 혼잡도를 유발하기에 바이러스 확산에 치명적임을 확인하였다. 이에 부산 도시철도 시스템의 효율적인 운영을 위한 디지털 트윈 시뮬레이션 모델을 개발하였고 최대 혼잡도를 완화할 수 있는 배차 계획을 도출하였다.

한편, 열차 지연 완화를 위한 연구는 열차 스케줄 작성 연구와 지연 완화 전략 분석 및 평가 연구로 나눌 수 있다. Park(2022)은 열차 운행패턴이 복잡해짐에 따라 체계적이고 최적화된 열차 스케줄을 작성하는 방법론이 필요함을 확인하였다. 이에 열차 반복 계획에 의해 발생하는 지연에 강인한 스케줄을 탐색하기 위해 시뮬레이션을 활용하였으며, 인위적 지연 생성을 통해 열차의 2차 지연을 정량적으로 계산하여 스케줄을 평가하였다. 반면, Wales et al.(2015)은 지하철 서비스의 경우, 열차 지연 문제를 오랜 기간 겪어왔으나, 지연의 영향력 및 최소화 방안에 대한 연구는 현저히 적음을 확인하였다. 이에 대응하여 지연 완화 전략을 분석 및 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이를 통해 지연 최소화 방안의 식별 및 테스트를 진행하여 지연 완화 전략의 실현 가능성을 검증하였다.

기존 연구들이 수송 수요나 혼잡도를 고려한 효율적인 열차 운행에 집중하거나, 시스템 전체의 흐름에 집중하여 열차 스케줄 탐색 및 지연 완화 전략 분석을 중심으로 진행한 것과 달리, 본 연구는 DEVS 형식론 기반의 시뮬레이션 모델을 개발하여, 단선 운행 이례상황에 대한 열차의 지연을 미시적 수준에서 예측하였다. 구체적으로, 철도를 폐색구간 단위로 세분화하고, CTC가 각 폐색구간에서 개별 열차를 통제할 수 있도록 설계하여 열차 운행과 지연을 분석하였다. 이를 통해 각 열차의 이동 경로와 지연 시간 및 지연의 전파 과정을 파악할 수 있다는 점이 본 연구의 차별화 요소이다. 또한 DEVS 형식론 기반의 모델은 객체 지향적이기에 계층적(Hierarchical)이고 모듈리(Modular)하게 표현할 수 있다(Zeigler et al, 2000). 따라서 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델은 향후 다른 이례상황이나 철도 네트워크의 확장에도 쉽게 적용할 수 있다는 점에서 기존 연구들에 비해 장점을 갖는다.

3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 개발

본 연구에서는 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델을 개

발하였으며, 이를 TrainSim이라 명명하였다. TrainSim은 열차 운행과 지연 발생 과정을 시간에 따라 추적하기 위해, 모든 시뮬레이션의 시간 단위를 분(minute) 기준으로 설정하였다.

3.1 데이터 활용

Fig. 5는 TrainSim의 입출력 구조를 나타내며, Table 2는 TrainSim의 입출력에서 사용되는 주요 칼럼을 나타낸다.

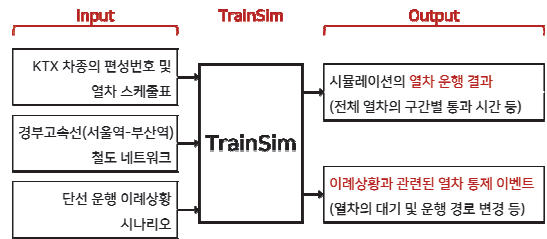


Fig. 5. TrainSim Input/Output

TrainSim의 입력 데이터는 세 가지 데이터셋으로 구

Table 2. Description of Key Columns in Input Data

구분	변수명	설명
KTX 차량의 편성번호 및 열차 스케줄표	열차종별	KTX, KTX-산천, KTX-이음, KTX-청룡 중 하나로 구성된 열차의 차종 정보
	열차번호	특정 운행 스케줄과 노선에 따라 열차를 구분하기 위해 부여되는 번호
	상하	하행, 상행 중 하나로 구성된 열차의 운행 방향
	역명	열차 운행에 포함되는 모든 역의 명칭
	도착시각	열차가 특정 역에 도착할 것으로 예정된 시각(단위: 분)
	출발시각	열차가 특정 역에서 출발할 것으로 예정된 시각(단위: 분)
	정차사유	시발, 통과, 승객승하차, 종착 중 하나로, 열차가 특정 역에서 수행하는 운행 목적
	편성번호	열차를 운행하기 위해 물리적으로 연결된 열차(편성)를 식별하기 위한 고유 번호
경부고속선 철도 네트워크	당역까지의 소요시간	이전 역부터 현재 역까지 소요되는 이동 시간(= (현재 역 도착시각) - (이전 역 출발시각))
	상/하행	하선(T1), 상선(T2) 중 하나로 구성된 철도의 방향
	시설물 식별자	철도 네트워크를 구성하는 역, 폐색경계표지, 건널선의 고유 식별자
	건널선	단선 운행 시 열차가 이용할 수 있는 건널선 쌍 중, 연결된 반대 선로의 건널선 이름
단선 운행 이례상황 시나리오	키로정	철도 네트워크에서 서울역을 기준으로 특정 지점까지의 거리(단위: km)
	유형구분	이례상황의 원인 및 대상에 따라 ‘열차사고’ 또는 ‘철도사고’로 분류된 이례상황 사고 유형
	편성번호	유형구분이 ‘열차사고’인 경우, 사고가 발생한 열차가 속한 편성의 고유번호
	사건시각	이례상황이 발생한 시각(단위: 분)
	발생지점	이례상황이 어느 역부터 어느 역 사이에 발생했는지 역 기준으로 표현한 이례상황 발생 지점
	발생위치	키로정으로 표현된 이례상황 발생 위치
	출발위치	철도 네트워크의 고유 식별자를 기준으로 표현한 이례상황의 시작 위치
	도착위치	철도 네트워크의 고유 식별자를 기준으로 표현한 이례상황의 종료 위치
	복구시간	이례상황이 복구(종료)되는 데 소요되는 시간(단위: 분)

성된다. 이 중 첫 번째는 KTX 차종의 편성번호와 열차별 스케줄에 대한 실제 데이터를 사용하였다. 하루 동안 운행되는 모든 편성번호에 포함된 2,156개 열차 데이터 중 KTX 차종이면서, 시·종착역이 서울역과 부산역인 열차 150대를 선별하여 사용하였다. 또한 열차의 스케줄은 TrainSim에서 열차 운행과 지연을 표현하기 위해 열차별 정차역과 사전에 정의된 출·도착 시각 정보를 사용하였다.

두 번째로 경부고속선 철도 네트워크는 서울역에서 부산역까지 역, 폐색구간, 건널선 정보에 대해 실제 데이터를 나타내며, 고속선 철도 네트워크를 구성하는 데 사용하였다. 이는 상행과 하행을 기준으로 구분되어 있으며, 키로징 순서대로 정렬하여 철도의 연결을 표현하였다. 특히, 건널선의 경우 상호 연결된 건널선 구간 정보도 함께 표현하여 시뮬레이션 과정에서 건널선을 이용해 반대 경로로 이동할 수 있도록 구성하였다.

세 번째로 단선 운행 이례상황 시나리오는 시뮬레이션 과정에서 이례상황의 발생과 종료를 반영하기 위해 TrainSim의 이례상황 입력 시나리오로 활용된다. 사건시각, 발생지점, 사고유형 등 이례상황에 대한 주요 정보뿐만 아니라 철도 네트워크 상에서 이례상황이 발생한 구간 정보도 포함하여 데이터를 구성하였다.

TrainSim의 출력 데이터는 두 가지 데이터셋으로 구성된다. 시뮬레이션의 열차 운행 결과는 열차의 현재 위치, 구간별 통과시간, 스케줄과 비교한 정차역별 도착 시각의 차이, 지연 시간 등 열차 운행과 관련된 모든 데이터를 포함한다. 이를 통해 시뮬레이션 결과를 확인하고, 개별

열차의 운행 경로와 지연 발생 과정을 상세히 파악할 수 있도록 하였다.

이례상황 관련 열차 통제 이벤트는 열차의 대기 및 교행 운행 통제 현황 등 이례상황에 따른 열차 통제 과정을 나타낸다. 이를 통해 개별 열차의 지연 발생 원인과 건널선 이용에 따른 단선 운전 구간의 운행 상황을 확인할 수 있도록 하였다.

3.2 DEVS 기반 열차 지연 시뮬레이션 모델링

본 연구에서 개발한 TrainSim은 DEVS 형식론을 기반으로 하며, 열차 운행 및 통제 과정을 시뮬레이션하기 위해 철도 네트워크(Network), 편성번호(TrainSet), 이례상황(Unusual)을 모델링하여 구성하였다.

3.3 TrainSim의 결합 모델(Coupled Model)

Fig. 6은 TrainSim의 전체 구조를 나타낸 결합 모델로, 세 개의 모델 Network, TrainSet, Unusual이 상호 연결되어 구성된다. 이는 각각 열차의 운행, 각 편성번호, 이례상황 발생을 개별적으로 처리하며, 결합 모델에서는 이들을 통합하여 열차 지연 상황을 시뮬레이션할 수 있도록 한다.

Network는 각 열차가 역에서 출발하여 움직이는 모든 과정을 표현한 모델이다. 이례상황이 발생한 경우, 철도 네트워크에서 운행되고 있는 열차들이 영향을 받을 수 있도록 구성하였다. 이례상황에 대응하여 열차를 통제하기 위해 CTC를 사용하여 열차 운행과 관련된 모든 통제를

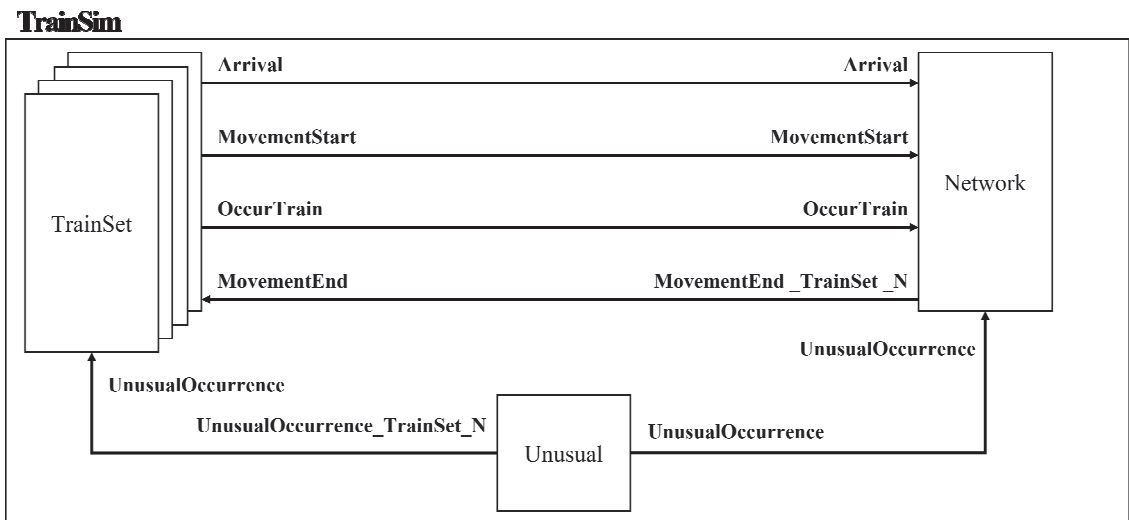


Fig. 6. Coupled Model Diagram of TrainSim

담당하도록 하였다. TrainSet은 열차의 편성번호를 나타내며, 편성번호마다 개별 모델이 존재한다. 또한 각 TrainSet은 편성번호에 포함된 열차의 스케줄에 따라 역 간 이동과 승객승하차를 진행한다. Unusual은 이례상황 시나리오를 기반으로 철도 네트워크 혹은 열차에 이례상황을 발생시키는 역할을 한다. 추가적으로 Network 또는 Unusual에서 TrainSet으로 메시지를 전달할 때, 메시지의 이름 뒤에 붙는 “_N”은 해당 메시지가 전달되어야 하는 편성번호를 의미한다. 이를 통해 각 메시지가 동일한 구조를 가진 다수의 TrainSet 중 필요한 편성번호에만 메시지를 전달할 수 있도록 하였다.

3.4 TrainSim의 원자 모델(Atomic Model)

3.4.1 TrainSet Atomic Model

Fig. 7은 TrainSet 모델링을 나타낸다. 각 편성번호 내 열차는 스케줄에 따라 역에서 waiting_time 동안 대기한 후 역 간 이동을 시작하기 때문에 TrainSet의 초기 상태를 DEPARTURE로 설정하였다. 열차가 역 간 이동을 시작하

면, MovementStart를 출력하며, 이에 따라 MOVEMENT로 상태전이 된다. 이후 열차의 역 간 이동이 종료되어 MovementEnd 입력을 받으면, PASSENGER로 상태전이 되어 getonoff_time 동안 승객의 승하차가 이루어진다. 승하차 이후 열차가 종착역에 도착하지 않았다면, 상태는 DEPARTURE로 천이된 후, MovementStart를 출력하며 열차는 다음 정차역으로 이동을 시작한다. 반면, 열차가 종착역에 도착한 경우라면, 편성번호 내 다음 열차가 스케줄에 따라 출발한다. 만약 편성번호 내 모든 열차가 종착역에 도착한 경우라면, ARRIVAL로 상태전이 되어 Network에 해당 편성번호의 운행이 종료되었음을 알린다. 이례상황 중 열차 사고가 발생한 경우, Unusual Occurrence를 입력받게 되며, 열차 사고를 Network에 전달하기 위해 OccurTrain을 출력한다.

3.4.2 Network Atomic Model

Fig. 8은 Network 모델링을 나타낸다. 초기 상태는 Network에 열차가 존재하지 않는 상태를 의미하는 STOP으로 설정하였으며, MovementStart를 입력받으면 NET

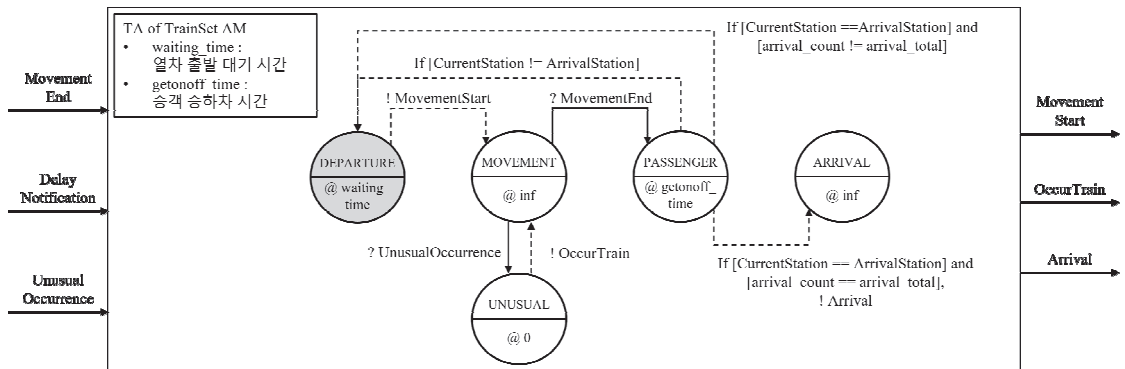


Fig. 7. TrainSet Atomic Model Diagram

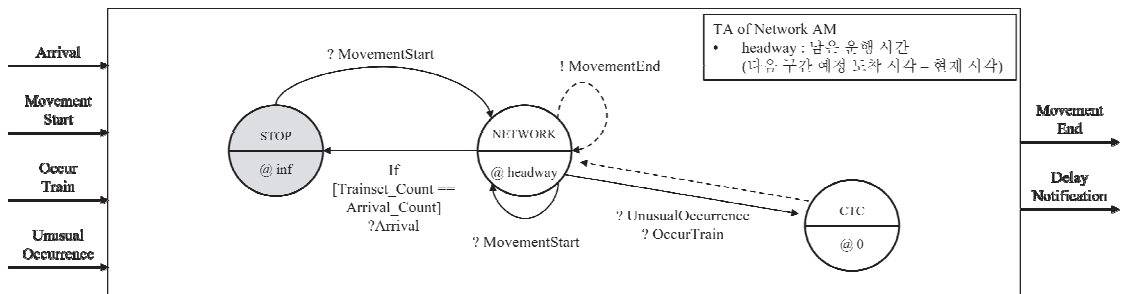


Fig. 8. Network Atomic Model Diagram

WORK로 상태전이 된다. NETWORK 상태에서는 모든 열차의 운행을 관리하며, 현재 운행 중인 열차 중 예상 도착시간이 가장 빠른 열차의 남은 운행 시간인 headway를 활용하여, 열차가 역이나 특정 폐색구간에 도착함을 나타냈다. 이때 예상 도착시간은 현재 열차가 위치한 폐색구간을 통과하는 데 소요되는 예상 시간을 의미한다. 열차가 역에 도착하면 MovementEnd를 출력하여 역 간 이동이 완료되었음을 알린다. 모든 편성번호의 운행이 종료되면, STOP 상태로 전이되어 시물레이션이 종료된다. 한편, 이례상황 중 철도 사고 발생 시 Unusual로부터 UnusualOccurrence를 입력받고 열차 사고가 발생하면 TrainSet으로부터 OccurTrain을 입력받는다. 이때 NETWORK에서 CTC로 상태전이 되며 이례상황의 영향을 받는 열차들의 예상 도착시간을 조정한 후, NETWORK 상태로 다시 전이한다.

3.4.3 Unusual Atomic Model

Fig. 9는 Unusual 모델링을 나타낸다.

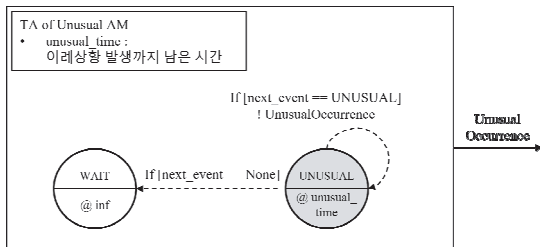


Fig. 9. Unusual Atomic Model Diagram

이례상황은 시나리오에 따라 발생하므로 Unusual의 초기 상태는 UNUSUAL로 설정하였다. 시물레이션이 시작되면, Unusual은 시물레이션 중 발생 예정 이벤트인 next_event를 확인한다. next_event가 이례상황이면, 현재 시각에서 이례상황 발생까지 남은 시간인 unusual_time을 설정한다. unusual_time이 경과하면, 철도 사고의 경우 Network로, 열차 사고인 경우 TrainSet으로 UnusualOccurrence 출력을 보내어 이례상황을 발생시킨다. 만약 next_event가 없다면, WAIT 상태로 전이된다.

4. 시물레이션 결과 검증 및 분석

4.1 시물레이션 모델 검증

M&S의 활용도가 증가함에 따라 M&S의 신용이 중요해지고 있으며, 정확성, 신뢰성 등 충분한 품질 특성을 가

지는지 검증을 통해 평가할 수 있다(Choi, 2006; Balci, 2012). 이에, 본 절에서는 TrainSim의 결과 검증을 진행하였다.

$$TimeDifference_{t,j} = Y_j^{(t,data_{exp})} - Y_j^{(t,data_{base})}$$

$$data_{exp}, data_{base} \in \{schedule, normal, unusual\}$$
(1)

t : 열차번호
 j : 열차 t 가 정차하는 역에 대해 정차 순서대로 부여된 번호
 $Y_j^{(t,data)}$: $data$ 에서 열차 t 의 j 번째 정차역 도착 시각, ($data \in \{data_{exp}, data_{base}\}$)
 $data_{exp}$: 비교하고자 하는 데이터
 $data_{base}$: 비교의 기준이 되는 데이터
 $schedule$: 실제 운행 스케줄
 $normal$: 정상상황에서의 시물레이션 결과
 $unusual$: 이례상황에서의 시물레이션 결과

Eq. (1)은 열차가 정차하는 각 역에 대해, 비교하는 두 데이터 간 도착 시각의 차이를 나타낸다. $TimeDifference_{t,j}$ 가 양수일 경우 비교 기준 데이터에 비해 지연됨을 나타내며, 음수일 경우 더 빨리 정차역에 도착함을 나타낸다. 또한 데이터는 schedule, normal, unusual을 사용하였다. schedule은 KTX의 실제 운행 스케줄로, 열차마다 각 정차역에 대해 사전에 정의된 출·도착 시각을 의미한다. normal은 스케줄을 기반으로 정상상황에 대해 시물레이션한 결과이다. unusual은 스케줄을 기반으로 이례상황이 발생한 경우 시물레이션 결과이다. 본 연구에서는 TrainSim의 신뢰성을 평가하기 위해 $data_{exp}$ 는 normal로, $data_{base}$ 는 schedule로 설정하여 $TimeDifference_{t,j}$ 를 계산하였다.

$$MAPE_t = \frac{100}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \left| \frac{TimeDifference_{t,j}}{Y_j^{(t,data)}} \right|$$
(2)

n_t : 열차 t 가 정차하여 승객승하차를 한 역의 수

Eq. (2)는 정차역마다 $TimeDifference_{t,j}$ 가 상이할 수 있다는 점을 고려하여, 개별 열차의 예측 오차를 백분율 기준으로 평가할 수 있는 MAPE 수식을 나타낸다. 이때 각 열차는 여러 정차역을 지나므로, $TimeDifference_{t,j}$ 를 사용하여 해당 열차가 정차한 모든 역에서의 도착 시각의 차이를 계산한 뒤, 이를 평균 내어 열차 단위의 예측 오차를 계산하였다.

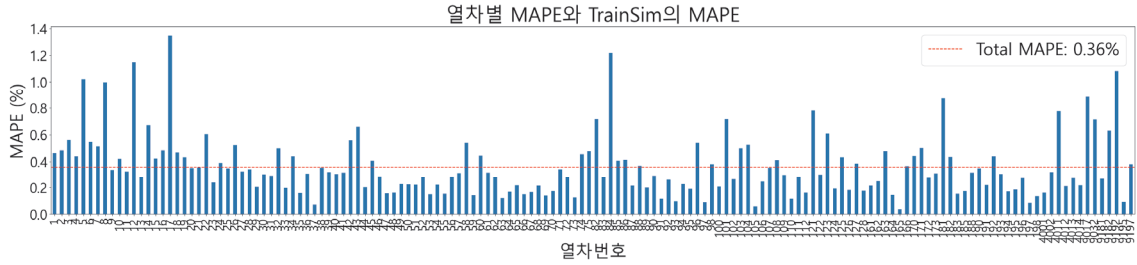


Fig. 10. MAPEs of all trains

$$Total\ MAPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T MAPE_t \quad (3)$$

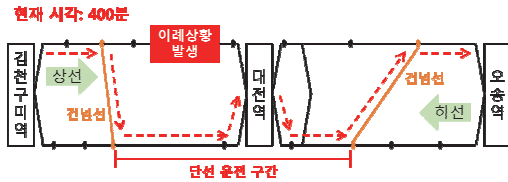
T : 전체 열차 수

Eq. (3)은 각 열차의 MAPE를 평균 내어 전체 열차의 MAPE를 나타냈으며, 이를 통해 전체 시뮬레이션에 대한 MAPE를 측정할 수 있도록 하였다.

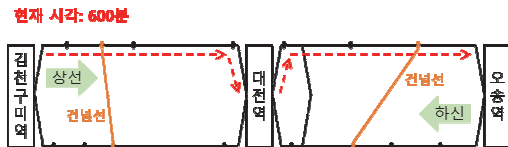
분석 결과는 Fig. 10에 나타난 것과 같이 열차별 MAPE를 막대그래프로 시각화하여 나타냈으며, 전체 열차에 대한 MAPE는 0.36%로 계산되었다.

4.2 이례상황 결과 분석

본 연구에서 사용한 단선 운행 시나리오는 400분에 김천구미역-대전역 구간 상선에서 이례상황이 발생하였으며, 복구를 위해 200분이 소요되는 것으로 설정하였다. 이는 Fig. 11에서 시각적으로 표현하였다.



(a) Single track operation from minute 400 due to unusual situation



(b) Train operation after recovery from the unusual situation at minute 600

Fig. 11. Single Track Operation Unusual Scenario

(a)는 이례상황으로 인한 단선 운행을 보여준다. 상행 열차는 상선을 사용할 수 없으며, 건넌선을 사용하여 하행 선로로 이동한 후 대전역까지 단선 운전 구간을 통해 대전역에 도착하게 된다. 이후 대전역부터 단선 운전 구간을 운행한 후 건넌선을 사용하여 원래 선로로 복귀하고, 기존 스케줄대로 운행을 재개하게 된다. (b)는 이례상황이 복구된 이후 열차 운행을 보여준다. 상행 열차들은 건넌선을 사용하지 않고 스케줄된 경로를 따라 운행하게 된다.

Fig. 12는 열차가 이례상황 없이 스케줄에 따라 정상적으로 운행하는 정상상황과, 이례상황 발생 시나리오에서의 시뮬레이션 결과를 비교하여 열차별 운행 시각 차이를 막대그래프로 나타낸 것이다. 이는 Eq. (1)을 사용하여 계산하였으며, 연한색 막대그래프는 열차별 종착역의 도착 시각 차이를 나타낸다. 진한색 막대그래프는 열차가 이례상황이 발생한 대전역과 김천구미역을 통과하는 데 소요된 시각의 차이를 나타내며, 두 역의 도착 시각의 변화를 기준으로 계산하였다.

시뮬레이션 결과, 열차들은 Table 3.에 제시된 바와 같이 총 6가지 유형으로 분류할 수 있었으며, 각 열차의 운행 시각 차이와 운행 과정을 미시적 관점에서 분석할 수 있었다.

복구 대기 열차로는 4번 열차(상행 열차)가 확인되었다. 이례상황이 발생한 400분에 4번 열차는 건넌선을 이미 통과하였기 때문에, 사용 가능한 건넌선이 없었다. 이로 인해, 이례상황이 복구될 때까지 대기하여 김천구미역-대전역 구간에서 정상상황 대비 200.96분의 지연이 발생하였다. 그러나, 전체 열차 운행 구간에서는 1.51분 감소하여 199.45분 지연된 것으로 나타났다. 이는 이례상황이 복구된 후 4번 열차가 운행을 재개했을 때, 앞서 달리고 있는 선행 열차가 이미 멀리 이동해 있었기 때문에 열차 간격이 충분히 확보되어 정상상황 대비 더 빠른 속도로 운행할 수 있었기 때문으로 분석된다.

Table 3. Six Types of Train Delay Categories

열차 지연 유형	설명
복구 대기 열차	이용 가능한 건널선이 없어, 이례상황이 복구될 때까지 대기해야 하는 열차
건널선 이용 열차	건널선을 이용해 단선 운전 구간으로 진입하여 이례상황 구간을 우회하는 열차
역방향 대기 열차	단선 운전 구간의 교행 운행으로 인해 대기하게 되는 열차
건널선 대기 중 운행 재개 열차	건널선 이용을 위해 대기하던 중 이례상황이 복구되어 기존의 스케줄대로 운행을 할 수 있게 된 열차
반복 지연 열차	편성번호 내 먼저 운행된 열차의 지연으로 인해 지연이 발생한 열차
간접 영향 열차	다른 열차 운행 유형에 속하지 않고, 정상상황과 이례상황 간 종착역 도착 시각에 차이가 있는 열차

건널선 이용 열차의 대표 사례로는 6번 열차(상행 열차)가 있다. 이 열차는 이례상황 발생 구간을 우회하기 위해 건널선을 사용해야 했다. 이를 위해 5.46분 동안 대기 후 CTC의 교행 운행 통제를 받아 건널선을 이용하여 대전역까지 단선 운전 구간을 통해 운행하였다. 이와 동시에 역방향 대기 열차인 75번 열차(하행 열차)는 6번 열차가 대전역까지 단선 운전 구간을 사용하고 있었기 때문에, 12.9분 동안 대기하였다. 이후, 6번 열차가 대전역에 도착한 후, CTC는 75번 열차가 교행 운행에 따라 대전역부터 단선 운전 구간을 통해 운행할 수 있도록 통제하였다. 6번 열차는 승객승하차 후 CTC로부터 교행 운행 통제를 받아 단선 운전 구간의 운행을 시작하였고, 이

로 인해 역방향 대기 열차인 7번 열차(하행 열차)는 운행하지 못하고 8.46분 동안 대기하게 되었다. 6번 열차가 단선 운행 구간을 모두 통과한 후, CTC의 교행 운행에 따라 7번 열차는 대전역까지 운행을 시작하였다. 이러한 과정은 건널선을 통한 이례상황 발생 구간의 우회와 단선 운전 구간 내 교행 운행으로 인한 열차 간 상호 지연 현상을 보여준다.

건널선 대기 중 운행 재개 열차로는 10번 열차(상행 열차)가 확인되었다. 10번 열차는 건널선을 이용하고자 하였지만, 선행 열차인 8, 84, 170, 102번 열차가 건널선 진입을 위해 CTC의 통제를 받아 대기하고 있었기 때문에, 69.5분 동안 대기한 것으로 확인되었다. 또한 모든 선행 열차가 건널선을 이용한 후, 10번 열차는 CTC의 교행 운행 통제에 따라 건널선을 이용하지 못하고 추가로 22.76분 동안 대기함을 확인하였다. 하지만 이례상황이 복구되면서 CTC는 정상 운행을 재개하도록 통제하여 10번 열차는 건널선 이용 없이 기존 스케줄대로 운행을 시작하였다. 이에 10번 열차는 대전역-김천구미역 구간에서 총 97.73분의 지연이 발생하였다. 이러한 과정은 건널선 이용 대기과 교행 운행 통제로 인해 지연이 누적되는 상황과 이례상황의 복구 시 열차의 운행 과정을 보여준다.

반복 지연 열차의 대표 사례로는 편성번호 1C1033에 속한 42번 열차(상행 열차)가 있다. 12번 열차(상행 열차)는 편성번호 1C1033에서 42번 열차보다 먼저 운행되었으며, 10번 열차의 후행 열차였다. 10번 열차가 건널선 이용을 위해 대기하면서, 12번 열차는 10번 열차와의 간격 유지를 위해 대기해야 했다. 이로 인해 12번 열차는 종착역 도착이 늦어졌고, 반복열차인 42번 열차의 출발

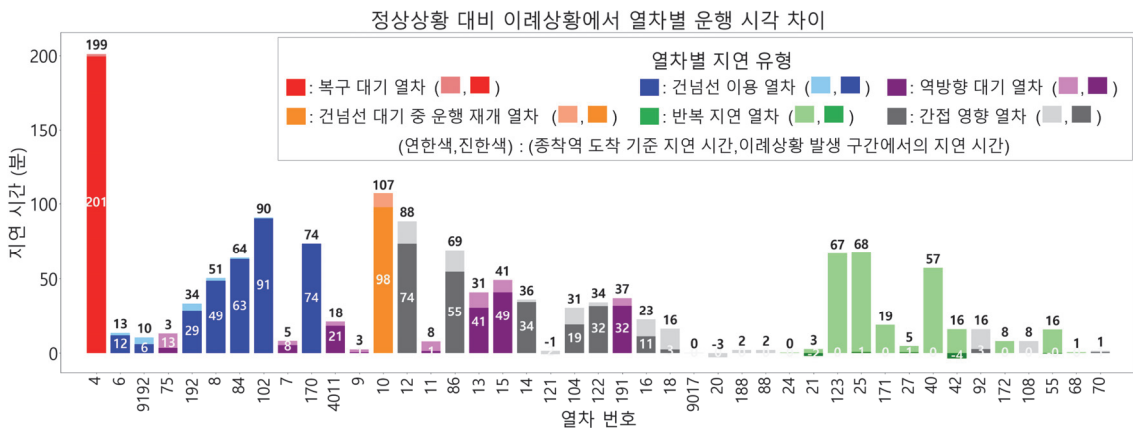


Fig. 12. Train-wise Operation Time Difference Between Normal and Unusual Scenarios

에 영향을 미쳤다. 42번 열차는 정상상황일 때 부산역에서 895분에 출발했으나, 이례상황인 경우에는 909.51분에 출발하게 되어 14.51분 출발이 지연됨을 확인하였다. 또한 42번 열차는 대전역-김천구미역 구간을 정상상황과 달리 선행 열차가 없어 정상상황보다 3.5분 일찍 통과한 것으로 확인되었다.

간접 영향 열차는 크게 두 가지 경우로 구분된다. 하행 열차의 경우, 전체 열차 운행 구간에서 발생한 운행 시각 차이에 대하여 121번 열차는 정상상황 대비 0.72분 빠르게 종착역에 도착하였고, 9017번 열차는 0.3분 느리게 종착역에 도착한 것을 확인하였다. 이는 주변 열차들의 운행 변경으로 인해 간접적인 영향을 받은 결과로 분석된다. 상행 열차의 경우, 선행 열차들이 건널선 이용을 위해 대기 중인 상황에서, 선행 열차와의 간격 유지가 필요하기에 대기하게 된 열차들로 확인하였다. 이를 통해 이례상황 구간 외부에서도 열차 간 운행 간섭으로 인한 간접적인 지연이 발생할 수 있음을 보여준다.

이러한 분석 결과를 통해, 열차 운행은 단일한 원인에 의해 발생하는 단순한 현상이 아니라, 열차 통제 방식과 건널선 사용, 단선 운전 구간에서의 교행 운행 방식, 선행 열차의 위치 등 다양한 운행 조건이 복합적으로 작용하여 발생하는 현상임을 파악할 수 있었다. 특히, 열차 간 상호작용에 따라 운행 시각의 차이가 발생하며, 지연이 발생하기도 하지만 반대로 더 빨리 역에 도착하는 경우도 존재함을 함께 파악할 수 있었다. 또한 각 열차의 운행 데이터를 미시적으로 추적함으로써, 열차별 지연 발생 시점과 운행 과정을 분석할 수 있었으며, 이를 통해 열차의 지연이 다른 열차에 미치는 영향과 지연의 전파 과정을 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 이례상황 발생 시 열차 지연을 예측하여 열차 통제에 대한 의사결정을 지원하기 위해 M&S를 적용하였다. 이를 위해 DEVS 형식론 기반의 시뮬레이션 모델인 TrainSim을 개발하고, 실제 열차 운행 데이터를 활용하여 모델을 구현하였다. 스케줄 상 도착 예정 시각과 시뮬레이션 결과의 차이를 기반으로 MAPE를 계산하여 모델의 신뢰성을 검증한 결과, 전체 열차에 대한 MAPE는 0.36%로 나타났다. 또한 시뮬레이션 결과, 단선 운행 이례상황 시나리오에서 열차 지연의 흐름을 미시적 관점에서 분석하여, 열차별 운행 시간의 변화를 확인하고, 지연 시간을 예측할 수 있었으며, 열차의 운행 방식과 상황

에 따른 지연의 유형 및 지연의 전파 과정을 파악할 수 있었다.

본 연구의 의의는 열차 지연에 대한 양적인 예측에 그치지 않고, 시뮬레이션을 통해 각 열차의 운행 과정을 분단위로 추적하며, 지연이 발생하고 전파되는 과정을 미시적으로 분석하여 지연이 확대되고 완화되는 과정을 파악할 수 있었다는 점에 있다.

이러한 분석 결과는 향후 이례상황 발생 시 열차 지연의 유형별 통제 방안 수립과 우선순위 설정 등 실질적인 철도 관제 의사결정에 기여할 수 있으며, 장기적으로는 지연 최소화를 위한 정책적, 운영적 대응 전략 마련에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

References

1. Balci, O., "A life cycle for modeling and simulation", *Simulation*, Vol. 88, No. 7, pp. 870-883, 2012.
2. Cha, M. H., Lee, J. K., and Beak, J. G., "An Operation Simulation of MAGLEV using DEVS Formalism Considering Traffic Wave", *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 20, No. 3, pp. 89-100, 2011.
3. Cho, N. S., "Simulation-based Optimization and Optimization-aided Simulation for M&S", *Journal of the military operations research society of Korea*, Vol. 4, No. 2, pp. 33-41, 2016.
4. Choi, S. H., Choi, P. J., Chang, W. D., and Lee, J. H., "A Digital Twin Simulation Model for Reducing Congestion of Urban Railways in Busan", *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 23, No. 10, pp. 1270-1285, 2020.
5. Choi, S. Y., "VV&A Application for the Assurance of Defense M&S Credibility", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 60-71, 2006.
6. Dekker, M. M., "Geographic delay characterization of railway systems", *Scientific Reports*, Vol.11, No. 1, 20860, 2021.
7. Gwon, J. S., 2023 National R&D Trends in Land, Infrastructure and Transport: Summary Report, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp. 1-124, 2024.
8. Harrod, S., Cerreto, F., and Nielsen, O.A., "A closed form

- railway line delay propagation model”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 102, pp. 189-209, 2019.
9. Ji, S. B., Kang, I. S., Oh, S. M., and Byeon, J. G., Development of a Commercial Train Operation Planning System Using Advanced IT Technology: Final Report, 11-B552989-000393-01, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp. 1-259, 2021.
10. Lee, S. G., Yun, S. J., Kim, H. J., and Kim W. T., “H-DsM: Distributed Simulation Middleware with HILS for Hybrid System Verification”, *Journal of IKEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 1073-1078, 2018.
11. Park, B. H., “Appraisal of Train Repetition Plan Considering Train Delays using Microscopic Train Operation Simulation”, *Journal of the Korean Society for railway*, Vol. 25, No. 2, pp. 141-150, 2022.
12. Park, S. G., 2021 National R&D Trends in Land, Infrastructure and Transport - Railway Sector -, 11-B552989-000635-11, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp. 1-113, 2022.
13. Suo, L., Liu, L., Su, Z., Cai, S., Han, Z., and Bao, F., “A Reliable Low-Latency Multipath Routing Algorithm for Urban Rail Transit Ad Hoc Networks”, *Sensors*, Vol. 23, No. 12, 5576, 2023.
14. Wales, J., and Marinov, M., “Analysis of delays and delay mitigation on a metropolitan rail network using event based simulation”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 52, pp. 52-77, 2015.
15. Zeigler, B. P., Praehofer, H., and Kim, T. G., *Theory of modeling and simulation*, Academic press, 2000.



길 준 혁 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0000-7388-9419> / gjhkms00929@koreatech.ac.kr)

2025 한국기술교육대학교 산업경영학부 학사

2025~ 현재 한국기술교육대학교 산업경영학과 석사과정

관심분야 : 운영 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 강화학습



이 상 화 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0006-0001-8771> / tkdghk4110@koreatech.ac.kr)

2020~ 현재 한국기술교육대학교 산업경영학부 학사과정, 혁신경영전공

2024~ 현재 DSC 공유대학 모빌리티 ICT 융합학부 모빌리티 SW/AI 융합전공

관심분야 : 운영 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 인공지능



권 수 영 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0009-3405-2590> / sooyoung.kwon@korail.com)

2010 상명대학교 컴퓨터과학과

2015 동국대학교 전자전기공학과 박사

2023~ 한국철도공사 디지털융합본부

관심분야 : 디지털신호처리, 디지털영상처리, 딥러닝, 인공지능



배 장 원 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4681-5059> / jangwon_bae@koreatech.ac.kr)

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사

2009 한국과학기술원 전자공학과 석사

2015 한국과학기술원 산업및시스템공학과 박사

2015~ 2020 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원

2020~ 2023 한국기술교육대학교 산업경영학부 조교수

2023~ 한국기술교육대학교 산업경영학부 부교수

관심분야 : 시스템 분석 및 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 인공지능