

열차 지연 예측을 위한 DEVS 기반 시뮬레이션 모델 개발

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

길준혁, 이상화, 배장원
한국기술교육대학교 산업경영학부
{gjhkms00929, tkdghk4110, jangwon_bae}@koreatech.ac.kr

Abstract

Train operations are scheduled, but various unusual events in the railway system can cause delays. In particular, train delays can trigger delays in the operations of other trains, leading to inefficient operations. To effectively address this, it is necessary to predict and analyze delays caused by such unusual events. In this study, we developed a simulation model based on the DEVS formalism, utilizing railway system data to predict train delays caused by unusual events. Through this, we confirmed the potential use of simulation as a method for predicting train delays and supporting decision-making.

1. 서론

철도는 대중교통의 중요한 축으로, 고속 대중교통 수단으로서 대규모 승객 수송과 화물 운송에 큰 역할을 담당하고 있다. 특히 대한민국은 운영 효율성, 교통 혼잡 해소, 안전하고 편리한 이용환경 조성 등을 주요 추진 방향으로 수립함에 따라 고속·일반·광역 철도망을 전국적으로 확대하고 있다[6]. 하지만 신호 시스템 오류, 선로 장애와 같은 기술적 문제뿐만 아니라 자연재해, 인적 오류 등 다양한

원인으로 인해 철도 운행이 중단되거나 지연되는 상황이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 상황은 예측하기 어려운 사고나 비상상황과 같은 이례상황을 초래하여 철도 운영에 큰 지장을 준다. 이는 열차 운행 지연이 누적되어 후속 열차 운행에도 큰 영향을 미칠 수 있으며, 승객들의 불편을 증가시킬 뿐만 아니라 경제적 손실로 이어질 수 있다[3].

따라서 본 연구에서는 이례상황 발생 시 열차의 지연 시간을 예측하여 효과적인 의사결정을 지원하기 위해 시뮬레이션의 활용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 열차 운행 및 관제 과정을 미시적 관점에서 모델링을 하였으며, 각 열차가 철도 네트워크에서 개별적으로 운행되고 통제될 수 있도록 DEVS 형식론 (Discrete Event Systems Specifications) [1] 기반의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이션 결과 실제 운행 데이터와 비교하여 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)가 0.62%로 낮은 오차율을 보였으며, 이례상황 발생 시 열차별 운행 유형 및 지연시분을 확인할 수 있었다. 이는 시뮬레이션을 통해 이례상황에 대응하기 위한 다양한 방안의 효과성을 사전에 검토하여 실질적인 의사결정에 기여할 수 있을 것을 기대한다.

2. 이론적 배경 및 선행 연구

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된
지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다

2.1 이론적 배경

2.1.1 핵심 개념 정의

이례상황은 열차 또는 철도 시설에 대하여 인적 또는 물적으로 내부 요인이나 외부 요인에 의하여 정상적이지 못한 상태가 발생한 경우를 의미한다[9]. 하선은 서울을 시점으로 하여 종점으로 운행하는 방향의 선로를 의미한다. 상선은 종점을 서울로 하여 운행하는 방향의 선로를 의미한다. 열차 운전은 기관사가 기기 조작을 통해 열차를 움직여 출발지부터 목적지까지 안전하게 도착시키는 행위를 의미한다. 운행은 열차가 스케줄에 맞춰 선로를 따라 이동하는 전체 과정을 의미한다. 건널선은 병행하는 두 선의 선로 간에 열차나 차량이 건너갈 수 있도록 연결한 선로를 의미한다. 교호시스템은 인접 교차로 간 신호가 정반대로 켜지는 시스템을 의미하며, 여기서 교차로는 건널선을 의미한다. 편성은 열차를 운행하기 위해 정해진 차량의 수만큼 연결을 완료한 열차를 의미한다. 반복열차는 편도 열차 운행이 종료된 후, 운행되는 다음 열차를 의미한다[7]. 본 논문에서는 특정 편성에 여러 열차가 존재하며, 편성 내 첫 번째 열차의 운행이 종료되면 다음 운행 열차는 반복열차가 되어 스케줄에 따라 운행되는 데이터를 사용하였다.

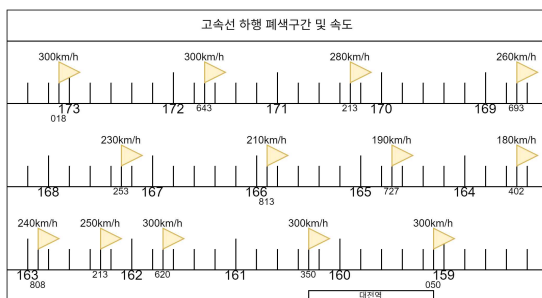


그림 1. 고속선 하행 폐색구간 및 속도

그림 1은 대전역에서 하행 방향으로의 폐색구간 및 통제 속도를 나타낸 그림이다. 폐색구간은 열차의 충돌 또는 추돌을 방지하기 위해 하나 이상의 열차가 동시에 진입할 수 없도록 일정한 거리로 분할한 선로 구간을 의미한다[4]. 폐색구간에서는 신호기를 통해 열차의 최대 속도를 통제하며, 폐색구간 및 역의

위치 정보는 키로정을 사용하여 나타낸다. 키로정은 서울역을 기준으로 특정 지점까지의 거리를 km 단위로 나타낸 것이다. 그림 1에서 키로정의 정수 부분은 큰 글씨로, 소수 부분은 작은 글씨로 표현되어 있다.

2.1.2 열차 운행 프로세스

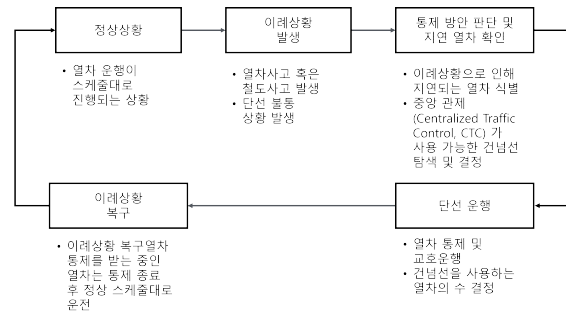


그림 2. 열차 운행 통제 프로세스

정상상황은 이례상황 없이 정상적으로 운행되는 것을 의미하며, 구체적으로 열차가 정해진 스케줄에 따라 역간 이동과 승객 승하차를 진행하는 것을 의미한다. 그러나 이례상황으로 인해 하선 혹은 상선의 이용이 불가하여 단선 운행을 하게 되는 상황이 발생하면, 그림 2의 프로세스를 따른다. 중앙 관제(Centralized Traffic Control, CTC)는 지연되는 열차를 식별하고 사용 가능한 건널선을 결정한다. 이후 몇 대씩 교호 운행을 할 것인지 판단하여 이례상황이 종료될 때까지 교호 운행 방식으로 통제한다. 이례상황이 복구된 후에는 모든 열차가 정상 운행을 재개하며, 교호 운행 중이던 열차도 교호 운행 통제가 끝난 후 정상 운행으로 복귀한다.

2.1.3 단선 운행 프로세스

그림 3은 그림 2의 단선 운행에 대한 열차 운행의 구체적인 프로세스를 나타낸다. 이례상황으로 인해 운행이 불가한 열차는 반대 선로로 이동이 가능한 건널선을 이용하여 이례상황이 발생한 구간을 우회한 후, 열차 운행을 이어간다.

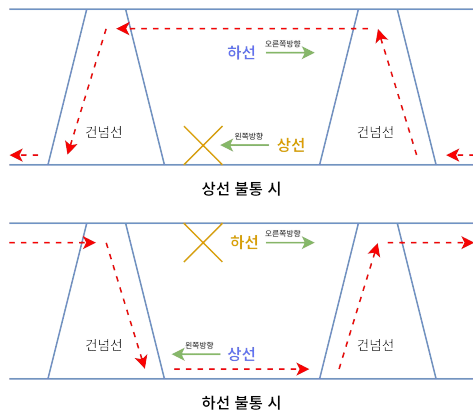


그림 3. 단선 운행 프로세스

2.2 선행 연구

열차 운행과 지연 분석을 위해 시뮬레이션 기술을 적용한 다양한 연구들이 수행되어 왔다.

차무현 등[8]은 실제 열차 운행 시에는 예측과 달리 다양한 요인으로 인해 수송 수요에 대한 시간적, 시기적 파동이 생길 수 있으며, 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.

Joseph Wales 등[2]은 지하철 서비스는 열차 지연 문제를 오랜 기간 겪어왔으나, 지연의 영향력 및 최소화 방안에 대한 연구는 현저히 적음을 확인하였다. 이에 지연 완화 전략을 분석 및 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하여 지연 최소화 방안의 식별 및 테스트, 실현 가능성에 대한 평가를 진행하였다.

최선한 등[10]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 낮출 수 있는 배차 계획을 도출하였다.

박범환[5]은 열차 운행패턴이 복잡해짐에 따라 체계적이고 최적화된 열차 스케줄을 작

성하는 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.

선행 연구와 달리 본 연구에서는 이례상황이 발생하여 단선 운행이 필요한 상황에 중점을 두고 있으며, 이로 인해 발생하는 지연의 예측에 집중하였다. 또한 열차 운행 스케줄의 탐색 및 개선이 아닌 철도 네트워크 상에서 열차 운행을 통제 및 관리할 수 있도록 DEVS 형식론 기반의 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 개발

본 연구에서는 실제 서울역-부산역 구간 경부고속선의 모든 정차역과 폐색구간을 표현하여 철도 네트워크를 구성하였다. 열차 운행 스케줄은 서울역과 부산역을 시·종착역으로 하는 KTX 차종을 선별하여 확보하였으며, KTX, KTX-산천, KTX-이음, KTX-청룡의 제원 차이를 고려하여 각 가·감속 성능을 다르게 표현하였다. 또한 이례상황 데이터는 한국철도공사가 제공하는 단선 불통에 대한 과거 사고 데이터를 사용해 시나리오 형태로 재구성하여 사용하였다.

3.1 DEVS 기반 열차 지연 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 DEVS 형식론을 기반으로 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 이를 TrainSim이라 명명하였다. 열차 운행 및 관제 과정의 시뮬레이션을 위해 세 가지 주요 요소로 철도 네트워크, 열차, 이례상황을 고려하였다. 철도 네트워크는 개별 열차가 각 운행 스케줄에 따라 이동할 수 있도록 구성된 기반 환경이다. 이례상황이 발생한 경우, 철도 네트워크에서 운행되고 있는 열차들이 영향을 받을 수 있도록 구성하였다. 이를 최소화하고 열차 운행의 효율성을 유지하기 위해 CTC를 사용하였다. CTC는 철도 운영에

서 다수의 열차를 통합적으로 제어하는 시스템으로 이례상황의 영향을 받는 열차가 경로를 변경하거나 속도를 조절하여 열차 지연이 최소화될 수 있도록 통제할 수 있다. 열차는 철도 시스템에서의 이동 수단으로, 정해진 운행 스케줄에 따라 철도 네트워크에서 운행되는 주체이다. 운행 스케줄에는 이동 경로뿐만 아니라 이동 시간 정보를 포함하고 있어 지연의 발생 유무와 정도를 파악할 수 있다. 또한 이례상황은 크게 철도 네트워크에서 발생하는 철도 사고와 특정 열차에서 발생하는 열차 사고로 구분할 수 있으며, 모두 열차 운행을 지연시키는 결과를 초래한다.

3.2 TrainSim의 결합 모델

그림 4는 TrainSim의 결합 모델(Coupled

Model, CM)을 나타낸다. 3.1절에서 설명한 철도 네트워크, 열차, 이례상황은 각각 그림 4에서 Network, TrainSet, Unusual로 표현되었다. Network 원자 모델(Atomic Model, AM)은 각 열차가 역에서 출발하여 움직이는 모든 과정을 표현한 모델이다. 내부에 CTC가 존재하기 때문에 이례상황이 발생했을 때 열차의 운행과 관련된 모든 실질적인 통제를 담당한다. TrainSet AM은 열차의 편성을 나타내며, 편성마다 개별 모델이 존재한다. 이는 각 편성에 포함된 열차의 스케줄에 따라 운행과 승객 승하차를 진행한다. Unusual AM은 이례상황 시나리오를 기반으로 특정 상황을 철도 네트워크에 발생시키는 역할을 한다.

3.3 TrainSim의 원자 모델

TrainSim

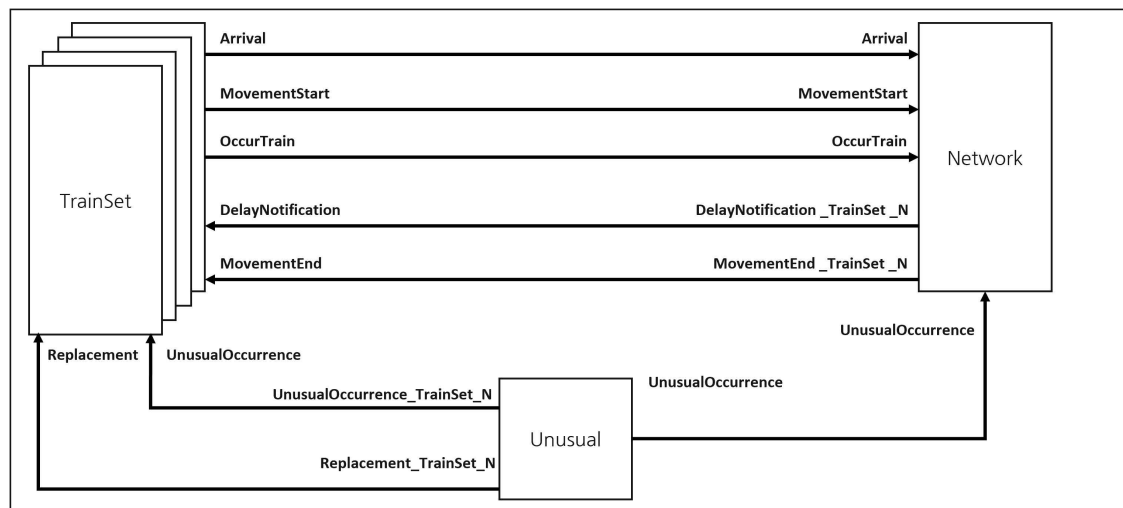


그림 4. TrainSim의 결합 모델 (Coupled Model, CM) 다이어그램

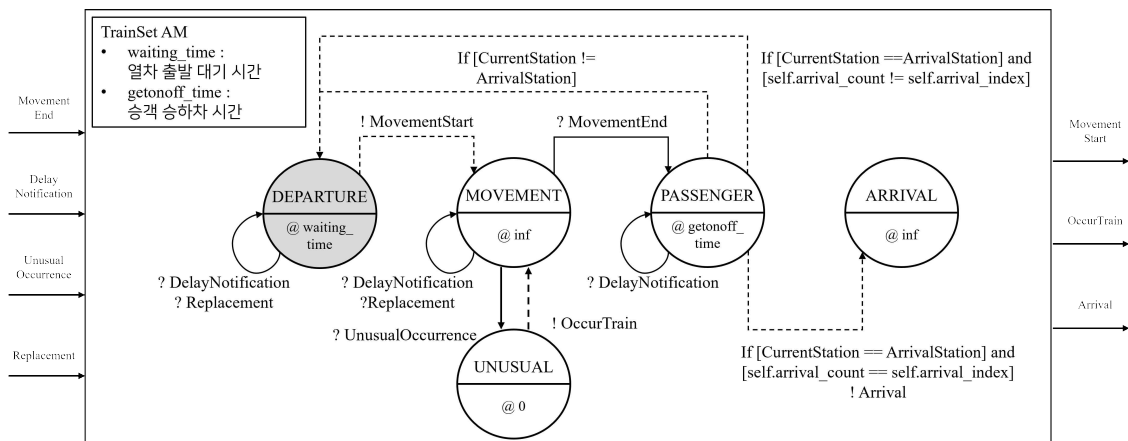


그림 5. TrainSim의 TrainSet 원자 모델(Atomic Model, AM) 다이어그램

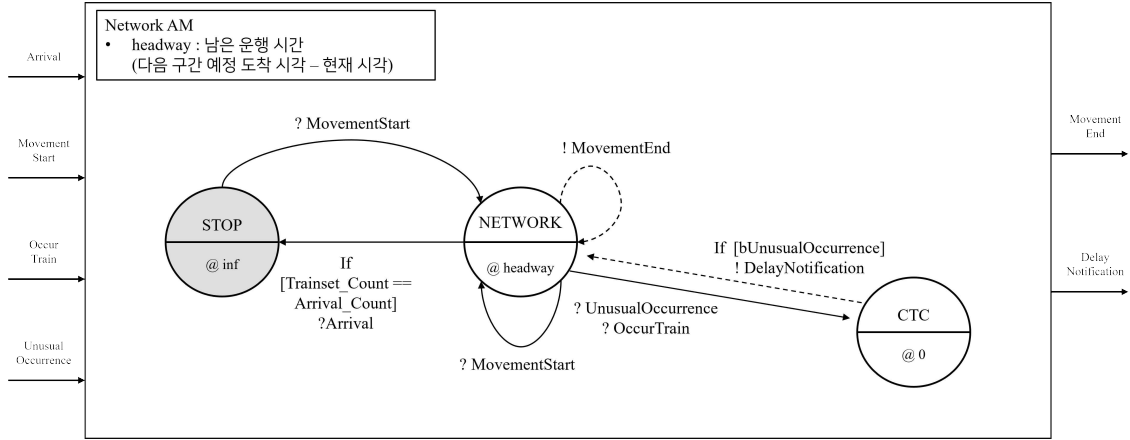


그림 6. TrainSim의 Network 원자 모델(Atomic Model, AM) 다이어그램

3.3.1 TrainSet AM

그림 5는 TrainSim의 TrainSet AM 모델링을 나타낸다. 각 편성 내 열차는 스케줄에 따라 역에서 `waiting_time` 동안 대기한 후 역간 이동을 시작하기 때문에 TrainSet AM의 초기 상태를 DEPARTURE로 설정하였다. 열차가 역간 이동을 시작하면, MovementStart를 출력하며, 이에 따라 TrainSet AM의 상태는 MOVEMENT로 상태전이 된다. MovementEnd 입력을 받으면, PASSENGER로 상태전이 되어 `getonoff_time` 동안 승객의 승하차가 이루어진다. 승하차 이후 열차가 종착역에 도착하지 않았다면 상태는 다시 DEPARTURE로 천이되고 열차는 다음 정차역으로 이동을 시작한다. 반면, 열차가 종착역에 도착한 경우라면, 편성 내 다음 열차가 스케줄에 따라 출발한다. 만약 편성 내 모든 열차가 종착역에 도착한 경우라면, ARRIVAL로 상태천이 되어 Network AM에게 해당 편성의 운행이 종료되었음을 알린다. 또한, 이례상황 중 열차 사고가 발생한 경우, UnusualOccurrence를 입력받게 되며, 열차 사고를 전달하기 위해 OccurTrain을 출력한다.

3.3.2 Network AM

그림 6은 TrainSim의 Network AM의 모델링을 나타낸다. 초기 상태는 Network AM에 열차가 존재하지 않은 상태를 의미하는 STOP으로 설정하였으며, MovementStart를 입력받으면 NETWORK로 상태천이 된다. NETWORK 상태에서는 모든 열차의 운행을 관리하며, 현

재 운행 중인 열차들 중 예상 도착시간이 가장 빠른 열차의 남은 운행 시간인 headway를 활용하여, 열차가 역이나 특정 폐색구간에 도착함을 확인한다. 예상 도착시간은 현재 열차가 위치한 폐색구간의 이동이 완료될 것으로 예상되는 시간을 의미한다. 열차가 역에 도착하면 MovementEnd를 출력하여 역간 이동이 완료되었음을 알린다. 모든 편성의 운행이 종료되면, STOP 상태로 천이되어 시뮬레이션이 종료된다. 한편, 이례상황 중 철도 사고 발생 시 Unusual AM으로부터 UnusualOccurrence를 입력받고 열차 사고가 발생하면 TrainSet AM으로부터 OccurTrain을 입력받는다. 이때 NETWORK에서 CTC로 상태천이 되며 이례상황의 영향을 받는 열차들의 예상 도착시간을 조정 한 후, NETWORK 상태로 다시 천이한다.

3.3.3 Unusual AM

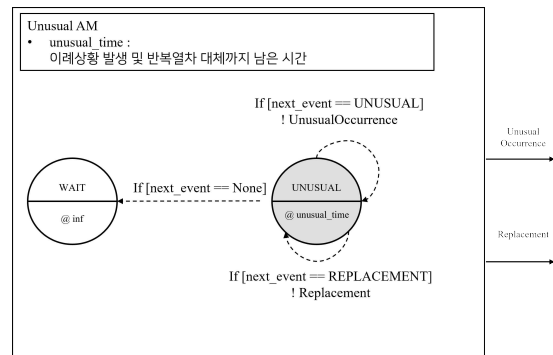


그림 7. TrainSim의 Unusual 원자 모델(Atomic Model, AM) 다이어그램

그림 7은 TrainSim의 Unusual AM 모델링을 나타낸다. 이례상황은 시나리오에 따라 발생하므로 Unusual AM의 초기 상태는 UNUSUAL로 설정하였다. 시뮬레이션이 시작되면, Unusual AM은 발생 예정인 next_event를 확인한다. next_event가 이례상황이면, 이례상황 발생 시각에 맞춰 unusual_time을 설정한다. unusual_time이 경과하면, 철도 사고의 경우 Network AM으로, 열차 사고인 경우 TrainSet AM으로 UnusualOccurrence 출력을 보내어 이례상황을 발생시킨다. 만약 발생 예정인 next_event가 없다면, WAIT 상태로 천이 된다.

4. 시뮬레이션 결과 검증 및 분석

TrainSim의 신뢰도를 정량적으로 평가하기 위해 시뮬레이션 결과의 검증이 필수적이다. 본 연구에서 사용한 검증 데이터는 고속 열차의 하루 운행 편성 데이터를 사용하였다. 전체 2,155대 열차 중 시·중착역이 서울역과 부산역인 열차를 선별하고 정차 사유가 통과인 역은 제외한 후, 기타 전처리 과정을 거쳐 최종적으로 150대 열차 데이터를 사용하였다.

$$MAPE = \frac{100}{|T_N|} \sum_{i \in T_N} \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|$$

T_N : 열차번호집합

Y_i : i 번 열차의 스케줄 상 운행 시간

$\hat{Y}_i$: i 번 열차의 정상상황 시뮬레이션 상 운행 시간

수식 1. MAPE 계산 수식

검증 지표는 열차 지연의 예측 오차율을 측정하고 다양한 지연의 크기에 관계 없이 절

대적인 차이를 비교하기 위해 수식 1과 같이 MAPE를 사용하였다. MAPE는 각 열차의 도착역을 기준으로 스케줄과 시뮬레이션 상 운행 시간의 차이를 백분율로 측정하기 때문에 이례상황으로 인한 열차 운행의 변동성을 고려할 수 있으며, 열차 지연 예측에 대한 신뢰도를 효과적으로 검증할 수 있다.

4.1 정상상황 검증

$$(Average Delay Difference) = \frac{1}{|T_N|} \sum_{i \in T_N} (\hat{Y}_i - Y_i)$$

T_N : 열차번호집합

Y_i : i 번 열차의 스케줄 상 운행 시간

$\hat{Y}_i$: i 번 열차의 정상상황 시뮬레이션 상 운행 시간

수식 2. 평균 운행 시간 차이 계산 공식

본 연구에서는 TrainSim의 기본 열차 운행 프로세스에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 정상상황인 경우, 도착역을 기준으로 시뮬레이션 상 운행 시간과 스케줄 상 운행 시간의 차이를 계산하여 검증을 진행하였다. 평균 운행 시간 차이는 수식 2와 같이 계산하였다. 운행 시간 차이의 계산 결과는 평균 -1.34분, 최대 33.58분, 최저 -17.26분으로 측정되었으며, 이는 시뮬레이션 시간이 스케줄 시간보다 평균 1.34분 빠르다는 것을 의미한다. 또한 수식 1을 통해 MAPE를 측정한 결과는 그림 8에 제시되었으며, 0.62%로 계산되었다. 이는 시뮬레이션 결과의 오차가 0.62%에 불과하다는 의미로 해석될 수 있다. 이를 통해 정상상황에서 TrainSim의 결과는 낮은 오차율을 보이며 실제 열차 운영을 신뢰성 있게 재현하였음을 확인하였다.

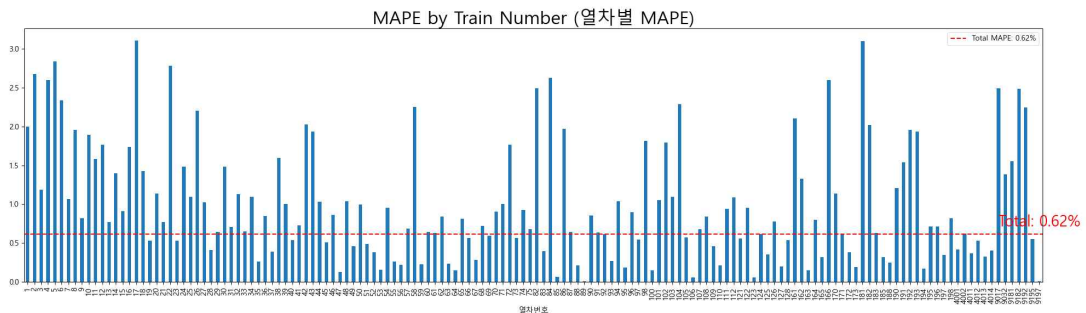


그림 8. 열차별 MAPE (Mean Absolute Percentage Error) 그래프

4.2 이례상황 결과 분석

표 1. 단선 운행 이례상황 시나리오

유형	발생 시간	선로	발생 구간	복구 시간
철도 사고	400 (분)	상선	P3418~P3404	200 (분)

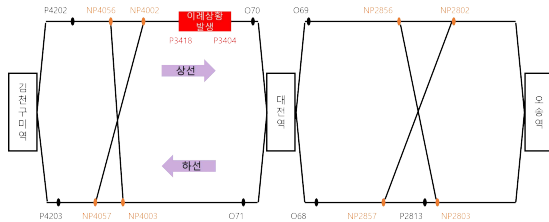


그림 9. 단선 운행 이례상황 시나리오 상황

본 연구에서 사용한 단선 운행 시나리오는 표 1에 요약되어 있으며, 그 내용을 그림 9에서 시각적으로 표현하였다. 시나리오는 400분에 김천구미역-대전역 구간 상선 중 폐색구간 P3418~P3404에서 이례상황이 발생하며, 복구를 위해 200분이 소요되는 것으로 설정하였다. 이로 인해 상행 열차는 상행선을 사용할 수 없으며, 건넌선(NP4056, NP4003)을 사용하여 하행 선로로 이동한 후 대전역에 도착하게 된다. 이후 건넌선(NP2857, NP2802)을 사용하여 원래 선로로 복귀하고, 기존 스케줄대로 운행을 재개하게 되는 단선 운전으로 진행된다.

$$\text{정상상황대비지연} = T_{\text{single}} - T_{\text{normal}}$$

T_{single} : 열차별 단선운전 시간

T_{normal} : 열차별 정상운전 시간

수식 3. 정상상황대비지연 계산 수식

그림 10는 이례상황 시나리오에서 정상상황 대비 열차별 지연 시간을 나타낸 누적 지연 그래프이며, 수식 3과 같이 계산하였다. 그림 10의 막대그래프는 지연이 발생한 열차에 대해서 지연시분을 나타낸 것이며, 이례상황이 발생한 김천구미역-대전역 구간에서의 지연을 각 막대그래프의 아래쪽에 추가로 표시하였다. 시뮬레이션 결과, 열차별 운행 유형은 6가지로 구분할 수 있었다. 복구 대기 열차는 건넌선을 지나친 열차로, 이례상황이 복구될 때까지 대기해야만 한다. 4번 열차는 복구 대기 열차로 200분 동안 지연된 것을 확인하였다. 건넌선 이용 열차는 건넌선을 이용하게 되는 열차를 의미하며, 반대 방향 선로를 사용하기 때문에 건넌선 대기 후 교호 운행을 수행하는 열차이다. 역방향 대기 열차는 해당 선로에 이례상황이 발생하지 않았지만, 교호 운행으로 인해 대기하게 되는 열차를 의미한다. 건넌선 대기 중 운행 재개 열차는 건넌선 대기 중 이례상황이 복구되어 기존의 스케줄대로 운행을 할 수 있게 된 열차를 의미한다. 10번 열차는 건넌선 대기 중인 4대 열차로 인해 상대적으로 큰 지연이 발생했음을 확인하였다. 반복 지연 열차는 편성 내 다른 열차의 지연으로 인해 지연이 발생한 반복열차로, 김천구미역-대전역 구간에서 지연이 거의 발생하지 않았음을 확인하였다. 간접 영향 열차는 스케줄된 경로 내에서 직접적인 이례상황이 발생하지 않았으나, 복구 대기 중인 열차로 인해 더 이상 운전이 불가하여 이례상황의 영향을 간접적으로 받게 되는 열차를 의미한다. 이 열차는 이례상황에 의해 직접적으로 지연된 열차가 아니므로, 반

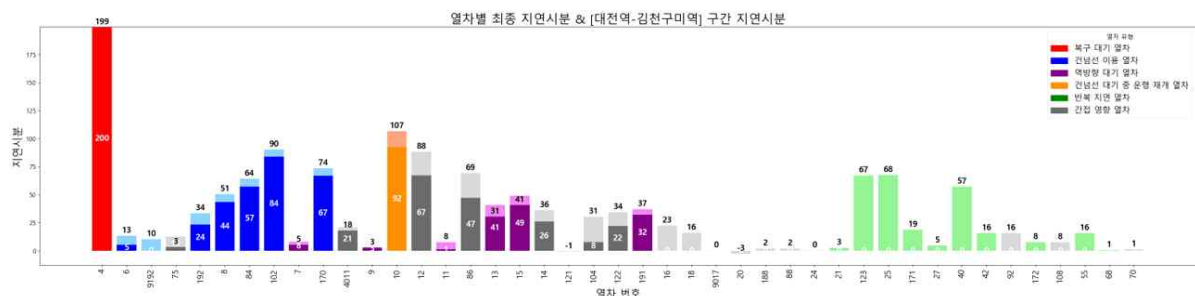


그림 10. 단선 시나리오 정상상황 대비 열차별 지연 시간 결과

북 지연 열차를 제외한 다른 지연 열차들에 비해 김천구미역-대전역 구간 이외의 구간에서 발생한 지연이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 이례상황 발생 시 열차 지연을 예측하고 효과적인 의사결정을 위해 시뮬레이션의 활용 가능성을 확인하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 DEVS 형식론 기반의 시뮬레이션 모델을 개발하고 실제 열차 운행 데이터에 적용하였다. 정상상황을 대상으로 한 검증은 통해, 시뮬레이션 결과는 실제 운행 데이터와 비교하여 낮은 오차율을 보였으며, 이례상황 시나리오에 대한 결과 분석을 통해 열차별 지연시분을 예측할 수 있었다. 특히, 시뮬레이션을 통해 각 운행 유형별 특징 및 지연의 과정을 분석할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 개발한 TrainSim 모델은 다양한 이례상황 시나리오에 대해 특정 통제 방법을 적용했을 때 발생하는 열차 지연을 분석하는 데 유용할 수 있다. 이를 통해 실질적인 대응 전략 수립에 기여할 수 있음을 기대할 수 있다. 특히 이 모델은 이례상황 발생 시 열차 운행 조정 및 지연 최소화에 중요한 도구로 활용될 수 있다. 또한 교호 운행과 같은 철도 네트워크의 통제 방식 및 이례상황 복구 대기 시간 등 다양한 요인에 따른 각 열차의 운행 과정을 상세히 파악함으로써 열차 지연의 영향력을 보다 정교하게 평가할 수 있음을 기대할 수 있다. 추후 연구로는 단선 이례상황 뿐만 아니라 다양한 유형의 이례상황에 대한 열차 지연 예측이 가능하도록 이례상황 시나리오의 범위를 확장하는 것이 필요하다. 또한 건넌선을 이용하는 것뿐만 아니라 우회 경로 설정, 교호 운행의 통제 열차 수 조정 등 다양한 지연 완화 방안을 시뮬레이션에 적용하여 열차 지연을 줄일 수 있는 방안을 더욱 폭넓게 탐색할 필요가 있다. 이를 통해 다양한 상황에서 여러 통제 방법을 비교·분석하고, 최적의 통제 방법을 시뮬레이션을 통해 탐

색할 수 있도록 하는 것이 궁극적인 목표이다.

참고문헌

- [1] BERNARD P. ZEIGLER, HERBERT PRAEHOFFER & TAG GON KIM. (2000). Theory of Modeling and Simulation. ACADEMIC PRESS.
- [2] Wales, J., & Marinov, M. (2015). Analysis of delays and delay mitigation on a metropolitan rail network using event based simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 52, 52-77.
- [3] 광래건 & 고유찬. (2023년 06월 17일). 전기 공급 장애로 KTX 운행 지연. 조선일보.
- [4] 국가철도공단. (n.d.). FAQ(자주 묻는 민원). 국가철도공단.
- [5] 박범환. (2022). 미시적 열차 운행 시뮬레이션을 이용한 열차 지연을 고려한 열차 반복 계획 평가. 한국철도학회 논문집, 25(2), 141-150.
- [6] 박승기. (2022). 2021 국토교통 R&D 동향 조사 -철도교통 분야. (11-B552989-000635-11). 국토교통과학기술진흥원.
- [7] ㈜지오엔티, 한국철도기술연구원, 경상대학교, (주)에스알. (2021). 첨단 IT기술에 의한 열차운행계획의 상용화 시스템 개발. (20RTRP-C148789-03). 국토교통부 국토교통과학기술진흥원.
- [8] 차무현, 이재경, & 백진기. (2011). 승객 유동을 고려한 DEVS 기반 자기부상열차 운행 시뮬레이션. 한국시뮬레이션학회 논문지, 20(3), 89-100.
- [9] 철도산업정보센터. (n.d.). 용어사전. 철도산업정보센터.
- [10] 최선한, 최필주, 장원두, & 이지환. (2020). 부산광역시 도시철도 혼잡도 완화를 위한 디지털 트윈 시뮬레이션 모델 개발. 멀티미디어학회논문지, 23(10), 1270-1285.