Check for updates

Journal of Climate Change Research 2025, Vol. 16, No. 5-1, pp. 815~831
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2025.16.5.815

기후변화가 철도 운영에 미치는 영향: SSP 시나리오 기반 레일 온도 및 운행 빈도에 따른 공간적 리스크 평가

황진후* · 김윤지* · 유영재* · 김서현** · 정시원** · 전성우***†

*고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, **고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, ***고려대학교 환경생태공학부 교수

Climate change impacts on railway operations: Spatial risk assessment based on rail temperature and operation frequency under SSP scenarios

Hwang, Jinhoo* · Kim, Yoonji* · Yoo, Youngjae* · Kim, Seohyun** · Jeong, Siwon** and Jeon, Seongwoo***†

*Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

**Master Student, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

***Professor, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Climate change is expected to have significant impacts on the operational safety and reliability of railway systems. As extreme heat events become more frequent and intense, elevated rail temperatures can lead to speed restrictions or service suspensions, posing challenges to the stability and efficiency of rail operations. In this context, this study quantifies the impacts of climate change on rail operations in South Korea by simulating rail temperature changes and assessing abnormal operation days under two climate scenarios: SSP 126 and SSP 585. Specifically, daily maximum air temperature data (2021 ~ 2100) were obtained from the Korea Meteorological Administration, and rail temperatures were derived using an empirical linear function. Based on these estimates, and according to rail operation guidelines, days with restricted operations (≥ 55°C) and service suspensions (≥ 64°C) were identified for each rail line and segment. Under SSP585, operational restrictions are projected to increase significantly after the 2050s, with some segments experiencing more than 80 restricted days annually. Moreover, vulnerable areas include inland cities such as Daegu and Gwangju, while metropolitan corridors like the Gyeongbu Line face considerable risk due to high train frequencies. By integrating thermal exposure and train operation density, this study provides a comprehensive assessment of railway climate vulnerability. Overall, the findings underscore the necessity for targeted adaptation strategies, including thermal mitigation measures, real-time temperature monitoring, and region-specific maintenance planning.

Key words : Climate Change, Railway Operation, Rail Temperature, SSP Scenarios, Infrastructure Vulnerabilit

1. 서론

최근 수십 년간 기후변화는 전 지구적으로 명확한 추세로 관측되고 있으며, 그 영향은 갈수록 심화되고 있다. IPCC는 AR6 종합보고서를 통해 지속 불가능하고 불평등한 에너지 및 토지 이용, 화석 연료 연소 등이 지구온난화를 초래하였음을 밝히며, 2011 ~ 2020년의 지구 표면 온도는 1850 ~ 1900년 대비 약 1.1℃ 상승하였음을 발표하였다(IPCC, 2023). 기후변화는 이미 전 세계 모든 지역에서 여러 기상 및 기후 극한 현상에 영향을 미치며, 폭염, 폭우, 가뭄, 열대성 저기압과 같은 극한 현상이 관측되고 있다(IPCC, 2023). 특히 여름철 폭염은 인체 건강뿐 아니

†Corresponding author : eepps_korea@korea.ac.kr (Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 황진후 0000-0002-5372-5377 김서현 0009-0008-3161-2639
김윤지 0000-0003-1490-0782 정시원 0009-0009-0966-6494
유영재 0000-0003-0595-3911 전성우 0000-0001-5928-8510

Received: July 15, 2025 / Revised: August 11, 2025 1st, August 27, 2025 2nd / Accepted: September 8, 2025

라 건물 에너지 소비량 증가, 사회기반시설 손상 등 다양한 분야에서 사회경제적 피해를 초래한다(Zinzi et al., 2020). 국내에서는 이상고온 현상이 극심해지며 2024년 연평균 기온은 14.5℃로 1973년 관측 이래 가장 높은 역대 1위를 기록하였으며. 연간 폭염일수와 열대야일수는 각각 31.1일, 24.4일로 여름철 폭염이 장기화되는 추세로 나타났다(KMA, 2024). 이러한 기후변화 양상은 단순한 날씨 현상을 넘어 도시 및 사회 시스템의 구조적 적응 필요성을 시사하며, 기후위기 시대에 도시·인프라 차원의 통합적 적응 전략 수립이 시급하다는 점을 보여준다.

국가에서는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」에 따라 기후위기에 대응하기 위한 국가 기후위기 적응대책을 수립하고 있으며, 부문별 기후위기 리스크를 구축하고 이를 저감하기 위한 세부 추진과제들을 발굴하고 있다. 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021 ~ 2025) 및 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책에서는 철도를 포함한 육상교통과 관련된 리스크가 제시되어 있다. 제3차 적응대책에서는 폭우, 폭설로 인한 육상교통 운행 중단 및 사고 증가(L06), 폭염으로 인한 철도레일 변형 및 탈선위험 증가(L08) 리스크를 제시하고 있으며, 적응 강화대책에서는 이를 통합하여 이상기상 현상으로 인한 육상교통(철도, 도로) 시설파손, 운행중단 및 사고 위험 증가(L05) 리스크를 제시하고 있다. 이러한 리스크에 대응하기 위해 도로시설 및 철도시설의 유지관리 및 점검·정비를 강화하는 방향의 세부과제를 추진하는 등의 적응 대책을 수립하고 있다(Government of the Republic of Korea (Joint Ministries), 2020, 2023).

철도 분야에서 평균 기온 상승과 극한 기후 현상의 빈도 증가는 철도망의 구조적 안정성과 유지보수에 직·간접적인 부담을 초래하며, 특히 레일 온도의 상승은 열차 속도 제한 및 운행 중단의 원인이 될 수 있다(Choi et al., 2010; Hong et al., 2018). 이로 인해 운행 신뢰성 저하, 여객 및 화물 지연, 경제적 손실 증가 등 복합적 문제가 발생할 가능성이 높아지고 있다. 따라서 철도망이 기후 변화에 어떻게 영향을 받으며, 이에 대한 대응 방안을 마련하는 것이 필수적이다.

뿐만 아니라, 기후 변화는 인프라의 안전성과 유지보수에도 영향을 미친다. 특히, 극한 기상 현상으로 인해 선로 장애, 신호 장애, 급전 장애 등의 철도 기상사고가 증가하는 경향이 나타난다. 집중호우로 인한 노반 유실뿐만 아니라, 기온 상승으로 인해 레일 온도가 상승하면서 좌굴 및 열팽창 문제가 발생할 가능성이 크다(Park et al., 2011). 대표적인 사례로 2018년 경부선 대전조차장역에서 발생한 화물열차 탈선 사고(Aviation and Railway Accident Investigation Board, 2019)가 있다. 이 사고로 레일, 침목, 전철주, 신호설비 등이 파손되었으며, KTX를 포함한 여객열차 61편과 화물열차 9편이 최대 351분 지연되는 등 열차 운행에 심각한 차질이 발생하였다. 유사하게, 2014년 중앙선 업동 ~ 의성 구간에서 발생한 탈선 사고(Aviation and Railway Accident Investigation Board, 2015)에서는 레일, 침목, 케이블 등이 파손되고, 사고 구간의 열차 운행이 약 15시간 동안 중단되었다. 향후 기온 상승이 지속될 경우 이러한 사고의 발생 빈도가 증가할 가능성이 있다. 따라서 기후 변화로 인한 철도 사고 증가 가능성을 고려한 선제적 대응책 마련이 필요하다.

레일 온도 상승 문제를 완화하기 위한 다양한 기술적 대응이 연구되고 있다. 가장 대표적으로 전세계적으로 고온으로 인한 좌굴과 탈선사고를 방지하기 위해 레일 온도 상승에 대한 속도제한 규정을 제시하고 있다(Kim et al., 2013). 또한, 차열 도료를 레일에 적용하여 온도를 저감하는 방안이 검토되었으며, 도료 도포 두께에 따른 차열 효과 분석을 통해 유지보수 비용 절감 및 철도 운영 효율성 향상이 기대되고 있다(Park and Kang, 2021). 또한, 미래 기후 시나리오를 활용한 연구에서는 대기 온도 상승이 레일 온도 및 장대레일의 안정성에 미치는 영향을 평가하고 있으며, 현재 설정된 레일 온도 기준이 미래 기후 조건에서도 유효한지 검토할 필요성이 제기되고 있다(Park et al., 2024). 그러나 기존 연구들은 주로 단일 노선 또는 제한된 구간에서의 사례 분석과 설계기준 유효성 검토에 중점을 두었기 때문에, 전국 규모에서의 공간적 취약성 분석은 부족한 실정이다. 이는 단순히 레일 온도 변화 문제에 그치지 않고, 실제 철도 운영에 어느 정도 영향을 미치는지, 그리고 어떤 구간이 특히 영향을 받는지에 대한 통합적 이해가 결여되어 있음을 의미한다. 따라서 우리나라 전체 철도망을 대상으로 취약 구간을 식별하고, 각 구간의 특성을 반영한 맞춤형 대응 전략을 수립하기 위한 공간 기반 기초자료 구축이 필요하다. 이를 통해 기존 연구에서 충분히 반영되지 못했던 철도 운영 리스크를 효과적으로 평가하고, 기후 변화 대응의 실효성을 높일 수 있다.

이에 본 연구는 기온 상승에 따른 레일 온도 변화를 분석하고, 이를 기반으로 열차 운행 상태의 변화를 정량적으로 평가하고자 한다. 특히, 기후 변화 시나리오(SSP126 및 SSP585)를 적용하여 2021년부터 2100년까지의 미래 기후 변화를 전망하고, 이에 따른 철도 레일 온도 및 열차

운행 제한 가능성을 분석한다. SSP126 시나리오는 온실가스 배출을 줄이고 지속 가능한 개발을 목표로 하는 저탄소 경로를 반영하며, SSP585 시나리오는 온실가스 배출이 지속적으로 증가하는 고탄소 경로를 나타낸다(O'Neill et al., 2017). 두 시나리오의 비교를 통해, 다양한 기후 변화 경로에서 철도망이 직면할 수 있는 위험 요소를 보다 명확히 파악할 수 있다.

본 연구에서는 국가교통DB에서 제공하는 철도망 데이터를 활용하여 노선별·구간별 레일 온도를 산출하고, 국토교통부에서 제시한 열차 운행 기준을 적용하여 비정상 운행일수 및 운행 중단일수를 도출하였다. 국제적으로 리스크(risk)는 기후변화에 따른 위험요인(hazard), 노출도(exposure), 취약성(vulnerability)의 함수로 정의되기도 하고, 발생확률과 영향(consequence)의 함수로 정의되기도 한다(IPCC, 2023). 전자는 기후위험요인, 시스템 노출, 대응능력 부족의 상호작용을 강조하며, 후자는 특정 사건의 발생 가능성과 그로 인한 영향을 정량적으로 결합하는 방식이다.

본 연구는 두 번째 정의, 즉 "발생확률 × 영향" 개념이 철도 운영 리스크 평가에 보다 적합하다고 판단하였다. 이에 따라 레일 온도 초과 빈도는 발생확률로, 열차 운행 빈도(운영 영향)는 영향으로 간주하여, 두 요소를 결합해 구간별 리스크 수준을 정량적으로 산정하였다. 이와 같이 본 연구의 리스크 개념은 IPCC의 대안적 정의 중 두 번째 접근을 적용한 것으로, 실제 철도망에서 발생 가능한 운행 제한·중단 가능성과 그 파급효과를 보다 실질적으로 평가할 수 있다. 이러한 분석 결과는 향후 철도 인프라 관리와 정책 수립의 기초 자료로 활용될 수 있으며, 기후 변화에 따른 철도 운행의 불확실성을 최소화하고 철도망의 지속 가능성을 확보하기 위한 정책적 대응 방안을 마련하는 데 기여할 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 재료

2.1.1. 철도망 데이터

본 연구에서 사용된 철도망 데이터는 국가교통DB에서 제공하는 철도망 데이터베이스를 기반으로 한다. 이 데이터베이스는 각각의 노드와 노드를 연결하는 polyline 형태로 구성되어 있으며, 역과 역 사이의 구간을 나타낸다. 철도망 데이터에는 노선명, 고속선 · 일반선 여부 등의 정보가 포함되어 있다. 본 연구에서는 국내 여객 및 화물열차가 운행되는 모든 영업노선 총 47개 노선을 대상으로 분석을 수행하였다. 고속선은 경부고속선, 수서평택고속선, 호남고속선 3개 노선이 해당되며, 일반선은 경부선, 중앙선, 호남선, 경전선 등 44개 노선이 포함된다. 철도망 데이터는 노선별 분석과 구간별 분석을 통해 연구의 목적에 맞게 활용되었다.

2.1.2. 기후 데이터

본 연구에서 사용된 기후 데이터는 기상청에서 제공하는 일별 최고기온 데이터이다. 이 데이터는 철도망의 레일 온도 변화를 분석하기 위한 중요한 기초 자료로, 평균 온도가 아닌 최고기온 데이터를 선택하였다. 이는 실제 철도 운영에서는 하루 중 임의의 시각이라도 레일 온도가 임계치를 초과하면 속도제한 또는 운행중단 조치가 발령될 수 있으므로, 일변동 전 과정의 평균값보다 일 최고기온이 임계치 초과 여부를 직접적으로 반영하는 보수적 지표라 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 저탄소 경로를 반영한 SSP126과 고탄소 경로를 나타내는 SSP585 시나리오의 일 최고기온 데이터를 활용하여 분석을 수행하였다.

SSP 126 시나리오는 저탄소 배출과 지속 가능한 개발을 목표로 하며, 기후 변화 영향을 최소화하려는 경로를 반영한다. SSP 585 시나리오는 매우 높은 배출 경로를 따르는 시나리오로, 기후 변화 대응이 미흡한 상태에서 온실가스 배출이 지속적으로 증가하는 경로를 나타낸다(O'Neill et al., 2017). 각 시나리오는 2021년부터 2100년까지의 기온 변화를 시뮬레이션하며, 미래 기후 변화를 예측하고 이에 따른 레일 온도의 변화를 추정하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 기상청 「국가 기후변화 표준 시나리오」(KMA, 2024) 중 SSP126 및 SSP585 앙상블 자료를 활용하였다. 해당 시나리오는 전지구 기후모델(UKESM1, K-ACE) 결과를 기반으로, 동아시아 영역에서 5종 지역기후모델(HadGEM3-RA, WRF, CCLM, GRIMs, RegCM4)로 역학적 상세화를 거친 뒤, 통계적 상세화(PRIDE, MK-PRISM)를 통해 남한 1 km 해상도 자료로 산출된 것이다. 데이터는 지리적 상세성을 갖춘 고해상도 격자 형태로 제공되며, 이를 통해 한국 전역의 기온 변화를 효과적으로 반영할 수 있다. 이러한 기후 데이터는 레일 온도 계산에 직접 활용되며, 철도망의 비정상 운행일수와 운행 중단일수를 산출하는 데 핵심 자료로 사용되었다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. 레일 온도 도출

철도의 운행에 미치는 주요 요소는 대기 온도가 아니라 철도 레일의 온도이다. 본 연구에서는 기온과 레일 온도 간의 관계를 연구한 선행 연구를 기반으로 레일 온도를 도출하였다. 선행 연구에 따르면, 레일 온도는 대기 온도가 20도 이하일 때 대기 온도와 동일하며, 대기 온도가 20도 이상일 때 레일 온도는 대기 온도의 2배에서 20도를 뺀 값으로 나타난다(Eq. 1)(Park et al., 2024).

$$\begin{cases} y = x, x \leq 20 \\ y = 2x - 20, x > 20 \end{cases} \quad (1)$$

(x: Air Temperature, y: Rail Temperature)

철도 레일 온도 모의를 위해서는 대기 온도뿐 아니라 습도, 일사량, 재질 특성 등 다양한 기후·물리 인자를 고려하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구는 SSP 시나리오 기반의 미래 기온 자료를 활용하여 장기간·전국 규모의 레일 온도 변화를 전망하는 것을 목적으로 하며, 자료 가용성과 모델 복잡도를 고려해 불확실성을 최소화할 필요가 있다. 이에 따라 단일 대기 온도와 레일 온도의 상관관계만을 반영한 단순 선형 함수식인 Park et al. (2024)의 수식을 적용하였다. 적용한 식은 실제 레일 온도 측정장치를 이용해 우리나라 레일 환경에 적합하도록 도출한 경험식으로, 국내 철도망 전반에 안정적으로 적용 가능하다. 본 연구에서는 해당 관계식을 바탕으로 각 SSP 시나리오에 대해 2021년부터 2100년까지의 미래 레일 온도를 모의하였다.

2.2.2. SSP 시나리오에 따른 비정상 운행일수 및 운행 중단일수 분석

본 연구에서는 국토교통부에서 제시한 열차 운행 기준을 바탕으로 레일 온도와 열차 운행 상태의 관계를 분석하였다(Table 1). 고속선의 경우 레일 온도가 55℃ 이하일 경우 정상 운행으로 정의되며, 55℃ 이상 60℃ 미만일 경우 속도 제한이 적용되어 230 km/h로 운행하게 된다. 60℃ 이상 64℃ 미만일 경우 속도가 70 km/h로 제한되며, 64℃ 이상일 경우에는 운행이 중단된다. 일반선의 경우 레일 온도가 55℃ 이하일 경우 정상 운행을 실시하며, 55℃ 이상 60℃ 미만일 경우 주의 운행, 60℃ 이상 64℃ 미만일 경우 속도가 60 km/h로 제한되며, 64℃ 이상일 경우에는 고속선과 마찬가지로 운행이 중단된다.

열차 운행 상태의 변화를 분석하기 위해 통계적 기법을 활용하였다. 먼저, 각 SSP 시나리오별로 연도별 비정상 운행일수와 운행 중단일수를 산출하였다. 비정상 운행일수는 레일 온도가 55℃ 이상인 날의 수로 정의되며, 운행 중단일수는 64℃ 이상인 날의 수로 정의되었다. 이후, 연도를 독립 변수로, 연간 비정상 운행일수와 운행 중단일수를 종속 변수로 설정한 단순 선형 회귀 분석을 수행하여, 기간 동안의 변화 추세와 시나리오별 차이를 평가하였다. 이를 통해 장기 기온 상승 경향이 열차 운행 제한 및 중단 빈도의 변화에 미치는 잠재적 영향을 정량적으로 분석하였다.

2.2.3. 노선 및 구간별 분석

철도망을 노선 단위로 구분하여 각 노선별 비정상 운행일수 및 운행 중단일수를 분석하였다. 노선별 분석은 전체 철도망을 노선 단위로 나누어 각 노선에서의 열차 운행에 대한 영향을 평가하는 방식이다. 이를 통해 기후 변화가 특정 노선에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 고위험 구간을 도출하였다. 분석 과정에서는 각 노선별 레일 온도를 계산하고, 이를 기반으로 비정상 운행일수와 운행 중단일수를 추정하였다.

구간별 분석에서는 각 노선을 구간별로 세분화하여 비정상 운행일수 및 운행 중단일수를 산출하였다. 특히, 역과 역 사이의 세부 구간을 기준으로 데이터를 집계하여, 특정 구간에서의 위험성을 보다 상세하게 평가하였다. 구간별 분석에서는 각 노선의 개별 구간을 대상으로 레일 온도 변화를 분석하고, 해당 구간의 기온 변동성이 열차 운

Table 1. Train operation standards by rail temperature (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea)

Type of Railway	Below 55℃	55℃ ~ 60℃	60℃ ~ 64℃	Above 64℃
High-Speed Railway Line	Normal Operation	Speed Limit (230 km/h)	Speed Limit (70 km/h)	Service Suspension
Standard Railway Line		Cautious Driving	Speed Limit (60 km/h)	

Table 2. Datasets constructed for the study

Data Type	Railway Network Data	Climate Data	Train Operation Frequency
Source	National Transport DB	KMA CMIP6 Ensemble (SSP126 and SSP585)	Korail, Korean Railway Statistics
Period	2024	2021 ~ 2100	2023
Resolution	Line / Section between stations	1 km grid	Annual, by section
Variables	Line name, type, length (km)	Daily maximum temprerature	Train frequency per section
Records/Scale	47 lines	365 days × 80 years × number of grids	47 lines

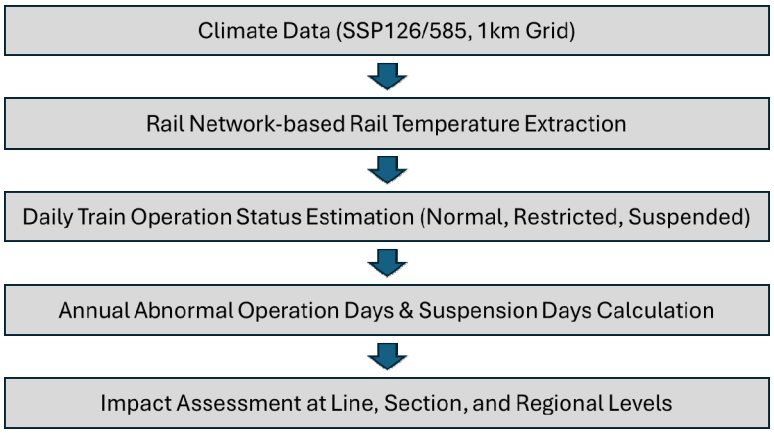


Fig. 1. Methodological framework for assessing railway operational risks

행에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 기온 변화에 따른 속도 제한 구간과 운행 중단 가능성이 높은 구간을 도출하여 철도 운영에 대한 정책적 대응 방안을 제시하였다.

추가적으로, 각 구간별 열차 운행 횟수 자료를 활용하여 기온 상승에 따른 운행 제한이 실제 철도 운행에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 운행 횟수가 많은 구간에서의 기온 변화 영향과 그에 따른 운영 리스크를 보다 명확하게 평가할 수 있도록 하였다. 다만, 본 연구에서 활용한 운행 빈도 자료는 일별 평균 운행 횟수를 기반으로 하였기 때문에 실제 운영 리스크를 완전히 반영하기에는 한계가 있다. 철도 운행은 계절별 수요 변동이나 시간대별 집중 패턴, 그리고 하루 중 온도 변화와 운행 시각에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 그러나 현 시점에서는 이러한 세분화된 자료의 가용성이 제한적이므로, 본 연구는 평균 자료를 활용하였다. 향후에는 계절별·시간대별 운행 패턴을 반영한 세분화 분석을 통해 실제 운영 리스크를 보다 정밀하게 평가할 필요가 있다.

3. 연구 결과

3.1. SSP 시나리오에 따른 비정상 운행일수 및 운행 중단일수 분석

본 연구는 SSP126과 SSP585 두 가지 기후 시나리오를 적용하여 2021년부터 2100년까지 철도 레일 온도 변화를 기반으로, 전국 철도망에서 어느 한 구간이라도 레일 온도가 임계값을 초과한 날을 집계하여 연도별 비정상 운행일수(55℃ 이상)와 운행중단일수(64℃ 이상)를 분석하였다.

비정상 운행일수 분석 결과, SSP126 시나리오에서는 전체 기간 동안 비정상 운행일수가 대체로 0 ~ 31일 범위에서 변동하며 뚜렷한 증가 경향은 나타나지 않았다. 반면, SSP585 시나리오에서는 2050년 이후부터 비정상 운행일수가 급격히 증가하기 시작하였으며, 21세기 후반(2080 ~ 2100년)에는 연간 50일을 초과하는 경우가 빈번하게 관측되었고, 최대 87일에 이르는 연도도 나타났다(Fig. 1). 이러한 결과는 저탄소 시나리오에서는 철도 운행 제한 위험이 장기간 뚜렷한 증가 없이 유지되는 반면, 고

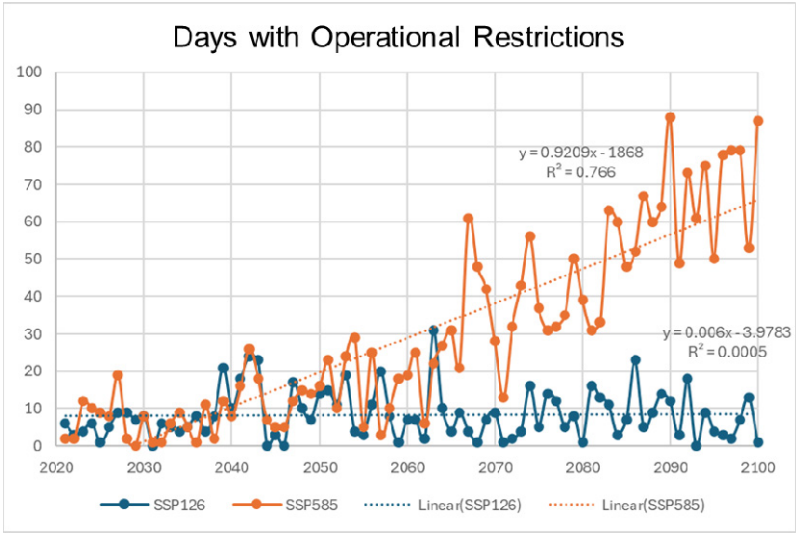


Fig. 2. Annual days with operational restrictions under climate scenarios (2021 ~ 2100)

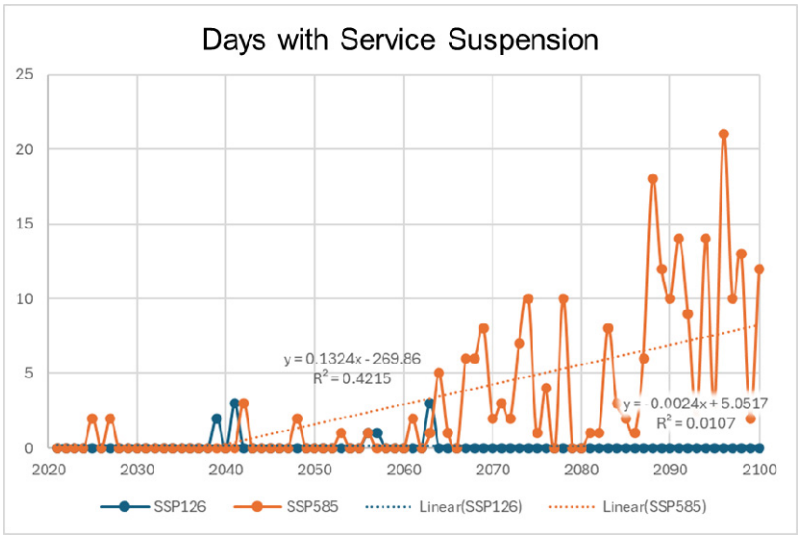


Fig. 3. Annual days with service suspensions under climate scenarios (2021 ~ 2100)

탄소 시나리오에서는 후기 급격한 증가를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 운행중단일수 역시 유사한 경향을 보이는데, SSP126 시나리오에서는 거의 모든 연도에서 운행중단일수가 0 ~ 2일에 그쳤으며 증가 경향 또한 매우 미미하였다. 반면 SSP585 시나리오에서는 2060년 이후부터 점진적인 증가가 관찰되었으며, 일부 연도에서는 20일 이상 운행이 중단되는 사례도 나타났다(Fig. 2). 이는 기후변화 완화 수준에 따라 철도 운영 리스크가 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

추가적으로, 단순 선형 회귀분석을 통해 시나리오별 장기 추세를 확인하였다. SSP126의 경우 R^2 값이 비정상 운행 일수는 0.0005 및 운행중단일수 0.0107로 나타나 통계적 유의성이 거의 없음을 확인하였으며, 이는 연도 경과 및 온도 증가에 따른 철도 운영에 큰 영향이 없음을 시사한다. 반면 SSP585에서는 비정상 운행일수(R^2=0.766)와 운행중단일수(R^2=0.4215)가 모두 뚜렷한 증가 추세를 보여, 기온 상승이 철도 운행 제한 빈도에 유의미한 영향을 미침을 정량적으로 뒷받침하였다.

3.2. 노선별 분석

철도 노선별 SSP126 및 SSP585 시나리오에 따른 연평균 비정상 운행일수 및 운행 중단일수를 분석한 결과, 시나리오 간 뚜렷한 차이가 확인되었으며, 고온에 따른 운행 리스크 또한 노선별로 상이하게 나타났다(Table 2). 해당 분석은 2021년부터 2100년까지 80년간의 데이터를 기반으로 산출된 평균값에 근거하였다.

SSP126 시나리오에서는 대부분의 노선에서 비정상 운행일수가 연평균 5일 이하 수준에 머물렀으며, 운행 중단일수 또한 거의 발생하지 않았다. 가장 높은 운행 제한일수를 기록한 노선은 경부선(7.94일), 경부고속선(7.88일), 대구선(7.23일)으로 나타났으며, 이들 노선에서도 연평균 운행 중단일수는 0.1 ~ 0.15일 수준에 불과하였다. 전반적으로 레일 온도가 운행 제한 또는 중단 기준에 도달하는 빈도가 낮아, 해당 시나리오에서는 열차 운행에 대한 기후 변화의 영향이 제한적인 것으로 평가된다.

반면 SSP585 시나리오에서는 전 노선에서 비정상 운행일수와 운행 중단일수가 뚜렷하게 증가하였다. 경부선(28.84일), 경부고속선(28.83일), 대구선(27.25일), 중앙선(24.54일), 전라선(23.64일) 등은 연평균 20일 이상의 비정상 운행일수를 기록하였으며, 이는 장기간에 걸쳐 열차 운행 제한이 반복될 가능성을 시사한다. 이러한 노선들은 주로 내륙 및 남부 지역을 중심으로 분포하고 있으며, 해당 지역의 기온 상승 폭이 다른 지역에 비해 상대적으로 크다는 점과도 일치하는 경향을 보인다.

이러한 노선 단위 분석은 철도망 전체의 기후 변화 노출 수준을 개략적으로 파악하는 데 유용하나, 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫째, 연장이 긴 간선 노선의 경우 고온 노출 확률이 상대적으로 높아 짧은 지선 노선보다 운행 제한일수가 과대 추정될 가능성이 있다. 둘째, 실제 열차는 복수의 노선을 경유하여 운행되므로, 단일 노선 단위의 리스크 평가는 실질적인 운행 리스크를 충분히 반영하지 못할 수 있다. 셋째, 노선 단위 평균은 온도의 지역적 변동성과 극값 정보를 희석시킬 수 있어, 실질적으로 취약한 구간을 식별하는 데 한계가 존재한다.

이에 따라, 다음 절에서는 보다 세분화된 단위인 역간 구간을 기준으로 레일 온도 분석을 수행함으로써, 기온 상승이 특정 구간의 열차 운행에 미치는 영향을 공간적으로 정밀하게 평가하고자 한다.

Table 3. Average annual days with operational restrictions and service suspensions by rail line under SSP126 and SSP585 scenarios (2021 ~ 2100)

Line Name	SSP126		SSP585	
	Days with Operational Restrictions	Days with Service Suspension	Days with Operational Restrictions	Days with Service Suspension
Gaya Line	0.34	-	9.31	0.03
Geoncheon Connecting Junction	2.56	0.01	16.09	0.75
Gyeonggang Line	1.78	0.01	17.99	0.80
Gyeongbu High-Speed	7.88	0.09	28.83	2.79
Gyeongbu Line	7.94	0.13	28.84	2.85
Gyeongbuk Line	4.05	0.01	21.89	1.41
Gyeongwon Line	1.95	0.04	19.23	0.94
Gyeongui Line	1.76	0.04	18.58	0.78
Gyeongin Line	1.53	-	17.09	0.55
Gyeongjeon Line	4.43	-	23.45	1.48
Gyeongju Triangle Line	2.34	0.01	15.20	0.66
Gyeongchun Line	1.73	0.03	18.34	0.81
Gwacheon Line	1.60	0.03	17.64	0.59
Gwangyang Jecheol Line	1.89	-	17.93	0.63
Gwangyanghang Line	0.75	-	12.36	0.21
Gwangju Line	3.71	-	22.21	1.08
Goedong Line	0.90	-	8.74	0.21
Gunsan Port Line	0.75	-	13.18	0.16

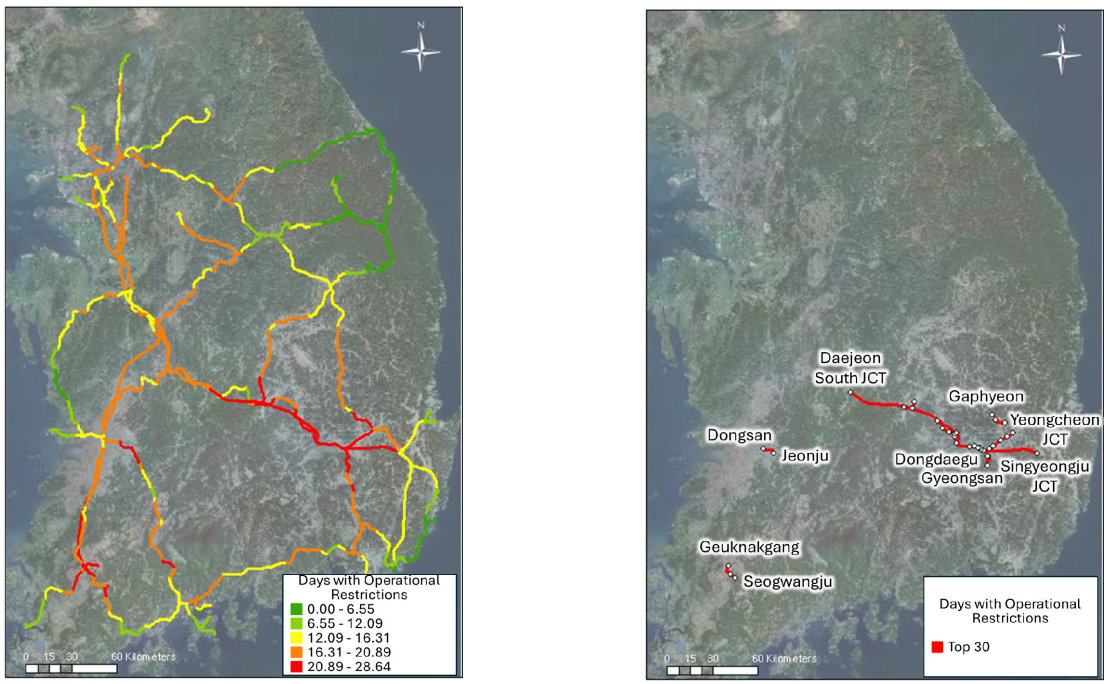
Line Name	SSP126		SSP585	
	Days with Operational Restrictions	Days with Service Suspension	Days with Operational Restrictions	Days with Service Suspension
Nambu Hwamulgiji Line	1.05	-	15.34	0.35
Daegu Line	7.23	0.06	27.25	2.51
Donghae Line	2.63	0.01	16.15	0.83
Mangu Line	1.64	0.04	18.04	0.74
Mijeon Line	2.29	-	17.25	0.64
Busansinhang Line	2.04	-	17.06	0.56
Bujeon Line	0.15	-	7.06	-
Buksongjeong Triangular Junction	2.95	-	20.60	0.84
Suseo-Pyeongtaek High-Speed	2.38	0.03	20.93	1.06
Singwangyanghang Line	-	-	-	-
Ansan Line	0.91	-	13.85	0.25
Yeocheon Line	0.59	-	11.39	0.15
Yeongdong Line	1.50	-	15.19	0.45
Yeongcheon Triangular Junction	3.33	0.03	18.64	1.14
Osong Line	1.24	-	15.51	0.46
Onsan Line	0.05	-	4.05	-
Iksan Triangular Junction	1.65	-	16.71	0.43
Ilsan Line	1.54	0.04	17.55	0.73
Janghang Line	2.01	-	18.18	0.66
Jeolla Line	3.95	-	23.64	1.34
Jeongseon Line	0.46	-	7.98	0.15
Jungbunaeryuk Line	2.26	0.01	19.95	1.03
Jungang Line	5.95	0.05	24.54	2.08
Chungbuk Line	2.18	0.01	19.33	0.86
Taebaek Triangular Junction	0.04	-	1.68	0.01
Taebaek Line	1.01	0.01	13.05	0.26
Hambaek Line	0.13	-	3.63	0.03
Honam High-Speed	3.95	0.01	22.68	1.25
Honam Line	4.03	0.01	22.99	1.29

3.3. 구간별 분석

구간별 분석은 상대적으로 비정상 운행 및 운행 중단 빈도가 높은 SSP585 시나리오를 대상으로 수행되었으며, 철도망의 역간 구간 단위로 연평균 비정상 운행일수와 운행 중단일수를 산정하였다. 분석 결과, 일부 특정 구간에서 매우 높은 수준의 운행 제한 및 중단일수가 확인되었으며, 기온 상승에 따른 열차 운행 리스크가 국지적으로 집중되는 경향이 나타났다(Fig. 3a).

비정상 운행일수가 가장 높게 나타난 구간은 경부고속선 신동분기 ~ 동대구(28.64일), 경부선 대구 ~ 동대구(28.53일), 지천 ~ 대구(28.31일), 동대구 ~ 고모(27.43일), 경부고속선 동대구 ~ 신경주분기(27.01일), 대구선 가천 ~ 금강(26.68일), 하양 ~ 금호(26.64일), 경부선 가천 ~ 경산(26.64일), 고모 ~ 가천(26.59일) 등으로 나타났다. 이들 구간은 운행 중단일수 기준으로도 연평균 2.31일에서 2.71일 사이의 높은 값을 기록하였다. 이는 단기적 이상 현상이 아닌, 고온에 따른 지속적이고 구조적인 운행 리스크가 해당 구간에 상존함을 시사한다.

이들 고위험 구간은 대구광역시를 중심으로, 인접한 김천시, 구미시, 칠곡군, 경산시, 영천시 등에 걸쳐 분포하고 있으며, 전반적으로 경부선, 경부고속선, 대구선, 중앙선 등 주요 간선 노선 구간에 집중되어 있다. 해당 지역은 내륙 분지 지형의 특성과 복사열 축적 경향 등으로 인해 여



(a) Spatial Distribution Across the National Rail Network (b) Top 30 Most Affected Sections

Fig. 4. Average annual days with operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100)

름철 극한 고온에 취약한 기후 조건을 가지며, 철도 인프라의 고온 노출도가 다른 지역에 비해 상대적으로 높게 나타난다.

이 외에도 고온에 따른 비정상 운행일수가 두드러진 지역으로는 전라선 전주시 인근 구간(삼례 ~ 전주, 전주 ~ 신리), 광주광역시 일대의 호남고속선(정읍 ~ 광주송정), 호남선(광주송정 ~ 노안, 노안 ~ 나주), 광주선(동송정 ~ 극락강, 극락강 ~ 광주), 경전선(동송정 ~ 서광주, 서광주 ~ 효천) 등이 있으며, 이들 구간 또한 기온 상승에 따른 레일 온도 임계값 초과 빈도가 높은 것으로 분석되었다.

이러한 공간적 분포는 특정 도시권 및 내륙 지역을 중심으로 철도망의 기후 취약성이 구조적으로 집중되고 있음을 보여주며, 향후 지역 맞춤형 관리 전략의 수립 필요성을 시사한다. 한편, 본 구간별 분석은 열차 운행 빈도를 직접 반영하지 못하였다는 한계를 가진다. 동일한 수준의 비정상 운행일수가 발생하더라도, 실제 열차 운행 횟수에 따라 운영 리스크의 체감 강도는 크게 달라질 수 있기 때문이다. 특히 고빈도 운행 구간에서의 운행 제한은 정시성 저하와 수송 효율 저하로 이어질 가능성이 높다. 이에 따라 다음 절에서는 구간별 열차 운행 횟수를 반영한 정량적 운행 리스크 평가를 통해, 기온 상승이 실제 철도 운영에 미치는 영향을 보다 정밀하게 분석하고자 한다.

3.4. 운행 횟수를 고려한 구간별 분석

앞서 제시한 구간별 분석은 레일 온도에 기반한 비정상 운행일수 및 운행 중단일수를 중심으로 수행되었으나, 해당 지표만으로는 실제 철도 운영에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기에 한계가 존재한다. 동일한 수준의 운행 제한이 발생하더라도, 그 구간을 통과하는 열차 운행 편수에 따라 실질적 피해 규모는 크게 달라질 수 있기 때문이다. 이에 따라 본 절에서는 열차 운행 횟수(편수)를 반영한 분석을 통해, 고온에 따른 철도 운행 리스크의 현실적인 영향 범위를 평가하고자 하였다(Fig. 5).

분석 결과, 경부선 신길 ~ 영등포(9,733.05편), 대방 ~ 신길(9,713.70편), 영등포 ~ 신도림(9,675.00편), 노량진 ~ 대방(9,526.65편), 신도림 ~ 구로(9,268.65편), 용산 ~ 노량진(8,939.70편) 등 서울 도심과 인접한 주요 구간들이 매우 높은 연간 비정상 열차 운행 편수를 기록하였다. 해당 구간의 운행 중단 편수 또한 연간 309.6편에서 419.25편 수준으로 나타나, 기온 상승에 따른 실질적 운영 차질 가능성이 큰 것으로 평가된다.

이러한 결과는 앞서 확인된 대구, 광주, 전주 등 지방 도시권 중심의 고온 취약 구간과는 상이한 공간적 분포 양상을 보이며, 수도권 지역이 실제 철도 운행 리스크의

Table 4. Average annual days with operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Top 30)

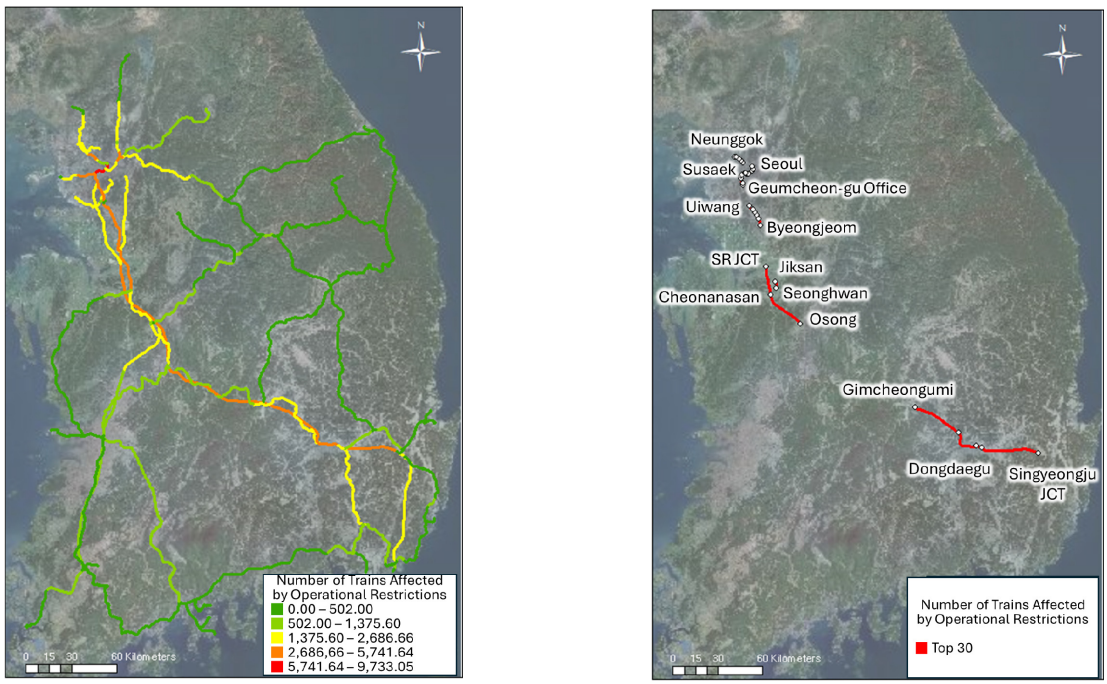
No.	Line	Section	Days with Operational Restrictions
1	Gyeongbu HSR	Sindong JCT - Dongdaegu	28.64
2	Gyeongbu Line	Daegu - Dongdaegu	28.53
3	Gyeongbu Line	Jicheon - Daegu	28.31
4	Gyeongbu Line	Dongdaegu - Gacheon	27.43
5	Gyeongbu HSR	Dongdaegu – Daegu South JCT	27.43
6	Gyeongbu HSR	Daegu South JCT – Singyeongju JCT	27.01
7	Daegu Line	Gacheon - Geumgang	26.68
8	Gyeongbu Line	Gacheon - Gyeongsan	26.64
9	Daegu Line	Hayang - Geumho	26.64
10	Gyeongbu Line	Gomo - Gacheon	26.59
11	Gyeongbu Line	Daegu South JCT - Daegu South JCT	26.28
12	Gyeongbu Line	Daegu South JCT - Gomo	26.26
13	Gyeongbu Line	Gyeongsan - Samseong	25.53
14	Gyeongbu Line	Daegu North JCT - Jicheon	25.48
15	Daegu Line	Cheongcheon - Hayang	25.45
16	Daegu Line	Geumgang - Cheongcheon	25.43
17	Gyeongbu HSR	Gimcheongumi – Daegu North JCT	24.30
18	Jungang Line	Hwasan - Sinnyeong	23.93
19	Daegu Line	Geumho – Yeongcheon JCT	23.93
20	Gyeongbu Line	Sindong – Daegu North JCT	23.88
21	Gyeongbu Line	Yakmok - Waegwan	23.81
22	Gyeongbu Line	Waegwan - Yeonhwa	23.60
23	Gyeongbu Line	Yeonhwa - Sindong	23.46
24	Jungang Line	Sinnyeong - Gaphyeon	23.19
25	Gyeongjeon Line	Seogwangju - Hyocheon	22.99
26	Gyeongjeon Line	Dongsongjeong - Seogwangju	22.91
27	Jeolla Line	Dongsan - Jeonju	22.69
28	Gyeongbu Line	Gimcheon - Daesin	22.38
29	Gwangju Line	Gwangju Line JCT - Geugnakgang	22.21
30	Gyeongbu HSR	Daejeon South JCT - Gimcheongumi	22.00

주요 집중지가 될 수 있음을 시사한다. 특히, 열차 운행 편수와 기온 리스크가 동시에 높은 구간에서의 운행 제한은 열차 지연, 혼잡, 운영 효율 저하 등 광범위한 시스템적 영향을 유발할 가능성이 크다.

특히, 수도권 구간의 경우 일반열차와 수도권 전철이 혼용 운행되며, 지방과 서울을 연결하는 주요 열차 대부분이 해당 구간을 경유하기 때문에, 운행 제한이 실제로 발생할 경우 철도 시스템 전반에 미치는 파급 효과가 클 것으로 예상된다.

한편, 기존 분석에서 높은 비정상 운행일수를 보였던 경부고속선 신동분기 ~ 동대구 구간, 경부선 대구 ~ 동대구, 지천 ~ 대구의 경우에도 각각 연간 4,410.18편, 2,167.90편, 2,151.75편의 비정상 운행 편수가 확인되었으며, 이는 해당 구간이 온도 노출도와 운행 밀도 모두에서 높은 리스크를 가진다는 점을 시사한다. 반면, 동일하게 높은 온도 리스크가 나타났던 대구선 가천 ~ 금강 구간(26.68일) 및 하양 ~ 금호 구간(26.64일)은 각각 613.53편, 612.66편으로 비교적 낮은 운행 편수를 기록하였다. 이는 고온 리스크가 높더라도 운행 빈도가 낮은 구간은 전체 시스템에 미치는 실질적 영향이 제한적일 수 있음을 의미한다.

종합적으로 살펴보면, 기온 상승에 따른 운행 제한이



(a) Spatial Distribution Across the National Rail Network (b) Top 30 Most Affected Sections

Fig. 5. Average annual number of trains affected by operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100)

운행 편수와 결합될 때, 그 영향은 비단 고온 취약지뿐 아니라, 수도권과 같이 고빈도 운행이 집중된 지역에서도 심각한 수준으로 나타날 수 있다. 실제로 본 분석에서는 수도권 지역을 중심으로 한 경부선, 경인선과 비교적 운행 편수가 많은 경부고속선(서울 ~ 경주 구간)에서 비정상 운행 편수가 가장 많게 나타나는 경향이 확인되었다. 이러한 결과는 단순한 온도 기준 기반의 평가를 넘어서, 운행 밀도와의 통합적 고려가 필수적임을 시사한다.

3.5. 지역별 분석

3.5.1. 수도권 지역

수도권은 비정상 운행일수 기준에서는 상위 30위권에 포함되는 구간이 많지 않았으나, 서울 도심의 경부선과 경원선, 남양주시 구간의 중앙선, 광명 ~ 천안아산 구간의 경부고속선, 수원 ~ 천안 구간의 경부선 등에서는 약 16 ~ 20일의 운행 제한이 관측되었다. 다만 운행 편수 기준으로 보면 수도권의 영향은 뚜렷하게 나타난다. 서울을 기점으로 전국으로 향하는 대부분의 열차가 통과하고, 광범위한 전철망이 운영되는 특성상, 경부선의 영등포 ~ 신길과 신길 ~ 대방, 신도림 ~ 영등포, 대방~노량진, 구로~신도림 구간 등에서는 각각 9천 편 이상이 영향을 받았다. 특히 영등포 ~ 신길 구간은 약 9,733편으로 수도권 내에서 가장 높은 수치를 기록하였다.

3.5.2. 충청 지역

충청권은 전국적으로 상위권을 차지하지는 않았으나, 청주시 인근의 충북선과 오송 ~ 익산 구간의 호남고속선, 오송 ~ 대전 구간의 경부고속선, 대전조차장 ~ 익산 구간의 호남선, 가남 ~ 충주 구간의 중부내륙선 등에서 20일 전후의 운행 제한이 관측되었다. 반면 장항선은 상대적으로 낮은 수치를 보였다. 운행 편수 측면에서는 충북선과 장항선, 중부내륙선의 경우 절대 운행량이 적어 영향 편수도 제한적이었으나, 천안아산 ~ 대전 ~ 김천구미로 이어지는 경부고속선 구간은 열차 통행량이 많아 천안아산 ~ 오송 구간에서만 약 3,736편, 경부선의 두정 ~ 직산과 직산 ~ 성환 구간에서도 3,500편 이상이 비정상 운행으로 집계되었다.

Table 5. Average annual number of trains affected by operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Top 30)

No.	Line	Section	Average Annual Number of Trains Affected
1	Gyeongbu Line	Yeongdeungpo - Singil	9,733.05
2	Gyeongbu Line	Singil - Daebang	9,713.70
3	Gyeongbu Line	Sindorim - Yeongdeungpo	9,675.00
4	Gyeongbu Line	Daebang - Noryangjin	9,526.65
5	Gyeongbu Line	Guro - Sindorim	9,268.65
6	Gyeongbu Line	Noryangjin – Yongsan JCT	8,939.70
7	Gyeongbu Line	Yongsan JCT - Yongsan	8,578.50
8	Gyeongbu Line	Yongsan- Namyeong	7,115.50
9	Gyeongbu Line	Namyeong - Seoul	6,211.35
10	Gyeongbu Line	Guro JCT - Guro	5,741.64
11	Gyeongbu Line	Gasan Digital Complex – Guro JCT	5,375.15
12	Gyeongbu Line	Doksan – Gasan Digital Complex	5,274.05
13	Gyeongbu Line	Geumcheongu Office - Doksan	4,966.54
14	Gyeongbu Line	Siheung JCT – Geumcheongu Office	4,890.71
15	Gyeongbu HSR	Sindong JCT - Dongdaegu	4,410.18
16	Gyeongui Line	Gangmae - Hwajeon	4,195.13
17	Gyeongui Line	Hwajeong – Susaek JCT	4,124.50
18	Gyeongbu HSR	SR JCT - Cheonanasan	4,101.96
19	Gyeongbu Line	Byeongjeom - Seryu	4,038.56
20	Gyeongui Line	Neunggok - Haengsin	3,926.75
21	Gyeongbu HSR	Dongdaegu – Daegu South JCT	3,896.93
22	Gyeongui Line	Haengsin - Gangmae	3,813.75
23	Gyeongbu HSR	Daegu South JCT – Singyeongju JCT	3,808.76
24	Gyeongbu HSR	Gimcheongumi – Daegu North JCT	3,742.20
25	Gyeongbu HSR	Cheonanasan - Osong	3,735.56
26	Gyeongbu Line	Seonkyunkwan University - Uiwang	3,732.56
27	Gyeongui Line	Susaek JCT - Susaek	3,723.35
28	Gyeongbu Line	Hwaseo – Seongkyunkwan University	3,649.69
29	Gyeongbu Line	Suwon - Hwaseo	3,649.69
30	Gyeongbu Line	Dujeong - Jiksan	3,602.55

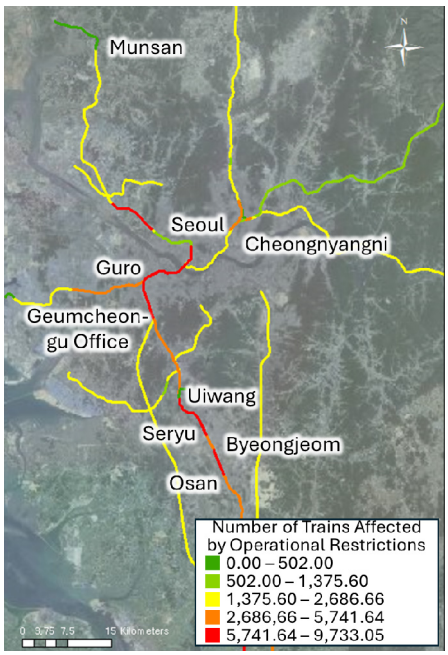
3.5.3. 강원 지역

강원권은 전국에서 가장 영향이 적은 권역으로 나타났다. 중앙선과 경강선이 지나는 원주시 인근에서 서원주~원주와 서원주~만종 구간이 각각 17.88일, 삼산~서원주 구간이 17.01일로 비교적 높은 운행 제한을 보였으나, 전체적으로는 제한적이었다. 영향 편수 역시 미미하여, 수도권 전철이 병행 운행되는 경춘선 일부 구간에서만 가평~굴봉산 1,120편, 굴봉산~백양리 1,103편, 백양리~강촌 1,080편 수준으로 나타났을 뿐, 다른 노선은 뚜렷한 영향을 보이지 않았다.

3.5.4. 호남 지역

호남권은 광주광역시와 전주시 인근에서 영향이 집중되었다. 경전선의 서광주~효천과 동송정~서광주 구간은 각각 22.99일과 22.91일, 전라선의 동산~전주 구간은 22.69일로 전국 상위권에 속했으며, 광주선 연선 또한 20일 이상을 기록하였다. 그러나 국토 말단부의 호남선과 전라선, 경전선은 운행량이 적어 영향 편수는 상대적으로 낮았다. 그럼에도 불구하고 호남고속선의 정읍~북송정분기 구간은 약 1,307편, 북송정분기~광주송정역은 1,236편, 익산~정읍은 1,169편이 비정상 운행으로 집계되어 주요 간선 구간에서의 영향은 뚜렷하게 나타났다.

(a) Average Annual Days with Operational Restrictions



(b) Average Annual Number of Trains Affected by Operational Restrictions

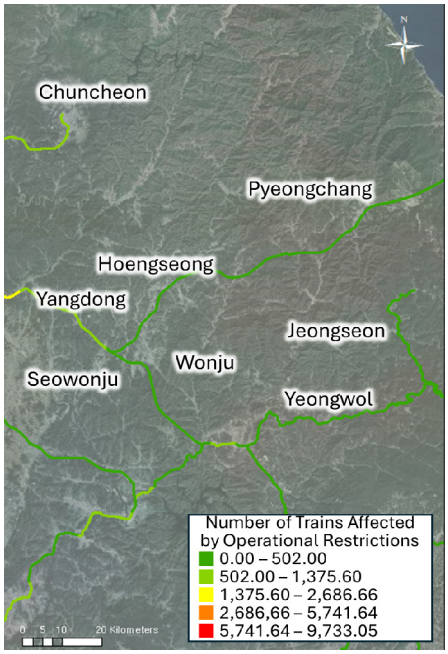
Fig. 6. Average annual operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Seoul Metropolitan Area)

(a) Average Annual Days with Operational Restrictions

(b) Average Annual Number of Trains Affected by Operational Restrictions

Fig. 7. Average annual operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Chungcheong Region)

(a) Average Annual Days with Operational Restrictions



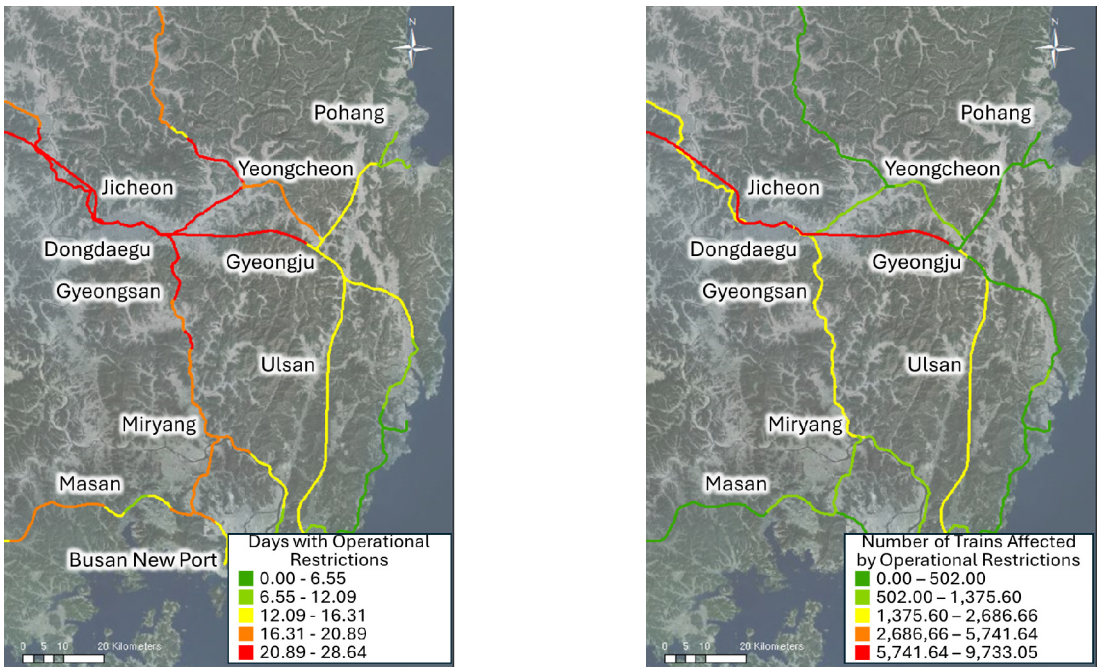
(b) Average Annual Number of Trains Affected by Operational Restrictions

Fig. 8. Average annual operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Gangwon Region)

(a) Average Annual Days with Operational Restrictions

(b) Average Annual Number of Trains Affected by Operational Restrictions

Fig. 9. Average annual operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Honam Region)



(a) Average Annual Days with Operational Restrictions

(b) Average Annual Number of Trains Affected by Operational Restrictions

Fig. 10. Average annual operational restrictions by rail section under SSP585 scenarios (2021 ~ 2100, Yeongnam Region)

3.5.5. 영남 지역

영남권은 전국에서 가장 큰 영향을 받은 권역으로, 특히 대구를 중심으로 한 경부선과 경부고속선 구간에서 그 영향이 두드러졌다. 신동분기점 ~ 동대구 구간은 28.64일, 대구 ~ 동대구는 28.53일, 지천 ~ 대구는 28.31일로 전국 최고 수준의 운행 제한일을 기록하였다. 이와 더불어 동대구 ~ 가천 구간과 동대구 ~ 대구남연결선 구간도 27일 이상을 기록하였다. 영향 편수 또한 대구북연결선 ~ 동대구 구간에서 4,410편, 대구남연결선분기 ~ 신경주분기에서 3,809편, 김천구미 ~ 대구북연결선분기에서 3,742편이 집계되는 등 전국적으로 높은 수준을 나타냈다.

4. 고찰

본 연구는 SSP126과 SSP585 기후 변화 시나리오를 바탕으로 철도 레일 온도 변화와 이에 따른 열차 운행 제한 가능성을 정량적으로 분석하였다. 시나리오 간 비교 결과, SSP585 시나리오에서는 비정상 운행일수 및 운행 중단일수가 모두 통계적으로 유의한 증가 추세를 나타냈으며, 특히 2080년 이후에는 일부 연도에서 각각 연간 50일 및 20일을 초과하는 수준으로 확대되었다. 이는 장기적으로 여객 및 화물 수송 지연, 물류 비용 상승, 심지어 탈선 등과 같은 안전 이슈로까지 이어질 수 있는 구조적 리스크를 시사한다.

그러나 기후 변화로 인한 철도 운행 장애는 전국적으로 균질하게 발생하지 않는다. 본 연구에서는 대구광역시를 중심으로 한 영남 내륙지역, 광주광역시 및 전주시 일대 등에서 고온 노출도가 특히 높게 나타났으며, 신동 ~ 동대구 구간은 연평균 28.64일, 서광주 ~ 효천 구간은 22.99일, 동산 ~ 전주 구간은 22.69일의 바종성 운행일수를 기록하였다. 이러한 결과는 해당 지역의 철도망이 상대적으로 높은 운행 제한 및 중단 위험에 직면하고 있음을 보여준다. 이는 철도망의 기후 취약성이 지역적 기후 특성과 지형 조건에 따라 상이하게 나타날 수 있으며, 공간적으로 차별화된 대응 전략이 필요함을 의미한다.

한편, 기온 노출도만으로는 철도 운영에 미치는 실질적 영향을 충분히 설명하기 어렵다. 동일한 수준의 운행 제한일수가 발생하더라도, 해당 구간의 열차 운행 횟수에 따라 사회적·경제적 파급효과는 크게 달라질 수 있다. 예

를 들어, 대구선과 같이 고온 노출도는 높으나 운행 빈도가 낮은 구간은 시스템 차원의 영향이 제한적인 반면, 서울 도심을 통과하는 경부선과 경인선은 운행 빈도가 매우 높아 단 몇 일의 운행 제한만으로도 수백 편의 열차 지연이 발생할 수 있다. 즉, 편수 대비 영향을 고려하지 않으면 열차 운행이 집중되는 수도권 구간의 리스크가 과소평가될 수 있으며, 이는 기후 노출도와 운행 밀도를 통합적으로 고려한 복합적 취약성 평가의 필요성을 더욱 뒷받침한다. 이러한 관점은 향후 철도 기후 리스크 관리에서, 단순한 고온 노출 구간뿐 아니라 운행 밀도가 집중된 구간까지 우선순위로 포함해야 함을 시사한다.

이러한 분석은 철도 인프라 유지관리와 기후 적응 전략 수립을 위한 우선순위 설정에 실질적인 기초자료로 활용될 수 있다. 고온 노출도와 운행 밀도가 동시에 높은 구간에 대해서는 차열 도료 도포, 살수 냉각, 선로 단열 강화 등의 기술적 대응이 선제적으로 적용되어야 하며, 단기적으로는 실시간 레일 온도 모니터링 체계와 조기경보 시스템의 구축이 병행되어야 한다. 특히, SSP585 시나리오와 같이 온실가스 배출이 지속될 가능성에 대비해, 고위험 지역 중심의 실측 기반 모니터링 지점 선정과 데이터 축적은 중장기적 정책 수립에 있어 핵심적인 역할을 할 수 있다.

다만, 본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 레일 온도 산정에서 기온 중심의 단순 모델을 적용하였고, 분석은 현재 철도망 구조와 일별 평균 운행 횟수를 기준으로 수행되었다. 따라서 일사량·풍속·시간대별 운행 패턴 등 세부 요인을 반영하지 못했으며, 향후에는 이러한 요소를 고려한 정밀 분석이 필요하다.

결론적으로, 철도망의 기후변화 취약성은 단일 요인이 아닌, 기온 상승, 운행 밀도, 지역적 특성 등 다중 요인의 상호작용에 의해 결정된다. 본 연구는 이러한 다차원적 취약성에 대한 통합적 분석틀을 제시함으로써, 지역별 위험 등급화와 전략적 대응 우선순위 설정을 위한 실증 기반을 제공하였으며, 향후 철도 부문의 회복력 향상 및 기후 적응 전략 수립에 있어 실질적인 기여를 할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 기후 변화에 따른 철도망의 운영 리스크를 정량적으로 평가하기 위해, SSP126 및 SSP585 시나리오 기반의 기온 데이터를 활용하여 레일 온도 변화를 산정하고, 열차 운행 기준에 따라 비정상 운행일수 및 운행 중단 일수를 도출하였다. 이를 바탕으로 철도 노선 및 구간별 취약성을 비교 분석하고, 열차 운행 횟수를 고려한 실제 운영 리스크를 종합적으로 평가하였다. 분석 결과, SSP585 시나리오에서는 21세기 중후반 이후 고온 일수의 급증과 함께 열차 운행 제한 및 중단 가능성이 크게 증가할 것으로 예측되었다. 특히 대구, 광주, 전주 등 내륙 및 남부 도시권에서 고온 노출도가 높은 구간이 집중되었으며, 서울 도심의 경부선 및 경인선 등 운행 밀도가 높은 구간에서는 비교적 낮은 고온 일수에도 불구하고 수백 편의 열차가 영향을 받을 가능성이 확인되었다. 이는 철도 기후 리스크가 단순한 온도 노출뿐만 아니라, 지역적 기후 특성, 운행 빈도, 네트워크 구조 등 복합적 요인에 의해 결정된다는 점을 시사한다.

본 연구의 주요 기여는 기후 변화 시나리오를 활용하여 레일 온도 기반의 운행 리스크를 정량화하고, 운행 빈도를 반영한 실질적 영향 범위를 구체적으로 제시한 데 있다. 이를 통해 고온 취약 구간을 식별하고, 철도망 유지관리 및 기후 적응 전략 수립을 위한 우선순위 설정에 실질적인 기초자료를 제공하였다. 향후에는 레일 온도 예측 모형의 정밀화, 철도 인프라 변화 시나리오 반영 등을 통해 분석의 정밀성과 실효성을 더욱 높일 수 있을 것이다. 또한, 정책적 측면에서는 고온 취약 구간에 대한 선제적 대응과 함께, 실시간 레일 온도 모니터링 체계 구축 및 조기경보 시스템 도입이 병행되어야 한다. 본 연구는 철도 부문의 기후변화 대응력 강화를 위한 실증 기반을 마련하였으며, 향후 철도 시스템의 지속가능성과 회복력을 제고하는 데 기여할 수 있을 것이다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002123).

Reference

Aviation and Railway Accident Investigation Board. 2015. Investigation report on the freight train derailment between Updong and Uiseong stations on the Jungang Line. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure

and Transport.

Aviation and Railway Accident Investigation Board. 2019. Investigation report on the freight train derailment at Daejeon marshalling yard on the Gyeongbu Line (public version). Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Choi J, Yi G, Bae H, Park B, Lim N. 2010. Investigation on the temperature characteristics of CWR for the climate change (in Korean with English abstract). J Korean Soc Railway 13(2): 179-185.

Government of the Republic of Korea (Joint Ministries). 2020. The 3rd National Climate Change Adaptation Plan (2021-2025). Sejong, Korea: Government of Korea. Policy Report.

Government of the Republic of Korea (Joint Ministries). 2023. The 3rd Strengthened Plan for Climate Crisis Adaptation. Sejong, Korea: Government of Korea. Policy Report.

Hong S, Lim N, Bae H, Kim K, Kim H, Cho S. 2018. The analysis of deformation according to the temperature distribution in rail (in Korean with English abstract). J Korean Soc Hazard Mitig 18(2): 33-38.

IPCC. 2023. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC. 184 pp. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Kim M, Bae H, Choi J, Lim N. 2013. Reliability evaluation of the speed reduction scheme in Korean high-speed train based on the reliability of the CWR buckling (in Korean with English abstract). J Korean Soc Hazard Mitig 13(5): 291-296.

Korea Meteorological Administration (KMA). 2024. 2024 Yearbook Korea Meteorological Administration. Seoul, Korea: KMA. Policy Report.

O'Neill BC, Kriegler E, Ebi KL, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman DS, van Ruijven BJ, van Vuuren DP, Birkmann J, Kok K, Levy M, Solecki W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Glob Environ Change 42: 169-180. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004

Park J, Kang D. 2021. A study on the influence factors of coating thickness of thermal insulation paints to prevent buckling of CWR in summer season (in Korean with English abstract). J Korean Soc Urban Rail Transit 9(4): 1091-1099.

Park JK, Jung WS, Lee J, Kim E. 2011. Case analysis and statistical characteristics of a railroad weather-related accidents and incidents each railroad line in the Korean Peninsula (in Korean with English abstract). J Korean Soc Railway 14(1): 73-79.

Park S, Lee H, Moon J. 2024. Applicability evaluation of CWR-setting temperature criteria based on future climate change scenarios (in Korean with English abstract). J Korean Soc Railway 27(3): 175-184. doi: 10.7782/JKSR.2024.27.3.175

Zinzi M, Agnoli S, Burattini C, Mattoni B. 2020. On the thermal response of buildings under the synergic effect of heat waves and urban heat island. Solar Energy 211: 1270-1282. doi: 10.1016/j.solener.2020.10.050