

비상대기열차 투입이 지연 전파에 미치는 영향에 관한 시뮬레이션 기반의 미시적 분석
Simulation-Based Microscopic Analysis of the Impact of
Emergency Standby Train Deployment on Delay Propagation

길준혁, 이상화, 배장원

한국기술교육대학교

gjhkms00929@koreatech.ac.kr

목 차

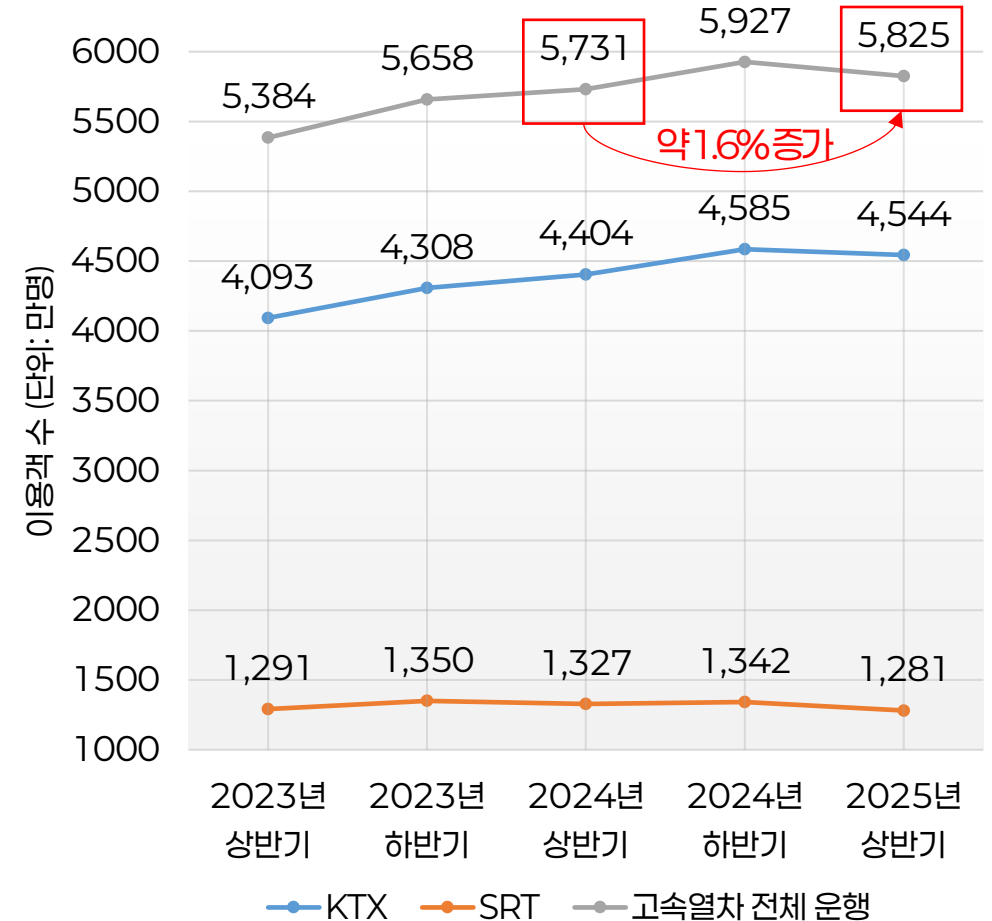
1. 서론
2. 열차 통제 방안
3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링
4. 시뮬레이션 검증 및 분석
5. 결론

1. 서론

1.1 연구 배경

- KTX와 SRT 등 고속열차 이용이 꾸준히 증가하고 있음
 - 25년 상반기 5,825만명이 고속열차를 이용한 것으로 집계
 - 24년 상반기 5,731만명 대비 약 1.6% 증가
 - 고속철도에 대한 국민적 수요가 꾸준히 증가
- ➔ 고속철도가 국민 일상 이동의 핵심 교통수단으로 자리매김하고 있음

고속열차 (KTX, SRT) 이용객 추이



1. 서론

1.1 연구 배경

- 국내 고속 열차는 하나의 편성이 다수의 운행 스케줄을 수행
 - 편성: 여러 차량이 물리적으로 연결된 열차의 단위
 - 각각 고유번호 를 부여받음
 - 하나의 편성은 복수의 운행 스케줄을 수행할 수 있으며, 각 스케줄은 서로 다른 열차번호를 부여받음
 - 반복열차: 동일한 편성번호로 연속 운행되도록 스케줄된 열차 (ex. 2번, 3번 열차)

편성번호	열차번호	출발역	출발 시각	종착역	종착 시각
1C1041	Train No.1	서울역	09:00	부산역	11:00
	Train No.2	부산역	11:30	서울역	13:30
	Train No.3	서울역	14:00	부산역	16:00

1. 서론

1.1 연구 배경

• 25년 1월 기준 고속열차 운행 현황

- 고속열차: 118편성 (KTX: 86편성, SRT: 32편성)
- 토요일 기준 운행 편성 수: KTX: 73편성, SRT: 28편성
- 토요일 기준 하루 운행 횟수: 431회
- ➔ 편성 한대당 하루에 평균 약 4.2회 운행 (평균적으로 3~4대의 반복열차가 존재)
- 나머지 편성은 사고, 장애 시 대체로 투입하기 위한 비상대기열차로 사용

KTX-1	KTX-산천	KTX-원강산천	KTX-청룡	SRT
46편성	24편성	14편성	2편성	32편성
1편성당 20량	1편성당 10량	1편성당 10량	1편성당 8량	1편성당 10량
승차정원 955명	승차정원 379명	승차정원 410명	승차정원 515명	승차정원 410명

운행 노선	차종	운행횟수
경부	KTX-1	111
	KTX-산천	14
	KTX-원강산천	2
	KTX-청룡	4
	SRT	80
호남/전라	KTX-1	47
	KTX-산천	19
	KTX-원강산천	33
	KTX-청룡	0
	SRT	44
경전/동해	KTX-1	18
	KTX-산천	47
	KTX-원강산천	4
	KTX-청룡	0
	SRT	8
합계		431회 KTX 299회 SRT 132회

출처: KORAIL / SRT / 철도경제, "신형 고속열차 31대 추가 제작... '좌석 예매난 해소될까?', 2025.06.17 <KTX: 'KTX 기대수명 도래에 따른 대체차량 도입과 정부 역할 방안 모색 토론회' 자료집 일부 재구성> <SRT: SR 제공자료 재구성, 5.2~6.30 주말 2편성 추가 투입 반영>

1. 서론

1.1 연구 배경

- **이례상황**: 인적, 물적 요인에 의해 열차 운행이 스케줄대로 진행되지 않는 상황
- **정상상황**: 이례상황 없이 열차 스케줄대로 운행되는 상황
- **비상대기열차의 활용**
 - : 이례상황 발생 시, 정상 운영을 최대한 빠르게 복구하기 위해 준비해 둔 예비 열차
 - **활용 이유**
 - **고장 열차 대체**: 고장 열차가 운행해야 하는 운행 스케줄을 수행
 - **심각한 지연 발생 시 시간표 복구**: 정상적인 열차 운행 스케줄을 수행하여 지연 확산을 막기 위해 수행
 - **혼잡 대응**: 수요가 폭등할 때(명절, 수능 등) 추가 열차를 긴급 투입해 혼잡도를 낮추기 위해 수행

➔ 비상대기열차를 활용하여 전체 노선으로 지연이 확산되는 것을 최소화할 수 있음

출처: KORAIL / SRT / 철도경제, “신형 고속열차 31대 추가 제작... ‘좌석 예매난 해소될까?’”, 2025.06.17 <KTX: ‘KTX 기대수명 도래에 따른 대체차량 도입과 정부 역할 방안 모색 토론회’ 자료집 일부 재구성> <SRT: SR 제공자료 재구성, 5.2~6.30 주말 2편성 추가 투입 반영>

1. 서론

1.2 문제 상황 및 연구 목적

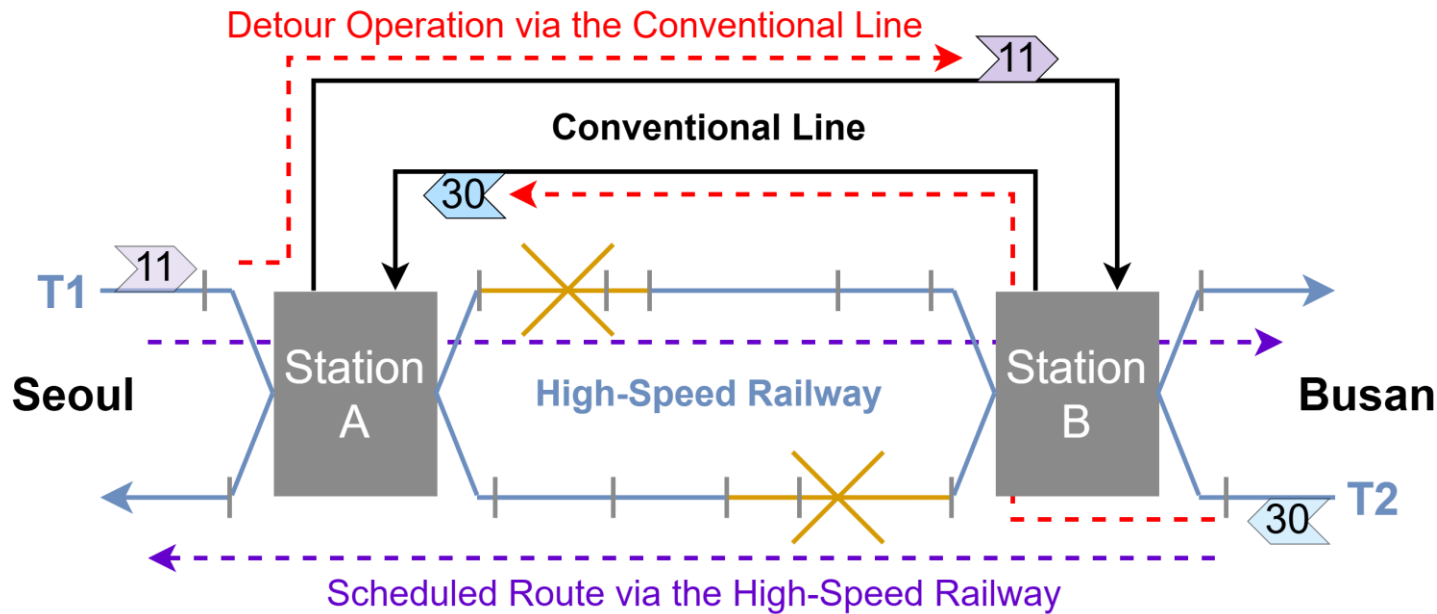
- 이례상황으로 인해 특정 열차에 지연이 발생
 - 평균적으로 편성 한대당 3~4대의 반복열차 스케줄이 존재
 - 해당 편성이 수행해야 하는 후속 스케줄은 연쇄 지연이 발생
 - ➔ 열차의 지연이 그대로 승계되어 편성 전체에 누적 지연이 확산되는 현상 발생
 - CTC (Centralized Traffic Control)의 역할
 - 이례상황 발생 시 열차 지연을 예측하고 완화시키기 위한 열차 운행 통제를 시행
 - 반복열차에 지연이 승계되는 것을 해결하기 위해 비상대기열차를 투입
- ➔ 지연 누적 및 확산 현상은 실제 노선 운영에서 큰 비용과 불편으로 이어지기 때문에, 이를 정량적으로 분석하고 완화 전략을 마련하는 것이 필요함

연구 목적

- 1) 이례상황 시 열차 지연을 예측
- 2) 비상대기열차 투입 유무가 전체 열차 운행 및 지연 전파에 미치는 영향을 미시적 수준에서 평가 및 분석

2. 열차 통제 방안

2.1 양방향 불통 시 일반선 우회 운행

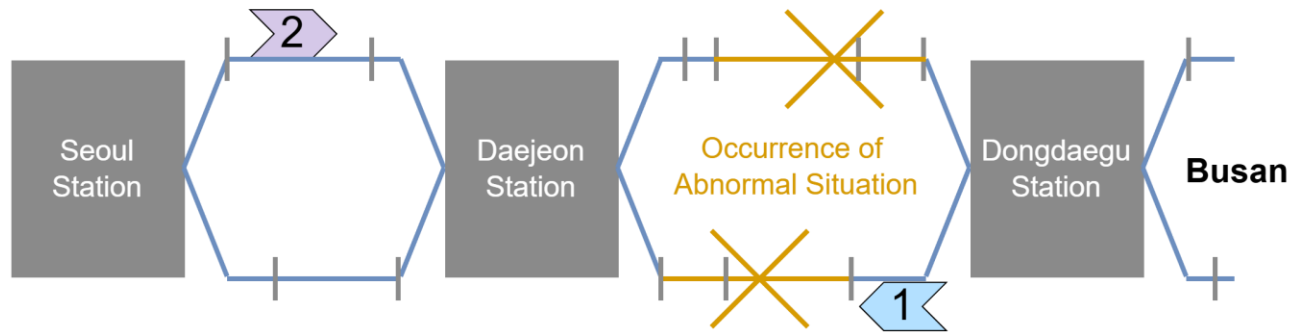


- 고속선의 상/하선이 모두 이례상황으로 인해 운행 불가인 경우
 - 일반선과 연결되어 있는 두 개의 역에 정차하는 스케줄을 가진 열차라면,
 - 일반선 사용하여 이례상황이 발생한 구간을 우회운행

- 폐색구간: 열차의 충돌 또는 추돌을 방지하기 위해 하나 이상의 열차가 동시에 진입할 수 없도록 일정한 거리로 분할한 선로 구간

2. 열차 통제 방안

2.2 비상대기열차 운행



Trainset No.1C1011			
Train Number	Departure Station	Departure Time	Arrival Time
1	Busan	200	400
2	Seoul	500	700

Trainset No.1D1011			
Train Number	Departure Station	Departure Time	Arrival Time
2	Seoul	500	700

Due to the delay of Train No.1,
Train No.2 is expected to be unable to depart at its scheduled departure time

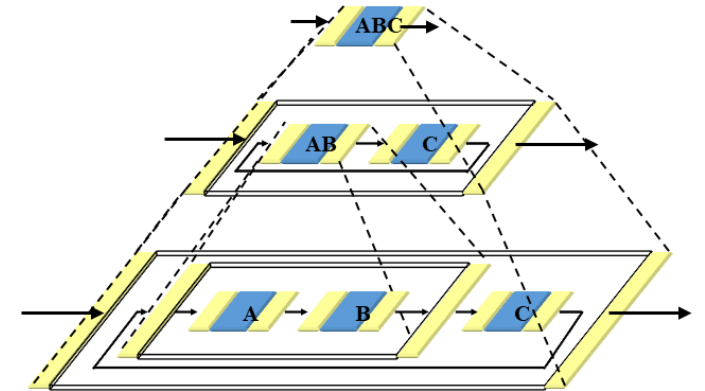
• 편성 내 선행열차의 지연으로 인해 반복열차로 지연이 승계되는 경우

- 편성 내 선행열차의 종착역 도착이 지연될 것으로 예상되면,
- 비상대기열차로 새로운 편성을 구성하여, 기존 편성에 속한 반복열차의 운행 스케줄을 새로운 편성이 수행하도록 변경
- 지연 승계되는 것 없이 반복열차가 기존 스케줄대로 운행될 수 있도록 조치

3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링

3.1 TrainSim 모델링 방법론

- TrainSim: 본 연구에서 개발한 DEVS 형식론 기반의 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델
- DEVS (Discrete Event Systems Specifications) 형식론 (Formalism)
 - 이산사건 시스템 기반 모델링 및 시뮬레이션 도구
 - 모델 구성
 - 원자 모델 (Atomic Model): 시스템 상의 분해 불가능한 컴포넌트 모델링
 - 결합 모델 (Coupled Model): 시스템 구성 컴포넌트 및 구조 모델링



$M = \langle X, Y, Q, \delta_{ext}, \delta_{int}, ta, \lambda \rangle$

X : 입력사건 집합;

Y : 출력사건 집합;

Q : 상태 집합;

$Q_T = \{(q, e) \mid q \in Q, 0 \leq e \leq ta(q)\}$;

$q_T = (q, e)$: 시간 명시 상태

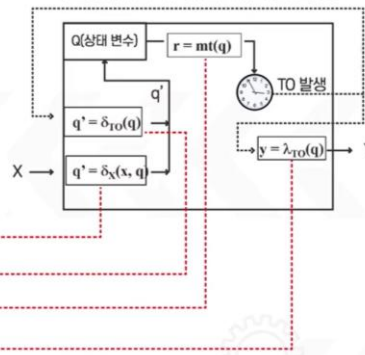
$\delta_{ext}: Q_T \times X \rightarrow Q$: 외부 상태전이 함수;

$\delta_{int}: Q_T \rightarrow Q$: 내부 상태전이 함수;

$ta: Q \rightarrow R(\text{실수 집합})$: 시간 전진 함수;

$\lambda: Q_T \rightarrow Y$: 출력 함수;

시스템이론적 이산사건 모델 M



$DN = \langle X, Y, M, EIC, EOC, IC, SELECT \rangle$

X/Y : 입/출력사건 집합;

M : DN 내부에 있는 모든 컴포넌트 DEVS 모델;

$EIC \subseteq DN.X \times \cup_i M_i.X_i$: 외부 입력 연결 관계;

$EOC \subseteq \cup_i M_i.Y_i \times DN.Y$: 외부 출력 연결 관계;

$IC \subseteq \cup_i M_i.Y_i \times \cup_j M_j.X_j$: 내부 연결 관계;

$SELECT: 2^M - \emptyset \rightarrow M$: 우선 이벤트 선택 규칙

EIC: External Input Coupling

EOC: External Output Coupling

IC: Internal Coupling

모델들의 연결 명세(CR)

[모델명.사건명, 모델명.사건명]

3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링

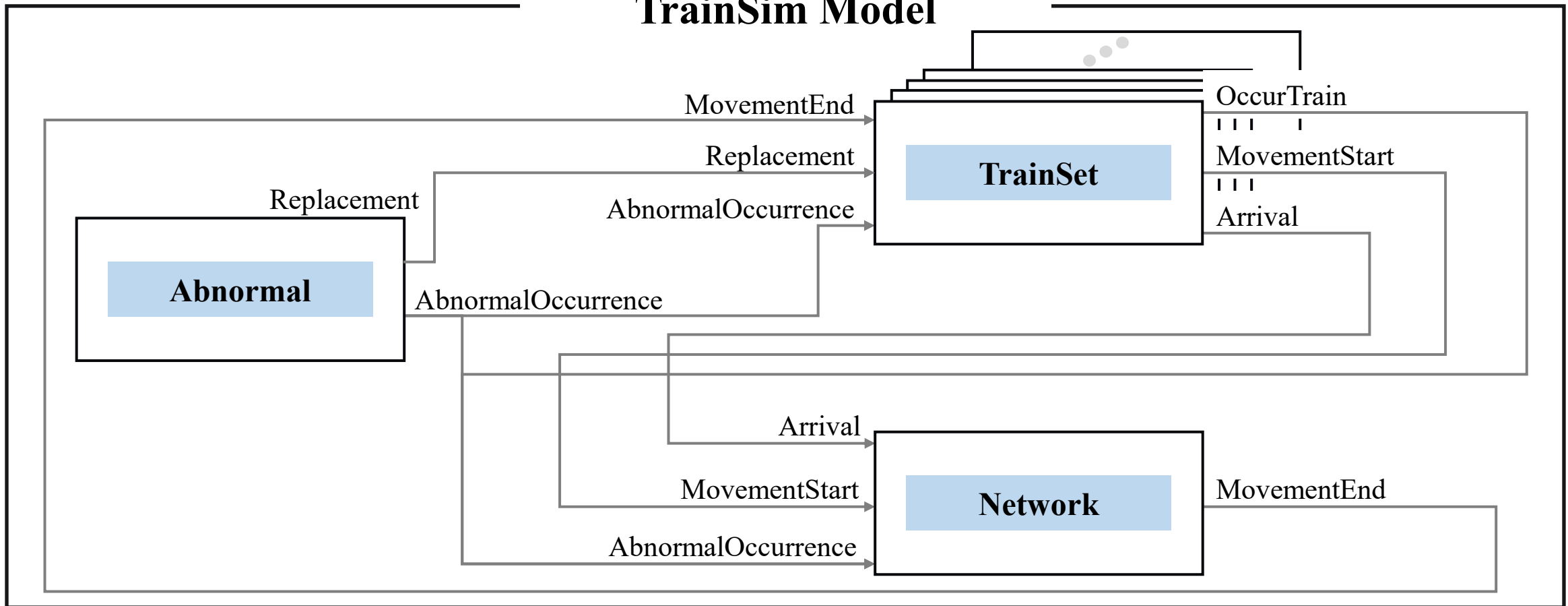
3.2 DEVS 형식론 기반 열차 지연 시뮬레이션 모델링

- TrainSim: 본 연구에서 개발한 DEVS 형식론 기반의 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델
- TrainSim 구성 주요 컴포넌트
 - **TrainSet Atomic Model (편성 원자 모델)**
 - 시점-종점으로 구성된 열차 스케줄을 수행하는 열차의 각 편성에 대한 모델
 - 하루동안 운행되는 고속 열차를 고려하며, 열차 종류에 따른 특성, 반복 열차 여부 등의 정보 포함
 - **Network Atomic Model (철도 네트워크 원자 모델)**
 - 철도 네트워크 구성 정보를 기반으로 열차의 운행을 나타내는 모델
 - 이례상황 발생 시, 열차 운행 통제를 담당하는 모델
 - **Abnormal Atomic Model (이례상황 원자 모델)**
 - 사용자 입력에 따른 이례상황을 발생시키는 모델
 - 비상대기열차 사용 시 열차의 스케줄을 TrainSet AM에 전달

3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링

3.3 TrainSim Coupled Model

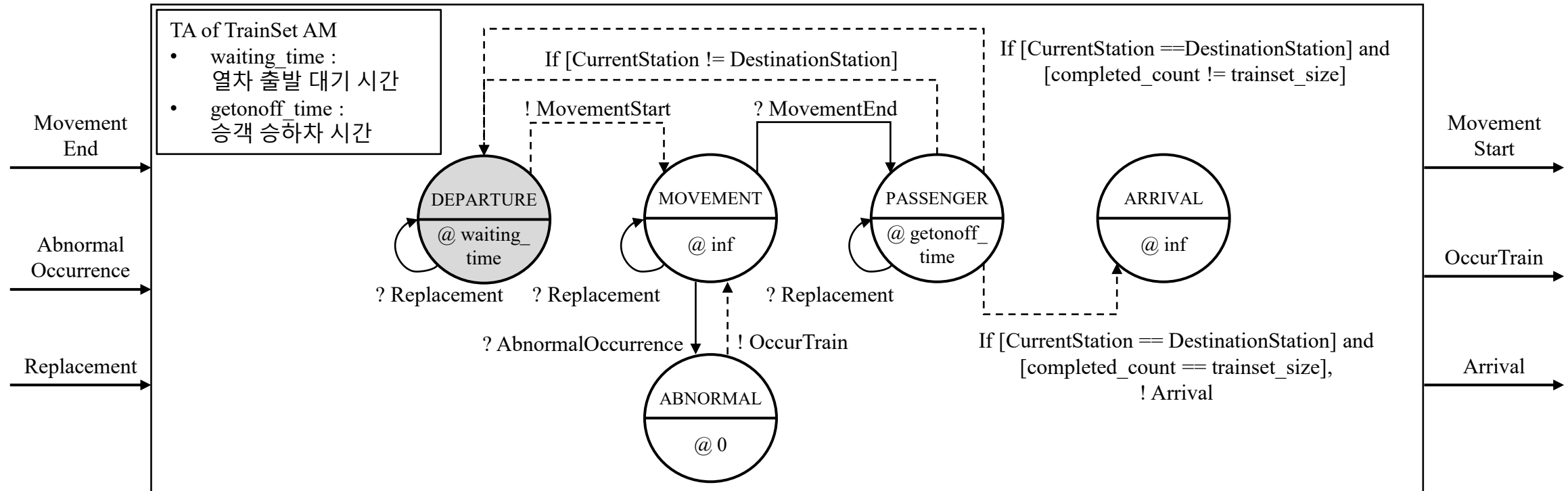
TrainSim Model



3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링

3.4 TrainSet Atomic Model

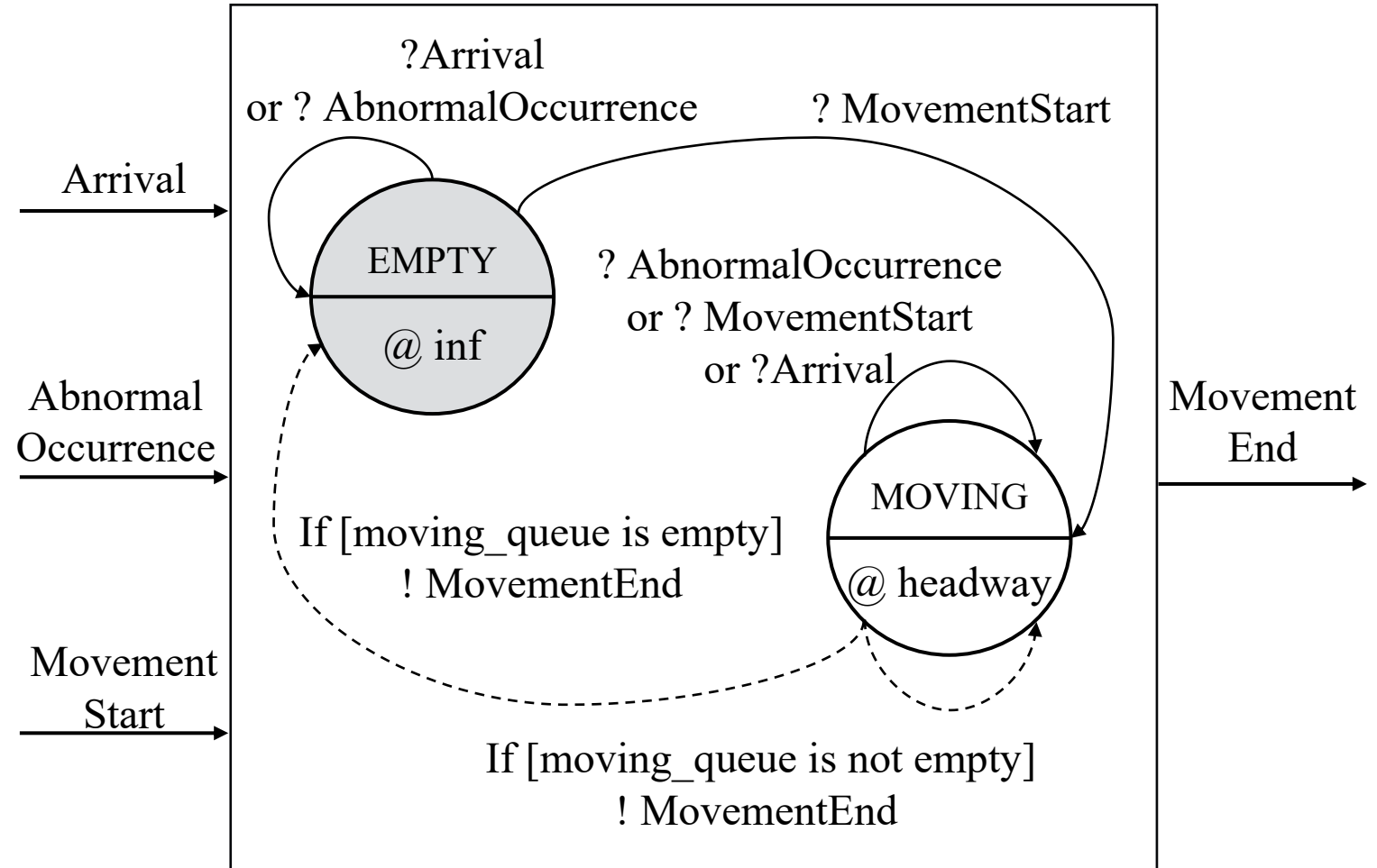
- 시점-종점으로 구성된 열차 스케줄을 수행하는 열차의 각 편성에 대한 모델
- 하루동안 운행되는 고속 열차를 고려하며, 열차 종류에 따른 특성, 반복 열차 여부 등의 정보 포함



3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링

3.5 Network Atomic Model

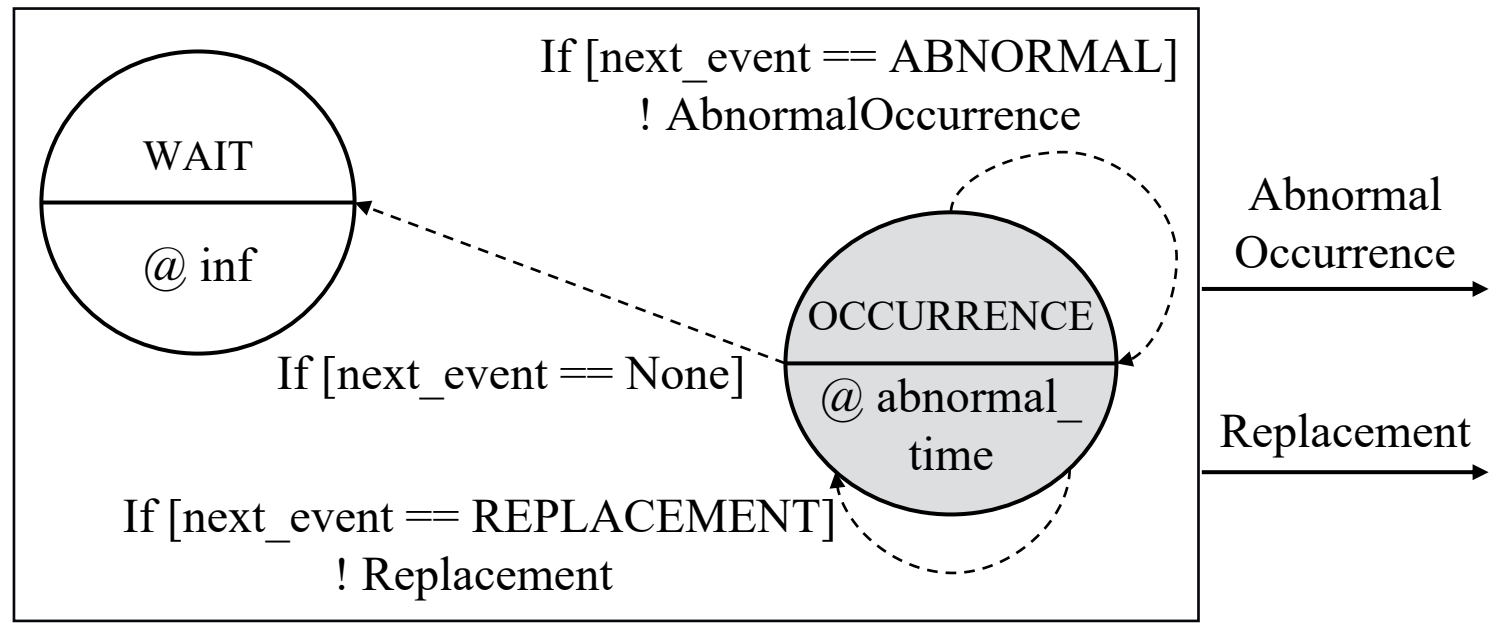
- 철도 네트워크 구성 정보를 기반으로 열차의 운영을 나타내는 모델
- 이례상황 발생 시, 열차 운영 통제를 담당하는 모델
- headway
 - 남은 운행 시간
(다음 구간 예정 도착 시각 - 현재 시각)



3. 열차 지연 예측 시뮬레이션 모델링

3.6 Abnormal Atomic Model

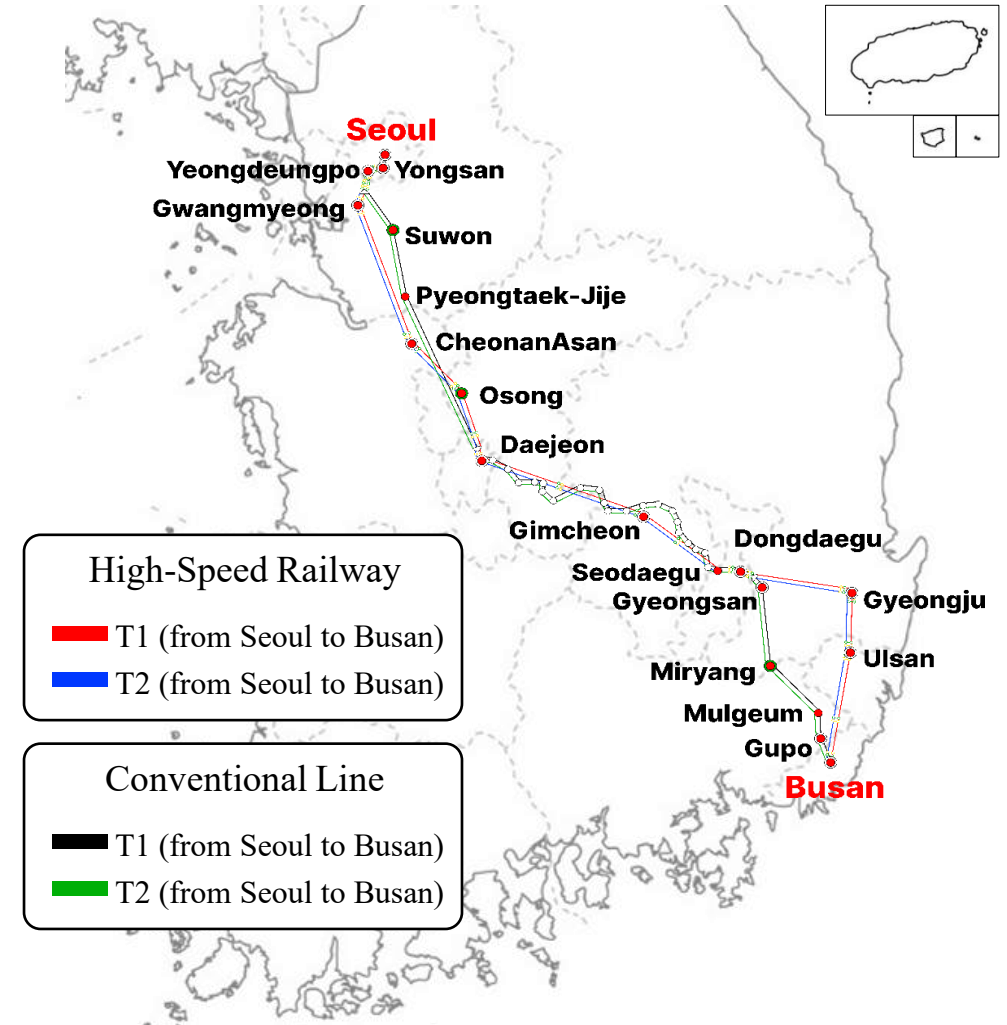
- 사용자 입력에 따른 이례상황을 발생시키는 모델
- 비상대기열차 사용 시 열차의 스케줄을 TrainSet AM에 전달
- abnormal_time
 - 이례상황 발생 혹은 반복열차 대체까지 남은 시간



4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.1 사용 데이터

- 구간: 서울역 ~ 부산역 경부고속선 및 경부선(일반)
- 열차종: KTX (KTX, KTX-산천, KTX-이음, KTX-청룡)
- 열차 운행 스케줄:
 - 고속 열차 하루 편성 데이터 (2024년 04월 11일) 사용
 - 총 150대 열차 데이터 사용
- 이례상황 데이터:
 - 2022~2023년 사고장애 통계 데이터 중
사용 가능한 사고에 대해 전처리한 후 시나리오화 하여 사용
 - 양방향 불통 시나리오를 만들어 사용



4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.2 시뮬레이션 검증

- TrainSim01 실제 열차 운영을 충분히 재현하는지 확인하기 위해 시뮬레이션 검증 수행
 - 시뮬레이션 결과와 Baseline과의 차이를 확인하기 위해 $\text{TimeDifference}_{t,j}^{(S,B)}$ 계산
 - t: 열차 번호
 - j: 열차 t가 정차하는 각 역에 대해 순차적으로 할당된 인덱스
 - B: Baseline 운영
 - S: Simulation 운영
 - D: 운영 데이터 집합
 - SCH: 스케줄되어 있는 열차 시간표(Timetable)
 - NOR: 정상상황에서의 시뮬레이션 결과
 - ABN: 이례상황에서의 시뮬레이션 결과
 - $Y_{t,j}^{(d)}$: d 운영 상황에서 열차 t가 j번째 역에 도착한 시각 ($d \in D$)
- $\text{TimeDifference}_{t,j}^{(S,B)} = Y_{t,j}^{(S)} - Y_{t,j}^{(B)}$
- $B, S \in D, \quad D = \{\text{SCH}, \text{NOR}, \text{ABN}\}$

4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.2 시뮬레이션 검증

- 검증지표: MAPE (Mean Absolute Percentage Error)

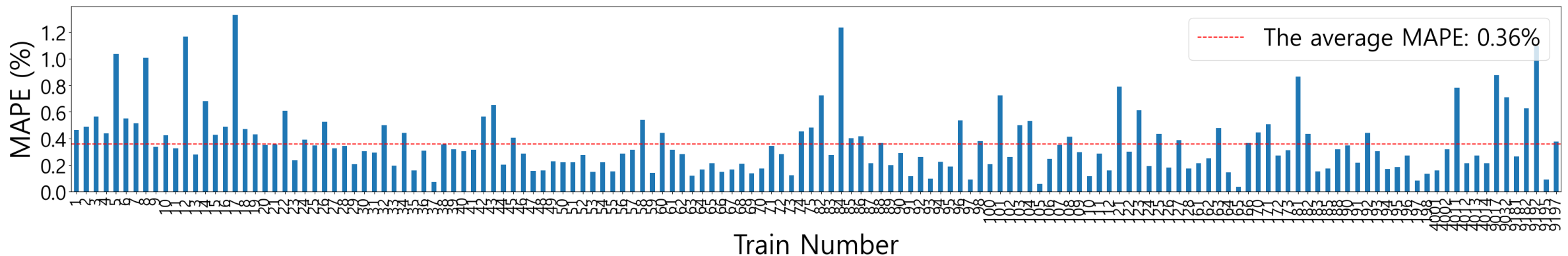
- 열차 지연에 대한 예측 오차율을 평가하기 위해 MAPE 사용
- 열차의 지연 규모가 다르기 때문에 (ex. 5분 지연된 열차, 100분 지연된 열차, 200분 지연된 열차 등)
예측 오차를 실제 지연 대비 상대적 비율로 환산하여 비교할 수 있는 MAPE가 적합

- 검증 결과 (정상상황):

- 전체 열차에 대한 MAPE는 $MAPE_t$ 를 평균내어 계산

$$MAPE_t = \frac{100}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \left| \frac{\text{TimeDifference}_{t,j}^{(NOR,SCH)}}{Y_{t,j}^{(SCH)}} \right|$$

- n_t : 열차 t가 정차하는 역의 수

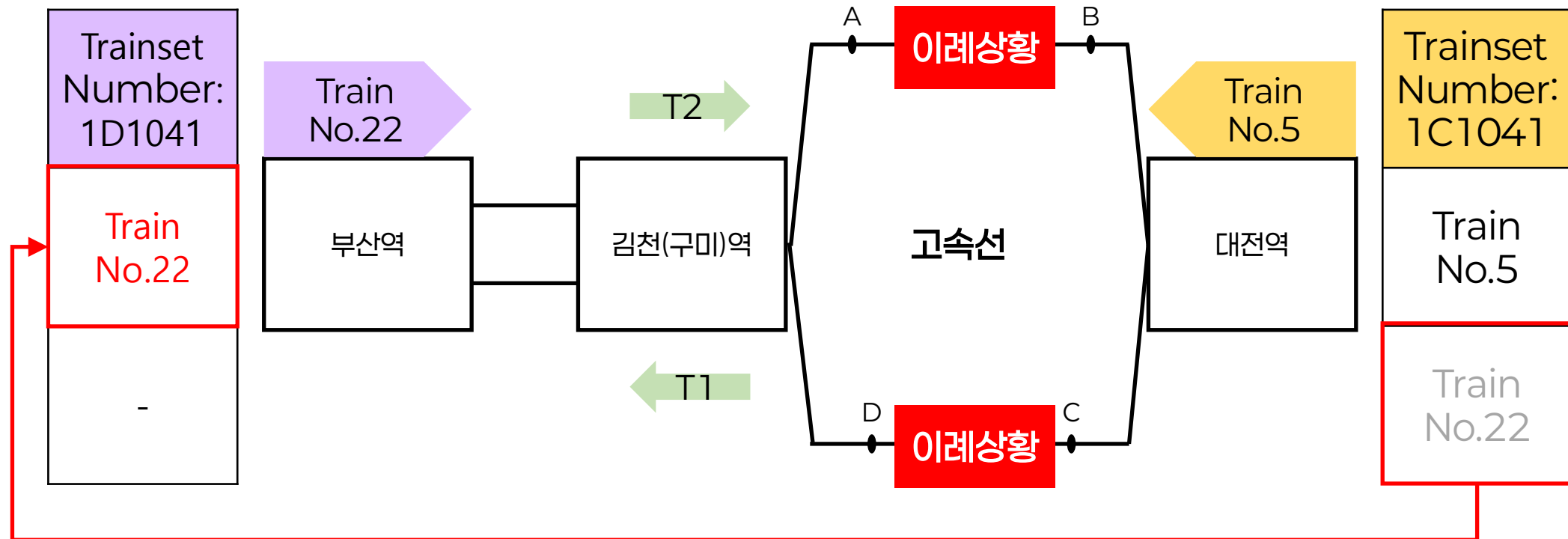


4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.3 양방향 불통 이례상황 시나리오

- 비상대기열차 운행

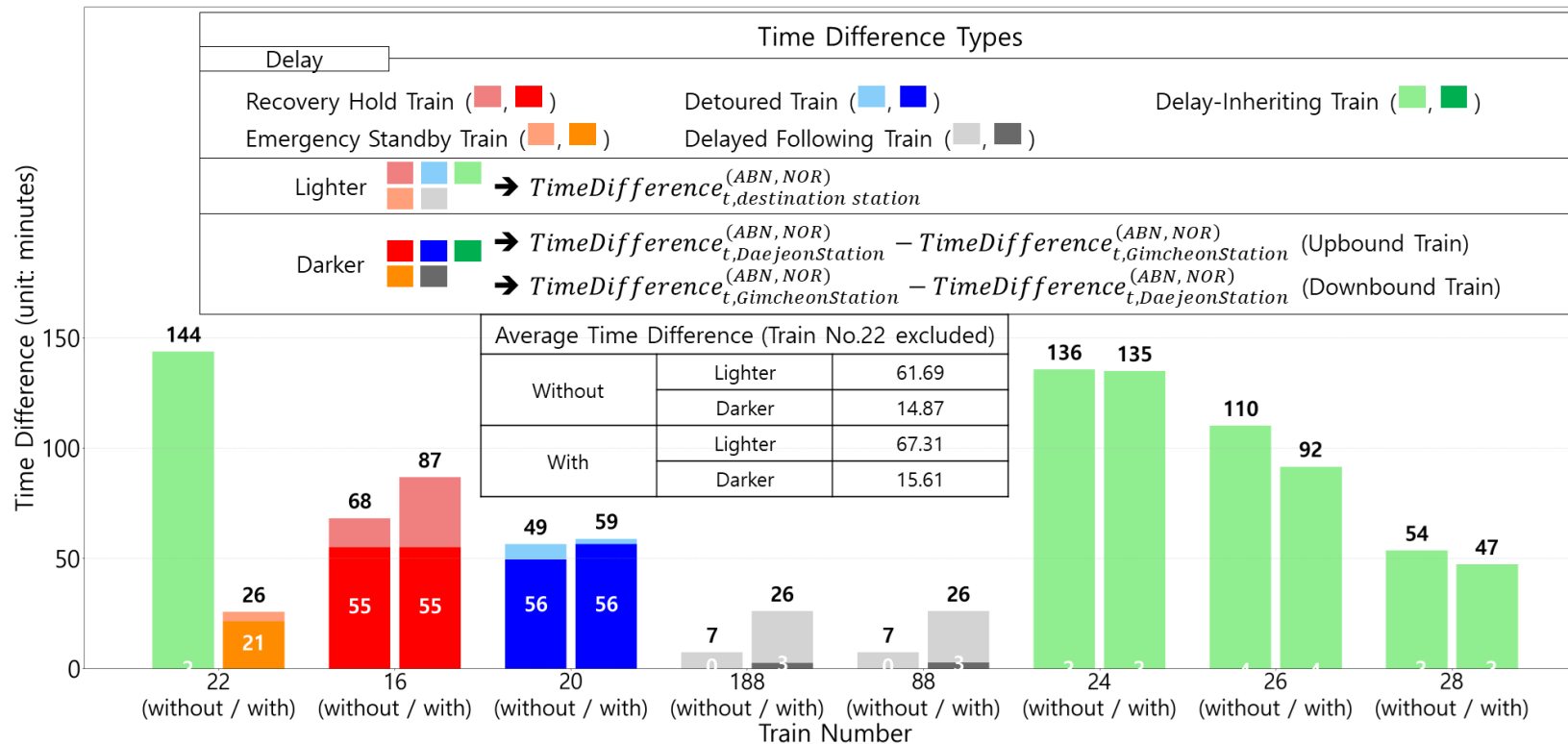
사건시간 (분)	선로	발생지점	발생 시작 노드	발생 종료 노드	복구시간 (분)
400	상선(T2)	김천구미-대전	A	B	200
400	하선(T1)	김천구미-대전	C	D	200



4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.4 이례상황 결과 분석 (비상대기열차 운행)

- 일반선 우회 운행 대비 비상대기열차 운행 시 누적 지연 그래프 (서울역-부산역 / 동대구역-대전역 구간에서의 지연)



Emergency Standby Train:

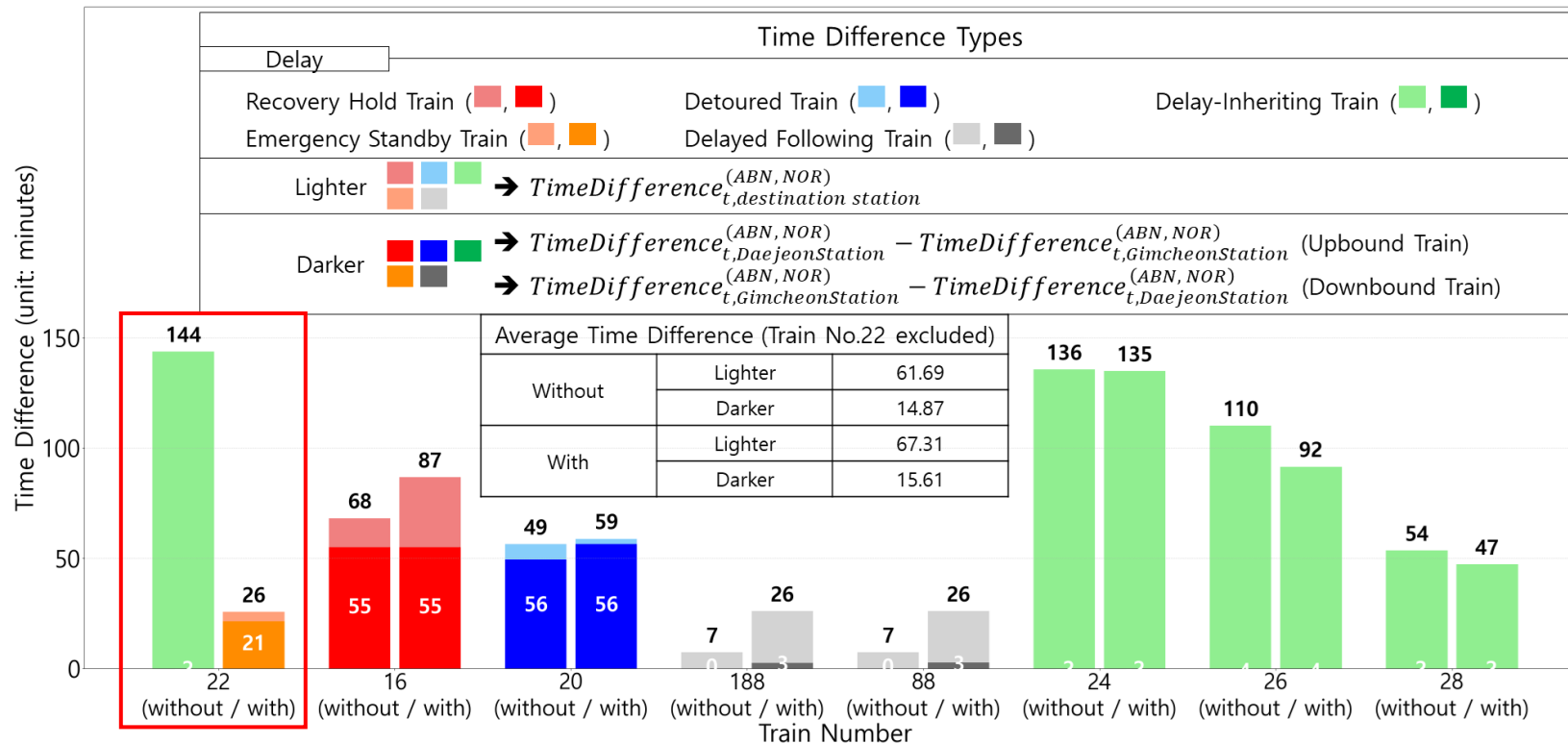
- 편성 내 선행열차의 지연으로 인해 출발이 지연될 것으로 예상되는 반복열차의 스케줄을 대체할 열차

- 22번 열차

4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.4 이례상황 결과 분석 (비상대기열차 운행)

- 일반선 우회 운행 대비 비상대기열차 운행 시 누적 지연 그래프 (서울역-부산역 / 동대구역-대전역 구간에서의 지연)



- 22번 열차 (서울역-부산역)에서의 지연

- 비상대기열차를 사용하지 않은 경우:

정상상황 대비 143.77분 지연

- 비상대기열차를 사용한 경우:

정상상황 대비 25.68분 지연

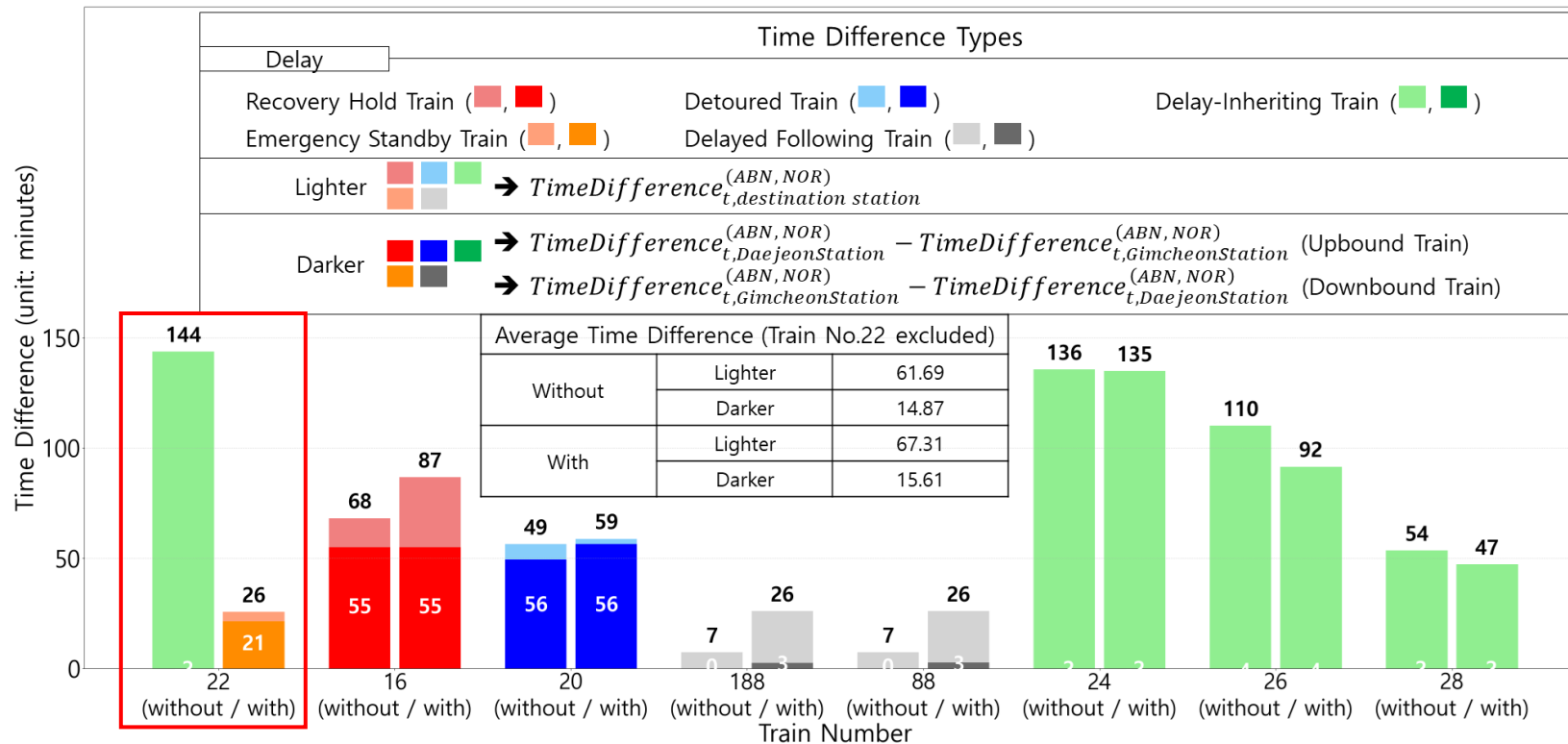
- 약 118.09분 지연 감소

편성 내 선행열차(5번 열차)가 종착역에 도착할 때까지 22번 열차가 대기하지 않고, 원래 스케줄 상 출발시각에 출발할 수 있게 되어 지연은 감소하게 됨

4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.4 이례상황 결과 분석 (비상대기열차 운행)

- 일반선 우회 운행 대비 비상대기열차 운행 시 누적 지연 그래프 (서울역-부산역 / 동대구역-대전역 구간에서의 지연)



- 22번 열차 (동대구역-대전역)에서의 지연

- 비상대기열차를 사용하지 않은 경우:

정상상황 대비 -1.81분 더 빨리 통과

→ 이례상황이 종료된 이후 운행을 시작하여 동대구역-대전역 구간에서의 지연이 사라져 있었기 때문

- 비상대기열차를 사용한 경우:

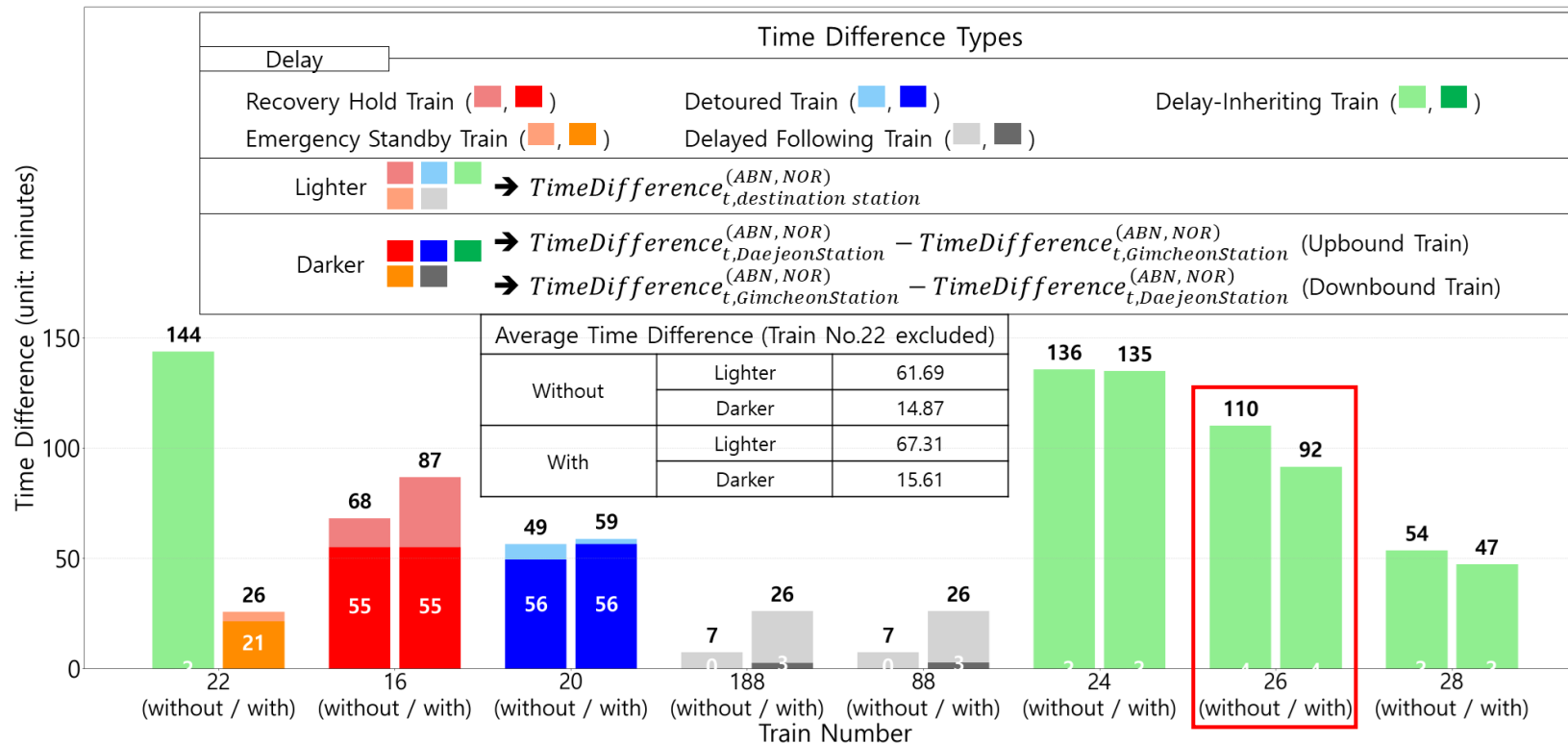
정상상황 대비 21.44분 지연

→ 동대구역-대전역 구간에서 지연되었던 다른 열차들의 운행이 회복되지 않았기 때문에, 비상대기열차가 해당 구간을 통과할 때 속도를 줄이거나 정지하는 상황이 발생했기 때문

4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.4 이례상황 결과 분석 (비상대기열차 운행)

- 일반선 우회 운행 대비 비상대기열차 운행 시 누적 지연 그래프 (서울역-부산역 / 동대구역-대전역 구간에서의 지연)



- 지연이 감소한 경우 (ex. 26번 열차)

- 110분 지연 -> 92분 지연
= 18.56분 감소

- 비상대기열차를 사용하기 전:

26번 열차는 선행 열차(22번 열차)와의 간격 유지를 위해 서행하면서 지연됐었음

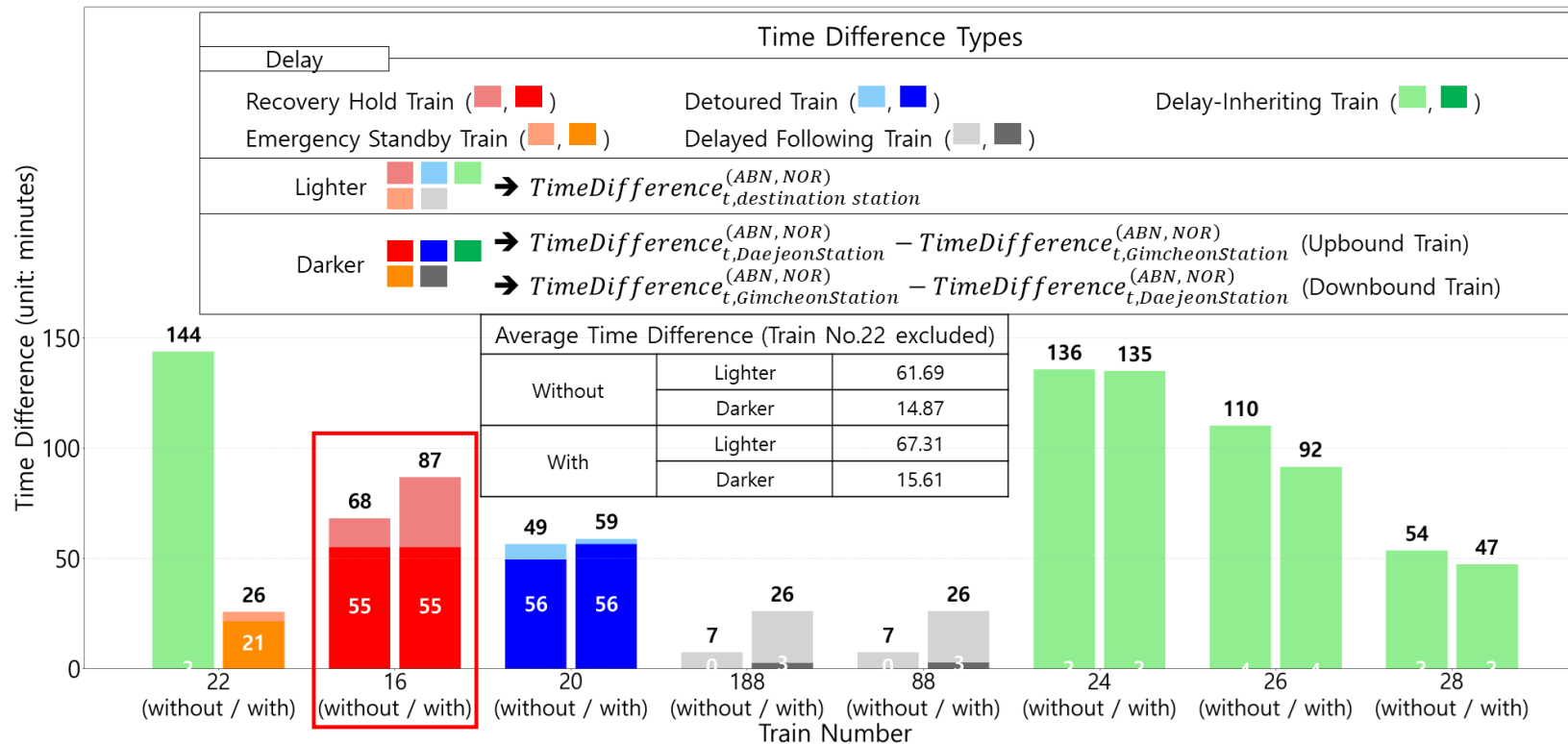
- 비상대기열차를 사용한 후:

두 열차의 간격이 충분히 벌어지면서
26번 열차가 선행 열차로 인한 지연 없이
운행될 수 있었기에 지연이 감소함

4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.4 이례상황 결과 분석 (비상대기열차 운행)

- 일반선 우회 운행 대비 비상대기열차 운행 시 누적 지연 그래프 (서울역-부산역 / 동대구역-대전역 구간에서의 지연)



- 지연이 증가한 경우 (ex. 16번 열차)

- 68분 지연 -> 87분 지연
= 18.57분 증가

- 비상대기열차를 사용하기 전:

서로 멀리 떨어져 있어 영향을 주지 않았음

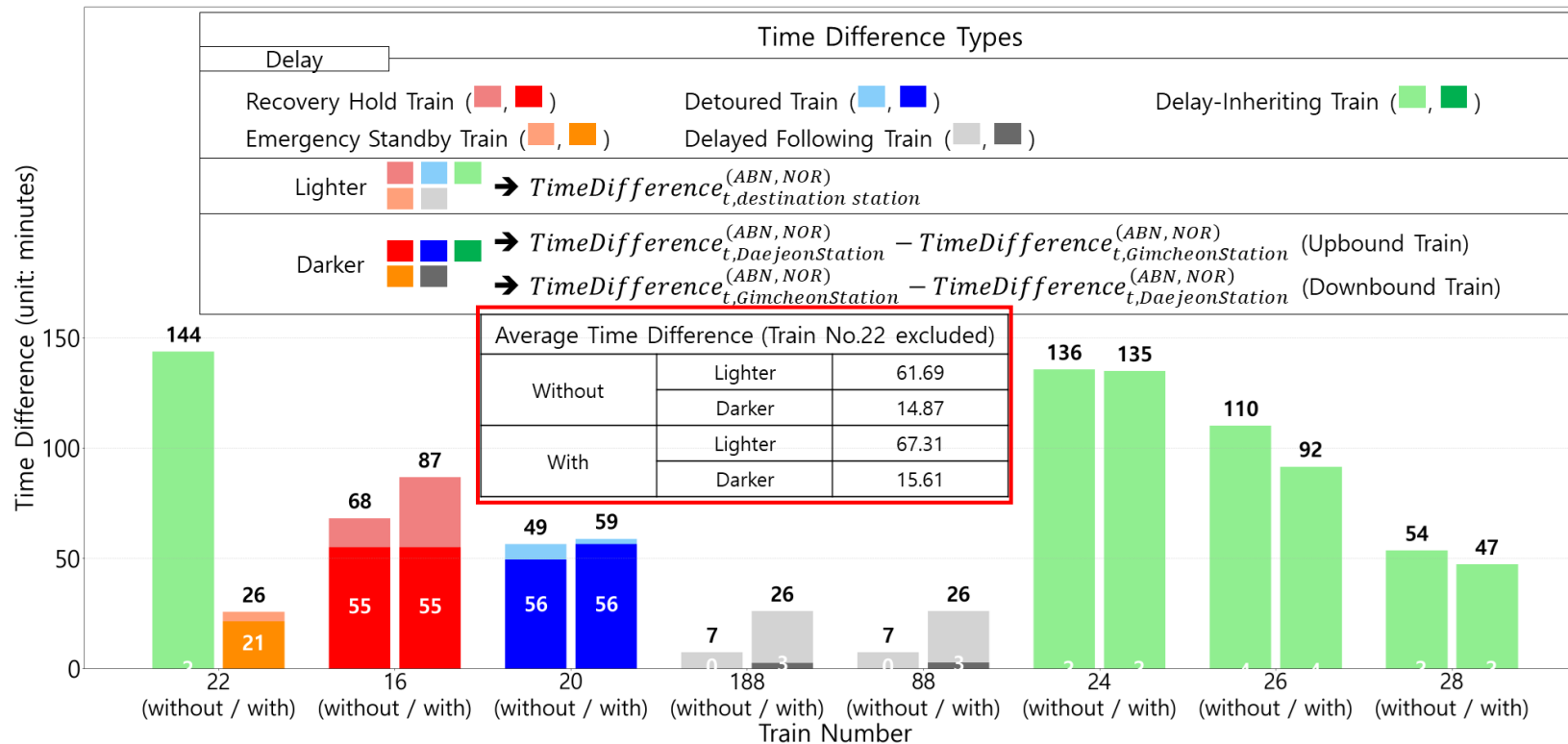
- 비상대기열차를 사용한 후:

22번 열차가 16번 열차를 추월하여
선행 열차가 되었고,
16번 열차는 선행 열차와의 간격 유지를
위해 서행하면서 지연이 증가함

4. 시뮬레이션 검증 및 분석

4.4 이례상황 결과 분석 (비상대기열차 운행)

- 일반선 우회 운행 대비 비상대기열차 운행 시 누적 지연 그래프 (서울역-부산역 / 동대구역-대전역 구간에서의 지연)



- 평균 지연 시간 (22번 열차 제외)

- 비상대기열차를 사용하지 않은 경우:

61.69분 (서울역-부산역)

14.87분 (동대구역-대전역)

- 비상대기열차를 사용한 경우:

67.31분 (서울역-부산역)

15.61분 (동대구역-대전역)

- 비상대기열차의 사용으로 인해

다른 열차들의 지연 시간은 평균적으로 증가함

5. 결론

5.1 결론

- 비상대기열차의 활용 효과
 - 반복열차의 지연 완화 + 일부 열차의 운행 지연 증가 및 감소
 - ➔ 반복열차의 지연 완화를 위한 수단으로 **비상대기열차의 운행은 효과적임**
 - ➔ 그러나 이로 인해 발생하는 **다른 열차들의 운행 변화를 함께 고려한 열차 운행 통제가 필요함**
- 미시적 분석의 필요성 파악
 - 실제 발생하지 않은 이례상황에 대해 시뮬레이션 기반으로 열차 운행 통제를 적용하여 그 결과를 미시적으로 파악함
 - 이때 각 열차의 운행 과정을 미시적 수준으로 파악하였기에, 시뮬레이션 결과에 대해 **운행 과정을 상세히 분석**할 수 있었음
 - ➔ 단순히 지연 예측값에 대한 정량적인 분석으로는 관찰하기 어려운 **지연 발생 및 감소의 원인 및 과정을 파악**할 수 있음
 - ➔ CTC가 이례상황 발생 시 열차 통제 전략을 수립에 대한 **의사결정을 할 때 실질적인 근거를 제공**할 수 있음

감사합니다.