

서울시 지하철도의 침수 위험도 평가

장유정

서울시 지하철도의
침수 위험도 평가



연구책임

장유정 서울대학교 환경대학원 박사과정

연구진

곽민진 서울대학교 환경대학원 석사과정

정하늘 서울대학교 환경대학원 석사과정

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

목차

01 서론	1
1_연구 배경 및 목적	1
02 논의 배경과 선행연구 고찰	3
1_기후변화와 극한 강수 현상	3
2_국내 지하철도 침수 피해 현황	5
3_서울시 지하철도 침수 대응 현황	6
4_선행연구 검토	7
03 연구 방법	10
1_연구 대상	10
2_연구 데이터	10
3_분석 방법	12
04 분석 결과	14
1_공간데이터 구축	14
2_지하차도 침수 위험 분석	24
05 결론	29
1_정책적 제언	29
2_연구의 의의 및 한계	30
참고문헌	32
부록	35

표 목차

[표 2-1] 국내 지하차도 침수 대응 현황 정리	7
[표 2-2] 선행연구 정리	9
[표 3-1] 서울시 침수 위험도 평가 지표	11
[표 4-1] NDVI class interval(Aquino et al., 2018)	20
[표 4-2] 서울시 지하차도 연장 현황	26
[표 4-3] 기후변화 시나리오를 고려한 강수예측 데이터 분석	28

그림 목차

[그림 2-1] SSP 시나리오 구분(국립기상과학원, 2024)	4
[그림 2-2] SSP1과 SSP5의 한반도 극한 강수지수 전망(국립기상과학원, 2020)	4
[그림 4-1] GIS Layer: 지하차도 위치 및 형태	14
[그림 4-2] GIS Layer: Elevation Standard Deviation	15
[그림 4-3] GIS Layer: Slope	16
[그림 4-4] GIS Layer: Curvature	17
[그림 4-5] GIS Layer: Topographic Wetness Index	18
[그림 4-6] GIS Layer: Drainage Network	19
[그림 4-7] GIS Layer: Normalized Difference Vegetation Index	20
[그림 4-8] GIS Layer: Rainfall Intensity	21
[그림 4-9] GIS Layer: Pipe Intensity	22
[그림 4-10] GIS Layer: Population Density	23
[그림 4-11] 전체 지하차도 엔트로피 분석 결과	24
[그림 4-12] U자형 지하차도 엔트로피 분석 결과	25
[그림 4-13] 지하차도 연장 250m 이상의 U자형 지하차도 엔트로피 분석 결과	26
[그림 4-14] 생활인구 50만/일 대상, 지하차도 연장 250m 이상의 U자형 지하차도 엔트로피 분석 결과	27

01. 서론

1_연구 배경 및 목적

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제 6차 보고서(The Sixth Assessment Report, AR 6)에 따르면 기후변화와 기상 이변으로 극단적 기상 현상의 빈도와 강도가 증가하고 있다. 최근 기후변화로 인한 고온 또는 극한 기온, 단시간 엄청난 폭우는 우리의 삶 속에서 기후변화를 체감하게 한다. 2022년 8월 서울 강남 지역에는 500년에 한 번 있을 수 있는 시간당 141mm 이상의 기록적 폭우가 발생한 바 있다(이선옥, 2024). 향후 기후변화의 영향으로 이러한 극한 강수의 빈도는 점차 증가할 것으로 예상된다. IPCC AR 6에서 공개한 기후변화 시나리오에 따라 추정된 2000년대 중반(2041~2060)의 서울시 연 강수량은 2000년대 초반(2000~2019) 대비 8.7~15.2% 증가할 것으로 전망된다(기상청, 2023).

이처럼 단기간 극한 강우 현상과 연간 총강수량이 모두 증가할 것으로 예상되는 상황 속에서 과거 수치 기준으로 설계된 서울시 도시 인프라는 현재와 미래의 침수 위험을 효과적으로 관리하는데 한계가 있다. 앞서 언급한 2022년 8월 서울 강남 지역 침수는 서울시 배수체계 설계 용량인 시간당 95mm(30년 빈도)를 크게 상회하였고 그 결과 침수로 인한 피해가 발생했다(서울인포그래픽스, 2022). 이후 서울시에서는 서울 전역의 방재성능 목표를 시간당 100~110mm로 상향하였고 새로운 기준에 맞춰 풍수해 대책을 수립하였다(내 손안에 서울, 2023). 하지만, 이미 시간당 141mm 이상의 폭우가 발생했던 점을 고려할 때, 방재성능 목표를 만족하는 시설을 마련하더라도 침수 위험을 완전히 제거할 수 없다. 이에 침수 발생 시 서울 시민의 안전을 위한 피해 예방 대책이 필요하다. 특히, 빗물이 도시의 저지대로 집중됨을 고려할 때 도시의 대표적인 지하 공간인 지하차도의 침수 위험 경감을 위한 시급한 대책 마련이 요구된다.

2022년 8월 폭우 시 서울시 내 지하철도 16곳이 침수되었고 이로 인해 인명 및 재산 피해가 발생하였으며(이규연, 2023), 2023년 7월 충북 청주 오송의 궁평 2지하차도에서는 침수로 인해 24명의 사상자와 14명의 사망자가 발생하는 안타까운 사건이 발생했다(김호경 외, 2023). 이는 복합화 및 대형화되는 재난 환경에서 정책 체제 및 시스템의 한계로 효율적 대응이 이루어지지 못하기 때문이다(이준, 2023). 만약 지하차도 침수 상황에서 관련 위험을 운전자에게 사전 고지하고, 차량의 지하차도 진입을 원격으로 차단하는 시스템이 있었다면, 대규모 공공 인력의 동원 없이도 적절한 통제가 이루어져 안전관리의 효과성을 확보할 수 있었다(이규연, 2023). 하지만, 2022년 8월 서울의 역사적 폭우로부터 1년 경과 후 점검결과, 여전히 서울시 전체 지하철도 163개소(2023년 10월 기준) 중 48.5%인 79개소에 안전관리 및 피해 예방을 위한 자동 차단 시설이 설치되지 않는 것으로 나타났다(박다해, 2023).

따라서, 본 연구는 서울시 내 지하철도 중 침수 위험이 상대적으로 높은 지역에 위치한 지하철도를 선별하여, 위험이 높은 지하철도부터 우선적으로 안전관리 및 피해예방을 위한 시스템이 설치될 수 있도록 촉구하는 데 그 목표가 있다. 기후변화로 인한 폭우 및 침수 위험이 높아지는 상황 속에서 서울시 지하철도의 상대적 침수 위험을 평가하는 것은 신속한 대응 및 저감 대책 마련을 위한 기본이자 필수 단계라 할 수 있다(Abdulrazzak et al., 2018; Pathan et al., 2022). 물론, 동시에 모든 지하철도에 피해 예방 시스템을 설치하는 것이 가장 이상적이지만, 현실적으로는 위험도가 높은 시설부터 먼저 관리하는 것이 예산과 자원의 효율적 사용을 도모하는 효과적인 재난 대응의 방안이기 때문이다(이하늘 외, 2023). 그러므로 본 연구에서는 서울시 전역의 침수 위험을 파악하고, 지하철도의 상대적인 침수 위험을 평가해 보고자 한다.

02. 논의 배경과 선행연구 고찰

1_기후변화와 극한 강수 현상

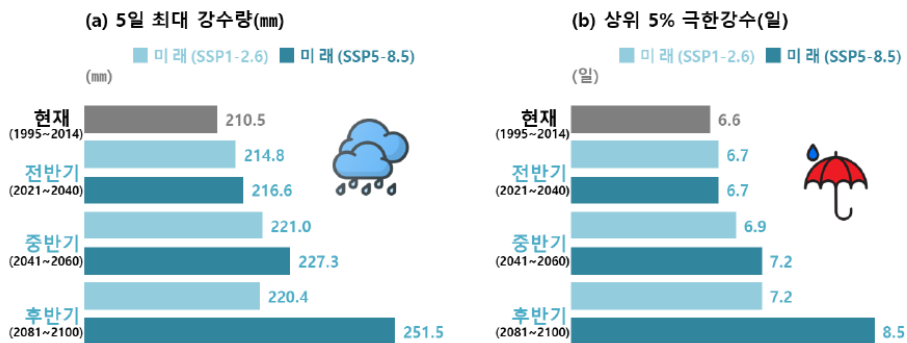
기후변화로 인해 증발하는 수증기량이 늘어나면서 극한 강수 현상이 증가하고 있다(IPCC, 2022). 대기 온도가 1°C 상승할 때 대기의 수증기량은 약 7% 정도 증가하며, 이로 인해 집중 호우형 강수가 발생한다(조민수, 2021). 실제로 국내 2023년 연평균 기온은 평년보다 1.2°C 높게 나와 1973년 이후로 가장 높은 수치를 기록했고(기상청, 2024), 확률적으로 수십에서 수백 년에 한 번 내릴 시간당 100mm의 호우가 거의 매년 오고 있는 추세이다(이선욱, 2024).

IPCC AR6 기후변화 시나리오인 공동사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)를 기반으로 한 한반도의 강수 극한기후지수를 통해 국내 강수 특성의 변화를 확인할 수 있다. 먼저, SSP 시나리오는 온실가스로 인한 추가적인 지구흡수 에너지양인 복사강제력 개념과 인구, 경제, 에너지 사용 등 사회경제 지표를 같이 고려한 기후변화 시나리오로, [그림 2-1]과 같이 다섯 가지로 구분된다. SSP에서의 숫자는 기후변화 적응 및 완화를 위한 사회경제적 노력을 의미하며, 숫자가 커질수록 기후변화 적응과 관련한 해당 노력이 미약함을 뜻한다.



[그림 2-1] SSP 시나리오 구분(국립기상과학원, 2024)

[그림 2-2]는 SSP 시나리오 중 SSP1(지속성장 경로)과 SSP5(고속성장 경로)의 경우 미래 한반도 극한 강수량 및 강수일수가 어떻게 변화할지 국립기상과학원에서 예측한 결과이다. 두 경우 모두 강수량과 강수일수가 증가하지만, 시간이 지남에 따라 SSP1과 SSP5의 격차가 벌어지고, 특히 후반기에는 SSP5의 예측치가 매우 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 기후변화가 심화할수록 우리나라의 극한 강우 현상이 증가하고, 위험 대응을 위한 노력도 더욱 필요함을 알 수 있다.



[그림 2-2] SSP1과 SSP5의 한반도 극한 강수지수 전망(국립기상과학원, 2020)

분석 대상을 서울시로 한정했을 때는 현재(1995~2014년) 대비 21세기 후반기(2081~2100년)에서 SSP5가 SSP1 대비 강수량은 1.4mm/일 더 많고, 호우일수는 0.4일 더 긴 것으로 나타났다(기상청, 2023). 이를 통해 한반도와 서울시에서 모두 기후변화의 심화로 향후 극한 강수현상이 증가하고, 그 강도는 강해진다고 추정할 수 있다. 그러므로 이러한 미래 상황을 고려한 기후변화 적응 대책의 시행이 필요하다.

2_국내 지하차도 침수 피해 현황

지하차도는 지하에 만든 터널 형태의 입체교차로로써 도로의 교통체증을 완화하지만, 집중호우가 발생했을 때 배수가 원활히 이루어지지 않을 경우 침수로 이어진다(감사원, 2019). 2021년 기준 전국 925개의 지하차도 중 침수를 한 번 이상이라도 겪은 지하차도는 전체의 약 10%인 89곳이었다(이슬기, 2023). 이 중 대표적인 피해 사례로 2017년 7월 5일 천안 청당지하차도 차량 3대 침수사건, 2018년 8월 29일 김포 장기지하차도 차량 9대 침수사건을 들 수 있다(감사원, 2019). 또한, 2020년 7월 23일 부산 동구 초량제1지하차도 침수로 3명이 숨졌으며, 2023년 7월 15일에는 청주 오송 구평2지하차도 침수로 14명의 사망자가 발생했다(곽진석, 2024).

지하차도의 침수 피해 가능성은 집중호우의 강우와 빈도가 증가하는 상황에서 더욱 상승할 것으로 예상되며, 이에 지하차도 침수 시 피해 예방과 대응의 중요성이 대두되고 있다. 국내 925개의 지하차도 설계 시 고려한 재난 발생 빈도를 살펴보면 10년 미만이 55개, 11~30년이 137개, 31~50년은 69개, 51년 이상 빈도가 6개이었고, 알 수 없음이 658개였다(이슬기, 2023). 게다가 도로 배수시설 설계 및 관리지침이 제정되기 전인 2004년 이전에 준공된 지하차도의 경우에는 침수 확률이 더 높을 것으로 파악되었다(이슬기, 2023). 향후 지하차도의 변경 시공을 통해 원천적으로 침수 피해가 발생하지 않도록 관리해야 하겠지만, 이는 많은 시간과 예산을 요구한다. 따라서, 지하차도가 침수되더라도 인명과 재산상 피해가 발생하지 않도록 침수 위험을 사전에 고지하고, 침수에도 작동할 수 있는 원격 차단 시스템 등을 설치하는 조치가 필요하다. 이를 위해서는 각 지하차도가 직면한 침수 위험을 상대적으로 파악하고, 위험이 높은 차도부터 우선적인 예방 조치를 취하여 관련 위험을 효과적으로 관리하여야 한다.

3_서울시 지하차도 침수 대응 현황

서울시는 2022년 8월 폭우 이후 방재성능 목표를 상향하여 시간당 100~110mm 강우를 처리할 수 있도록 설계 기준을 강화하고 새로운 기준에 맞춰 다양한 대책을 마련하였다(물순환안전국, 2024). 하지만 지하차도 침수 시 대응 조치는 미흡하였다. 2023년 점검결과 2022년 8월 폭우로 침수된 서울시 지하차도 16곳 중 진입 자동차단 시설이 설치된 곳은 3곳이었으며, 서울시는 예산 확보의 한계로 인해 모든 지하차도에 해당 시설 설치가 어려웠다고 밝혔다(이규연, 2023). 또한, 서울시 전체 지하차도 중 침수 피해 경감을 위한 별도의 차단 시설이 없는 지하차도는 79개소이며, 이 중 54개소는 진입통제 전광표지판만 설치되어 있었고, 모니터링을 위한 CCTV조차 설치되지 않은 지하차도도 21개소였다(박다해, 2023). 이처럼 2023년까지도 지하차도 침수 대응을 위한 서울시의 조치는 미비한 것으로 파악되었다.

관련한 문제가 지속적으로 제기되자 2024년부터 중앙정부와 서울시는 지하차도 침수 대응 대책을 본격적으로 마련하기 시작하였다. 2024년 4월 국토교통부에서는 「도로 터널 방재·환기시설 설치 및 관리 지침」을 개정하여 U자형 지하차도 대상 진입 차단 시설 설치를 의무화하였고, 지하차도 등급과 상관없이 250m 이상의 터널에는 침수 시 전기 공급이 중단되지 않도록 무정전 설비의 설치를 의무화하였다(행정안전부, 2024c). 2024년 5월에는 ‘빗물받이 청소 주간’을 운영하여 배수 시설을 집중 점검하였다(행정안전부, 2024b). 또한, 지하차도 침수 시 내비게이션을 통해 운전자들에게 위험을 사전에 고지하고자, 과학기술정보통신부·환경부 등의 정부 부처는 현대자동차, 카카오모빌리티, 티맵모빌리티 등 6개의 기업과 ‘도로·지하차도 침수사고 예방을 위한 내비게이션 고도화’ 업무협약을 체결하였다(김민범, 2024). 내비게이션 고도화의 주요 내용은 도로나 지하차도 인근(반경 1.5km 이내)을 지날 때 운전자에게 실시간 위험 상황을 전달하는 것이다(과학기술정보통신부·환경부, 2024).

서울시는 2024년 6월까지 서울 시내 침수 우려가 있는 지하차도 98개소에 침수감지 장치, 진입차단설비 또는 진입금지 전광표지판 설치를 완료했으며, 이외에도 78개소에는 비상사다리를, 11개소에는 비상탈출구를 설치했다(내 손안에 서울, 2024). 또한, 지하차도 현장 모니터링, 차량통제 등의 역할을 수행하고자 각 지하차도별 4명의 담당자를 지정해 관리 체계를 만들었다(내 손안에 서울, 2024).

향후 서울시에서는 터널 내 강우 처리 용량을 30년 빈도·95mm에서 50~100년 빈

도·100~110mm로 상향할 계획이며, 침수 취약 지역에 대심도 빗물터널 6개소 설치를 계획하고(문희철, 2022), 강남역, 도림천, 광화문에 2028년 완공을 목표로 빗물터널 건설 사업을 추진하고 있다(이재영, 2024). 지하철도 침수 예방을 위해 정부와 서울시에서 대규모 토목 공사계획을 발표하고 있지만, 이는 장기간 대규모의 예산을 필요로 하는 사업이라는 점과 최신화된 인프라를 갖춘다고 할지라도 극단적 기상 상황에 완벽하게 대응할 수 없다는 점을 감안할 때, 시민의 안전 확보를 위해서는 지하철도 침수 위험 평가를 기반으로 한 신속한 관리 대책의 마련과 적용이 필요하다 할 수 있다.

[표 2-1] 국내 지하철도 침수 대응 현황 정리

일자	내용	주체
2024년 4월	「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리 지침」 개정을 통한 U자형 지하철도 진입 차단시설 의무화 250m 이상의 터널 대상 침수 시 무정전 설비 설치 의무화	국토교통부
2024년 5월	‘빗물받이 청소 주간’에 따른 배수 시설 집중 점검 ‘도로·지하차도 침수사고 예방을 위한 내비게이션 고도화’ 업무협약 체결	국토교통부
2024년 6월	- 지하차도 98개 대상 침수감지장치, 진입차단설비 혹은 진입 금지 전광표지판 설치 완료 - 지하차도별 관리를 위한 체계 형성	서울특별시
향후 계획	- 터널 내 강우 처리 용량 상향 (95mm→100~110mm) - 강남역, 도림천, 광화문에 빗물터널 건설 사업 추진(2028년 완공 목표)	서울특별시

4_선행연구 검토

홍수 위험 평가를 위해 일반적으로 수문학적 모델과 시나리오를 바탕으로 한 시뮬레이션 기법이 활용되고 있다. 하지만, 해당 방법의 적용을 위해서는 고품질의 데이터가 필요하고, 일반적인 컴퓨터로 처리하는 경우 용량의 제한으로 소규모 특정 지역에 대해서만 적용 가능하다는 한계가 있다(Xiao et al., 2017; Chen et al., 2023). 한편, 다기준 의사결정분석(Multi Criteria Decision Analysis, MCDA) 기법을 위험 평가에 이용하는 경우 요구되는 데이터의 수준과 컴퓨터 사양이 상대적으로 낮아 분석이 용이하다는 장점이 있다(Peng et al., 2022). 따라서, 우리 연구에서는 MCDA 기법

을 활용한 선행연구를 참고하여 침수 위험을 평가하였다.

MCDA를 수행하는 여러 방법론 중 Yang et al.(2018)은 TOPSIS와 Shannon Entropy Method를 결합하여 적용했다. 노출 위험(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응 능력(Adaptive capacity)을 대분류로 설정하고 대분류별 세부지표를 마련하여 총 8개의 지표를 기준으로 중국 하이난성의 홍수 취약성을 평가했다. 이선미 외(2020)는 서울시 25개의 자치구별 홍수 취약성을 분석하고자 IPCC에서 정의한 취약성 개념을 활용하여 노출 위험, 민감도, 적응 능력에 대한 총 15개의 세부지표를 마련하고, MCDA의 방법론 중 엔트로피 방법(Entropy Weight, EW)과 유클리드 거리 산정 방법(Euclidean method)을 사용하여 위험을 분석했다. Pathan et al.(2022)은 인도 구자라트 주 나느사리 시를 대상으로 위해성(Hazard)과 취약성(Vulnerability)과 관련한 총 14개의 홍수 지표를 기준으로 계층화 분석(Analytic Hierarchy Process, AHP)과 TOPSIS를 통해 위험을 평가하였다. Mudashiru et al.(2022)은 말레이시아 페낭의 홍수 위험 지역을 식별하고자 AHP와 Fuzzy-AHP 방법을 이용하여 분석하였다. Chen et al.(2023)은 주관적 의견에 기반한 AHP와 객관적 정보에 기반한 EW를 적용하고, Cosine Similarity(COS)를 토대로 두 가지 결과를 결합하는 COS-AHP-EW 기법을 이용하여 중국 우한의 홍수 위험을 평가하였다.

선행연구 결과를 요약하면 위험, 취약성, 적응 능력을 기준으로 세부 지표를 마련하고, 각 세부 지표별 공간정보(Geographic Information System, GIS)를 구축해 분석하였다. 홍수 위험은 지형과 같은 공간 특성의 영향을 받기 때문에 공간 데이터의 시각화 및 분석이 가능한 GIS를 활용하는 것이 효과적이다(Tang et al., 2018; Pathan et al., 2022). 본 연구에서는 서울시 지하 차도의 홍수 위험을 MCDA 기법을 적용하여 분석하되, 객관적인 정보를 바탕으로 지표별 가중치를 부여하는 EW 방법을 적용하고, GIS 프로그램을 활용하여 지하차도 침수 위험을 수치화하고 평가하였다.

[표 2-2] 선행연구 정리

저자명(년도)	연구내용	분석방법
Yang et al. (2018)	통합적 홍수 위험성 평가 방안으로 TOPSIS와 Shannon Entropy Method을 결합한 방식을 제안하였으며, 중국 하이난성을 대상으로 위험을 평가함	TOPSIS, Shannon Entropy Method
이선미 외 (2020)	서울특별시 25개 자치구의 홍수취약성을 분석하기 위해 노출 위험, 민감도, 적응 능력에 대한 15개 세부 지표를 선정한 후 엔트로피 방법과 유클리드 방법을 활용해 지역별 홍수취약도를 산정함	EW, Euclidean method
Mudashiru et al. (2022)	홍수 위험 지역을 식별하는 방법 중 AHP와 Fuzzy-AHP의 적합성을 확인하고자, 말레이시아 페낭을 대상으로 과거 홍수 기록을 분석하여 이를 검증함	AHP, Fuzzy-AHP
Pathan et al. (2022)	인도 구자라트 주 나느사리 시를 대상으로 AHP와 TOPSIS를 이용하여 홍수 위험을 평가함	AHP, TOPSIS
Chen et al. (2023)	홍수 위험을 평가하고 위험 지도를 만들기 위해 AHP와 EW 방법을 기반으로 COS-AHP-EW 평가 방법론을 개발하였으며, 중국 우한에서 홍수 유발 지표를 식별하고 분석하여 이를 검증함	AHP, EW, Cosine Similarity (COS-AHP-EW)

03. 연구 방법

1_연구 대상

이 연구는 2024년 6월 기준으로 차량 통행이 가능한 것으로 파악된 서울시 내 164개의 지하차도를 대상으로 수행하였다. 국토교통부의 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리 지침」을 참고하여 U자형 지하차도가 침수 발생 가능성이 높다는 점을 파악하고, 포털사이트의 지도 및 거리뷰 서비스를 이용해 전체 지하차도 중 U자형 지하차도를 구분하였다. 그 결과 전체의 61.5%인 101개의 지하차도가 U자형인 것으로 파악되었다.

2_연구 데이터

서울시 지하차도 침수 위험도를 산정하기 위해 먼저 침수 유관 지표를 구축하였다. 우선 선행연구(Yang et al., 2018; Peng et al., 2022; Chen et al., 2023)를 바탕으로 위해성(Hazard)과 취약성(Vulnerability)과 관련한 주요 지표를 선정하였다. 위해성은 지형적 특성과 기상 현상으로 인한 물리적 피해 가능성을 의미하고, 취약성의 경우 피해에 대한 반응 정도 혹은 피해 발현의 용이성을 뜻한다.

이 연구에서 위험도 평가를 위해 선정한 위해성 지표는 지형적 특성인 고도(Elevation Standard Deviation, ESD), 경사도(Slope), 곡률(Curvature), 지형습윤지수(Topographic Wetness Index, TWI), 하계망(Drainage Network), 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)와 기상적 요인인 강우강도(Rainfall Intensity)이며, 취약성 지표는 우수관거밀도(Pipe Density)와 인구밀도(Population Density)이다. 공간정보 안심구역 포털(www.datafreezone.or.kr)에서 2023년 기준 수치표

고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 제공받아 이를 ArcGIS로 처리하여 ESD, Slope, Curvature, TWI, Drainage Network 데이터를 구축했고, NDVI는 미국지질조사국(United States Geological Survey, USGS) 포털(USGS.gov)에서 2024년 6월 Landset 8이 촬영한 위성 영상을 가공하여 도출하였다. Rainfall Intensity는 기상청 방재관측시스템에서 측정한 2005년 7월부터 2024년 7월까지 총 20개년의 일 최고 강수량 기준 매년 침수값의 평균을 활용했다. 서울시 구별 Pipe Density는 통계청의 2020년 자료를 이용하였고, Population Density는 통계청과 국토교통부의 2020년 자료를 사용하였다. 끝으로, 공간 데이터를 구축할 때 국토교통부의 2023년 행정동 기준 서울시 지도를 활용했다.

상기와 같은 과정을 거쳐 서울시 164개의 지하 차도의 위치를 파악하고 침수 위험도 평가를 위한 총 10개의 침수 지표를 식별하였다. 평가 지표는 [표 3-1]에 요약 정리하였다.

[표 3-1] 서울시 침수 위험도 평가 지표

No	구분	단위	시점	자료 출처	참고문헌
1	지하차도 위치	-	2024	네이버 및 구글지도	-
2	ESD	m	2023	DEM	Xiao et al.(2017); Chen et al.(2023)
3	Slope	-	2023	DEM	Xiao et al.(2017); 이선미 외(2020); Mudashiru et al.(2022); Pathan et al.(2022); Chen et al.(2023)
4	Curvature	-	2023	DEM	-
5	TWI	-	2023	DEM	Xiao et al.(2017); Mudashiru et al.(2022); Chen et al.(2023)
6	Drainage Network	-	2023	DEM	Mudashiru et al.(2022); Pathan et al.(2022)
7	NDVI	-	2024	USGS 데이터 가공	Chen et al.(2023)
8	Rainfall Intensity	mm/h	2005.07 ~ 2024.07	기상청	이선미 외(2020)
9	Pipe Density	1/km ²	2020	통계청	이선미 외(2020)
10	Population Density	1/km ²	2022	통계청, 국토교통부	이선미 외(2020); Peng et al.(2022); Chen et al.(2023)

3_분석 방법

서울시 지하철도의 위치에 따른 침수 위험을 산정하고자 MCDA 기법을 이용하여 분석하였으며, 이는 평가 지표를 선정하고 지표별 가중치를 부여하여 지하철도별 위험도를 상대적으로 수치화하는 방법이다. 이 연구에서는 MCDA의 여러 방법론 중 엔트로피 가중치(Entropy Weight)를 사용하였다. 이는 Shannon and Weaver(1949)가 제안한 가중치 산정 방법으로 지표별 데이터가 퍼져있는 정도를 기준으로 수학적으로만 가중치를 계산하는 객관적인 방법이다(이선미 외, 2020; 문영식 외, 2021; Pathan et al., 2022). 즉, 지표별 정규화된 지표값의 응집도에 따라 가중치가 변화하는 특징을 가진다. 엔트로피 가중치의 계산 단계는 다음과 같다.

먼저, 서울시 내 지하철도 침수를 유발하는 지표를 선정하고 지표별 데이터를 행렬의 형태로 정렬한다. 이는 [수식 2-1]과 같으며, m 은 평가 대상의 수 n 은 평가지표의 수를 의미하며, 본 연구에서 $m=164$, $n=10$ 이다. ArcGIS를 통해 지표별 layer를 구축하고, 각 지하철도에 대한 지표별 데이터 속성값을 도출하여 행렬로 정리하였다.

$$D = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad \text{[수식 2-1]}$$

다음으로 각 데이터의 단위가 모두 다르기 때문에 이를 통일하기 위한 정규화를 진행한다. 이 연구에서는 홍수 위험도 평가의 선행연구에 따라 MIN-MAX 방법을 적용하였다(이선미 외, 2020). x 값이 클수록 위험도도 함께 증가하는 경우는 positive(+) 지표 [수식 2-2]로 인식하고, x 값이 클수록 반대로 위험도가 낮아지는 경우는 negative(-) 지표 [수식 2-3]으로 인식하였으며, 최종적으로 [수식 2-4]를 통해 정규화를 마쳤다.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, (i = 1 \cdots n), (j = 1 \cdots m) \quad \text{[수식 2-2]}$$

$$y_{ij} = \frac{\max(x) - x_{ij}}{\max(x) - \min(x)}, (i = 1 \cdots n), (j = 1 \cdots m) \quad \text{[수식 2-3]}$$

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum y_{ij}} \quad [\text{수식 2-4}]$$

정규화된 데이터를 기반으로 [수식 2-5]를 적용해 엔트로피 값, 즉 지표별 가중치를 산정한다. 지표별 엔트로피 값은 분산이 클수록 크게 산정된다.

$$E_j = -\ln\left(\frac{1}{m}\right) \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad [\text{수식 2-5}]$$

마지막으로 [수식 2-6]을 통해 지표 속성값의 다양성을 산정한 후 [수식 2-7]과 같이 지표별 가중치를 산정한다.

$$d_i = 1 - E_j \quad [\text{수식 2-6}]$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad [\text{수식 2-7}]$$

04. 분석 결과

1_공간데이터 구축

1) 지하차도 위치 및 형태

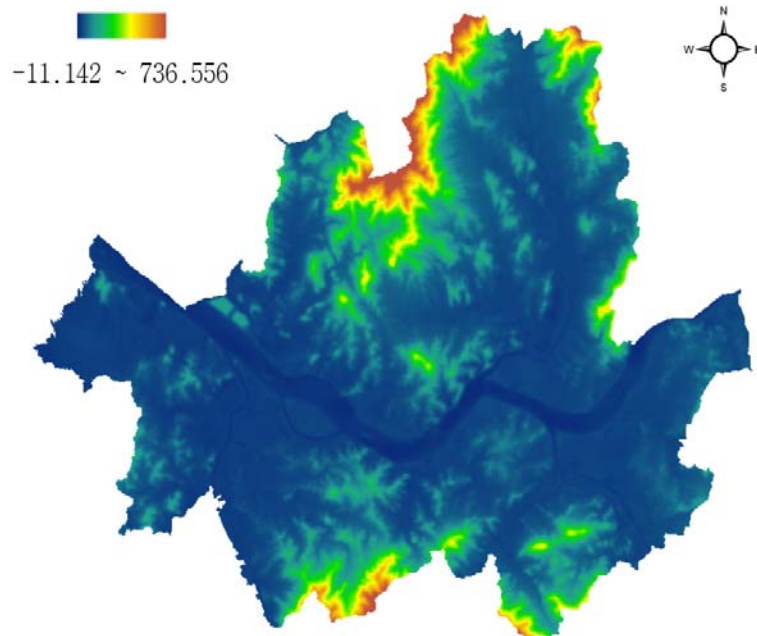
본 연구 대상인 차량 통행이 가능한 서울시 지하차도는 2024년 6월 기준 총 164개소로 파악되었다. 홍수에 취약한 U자형의 경우는 네이버 및 구글 거리뷰를 기준으로 선별하였으며, 서울시 지하차도 164개 중 61.5%인 101개로 집계되었다.



[그림 4-1] GIS Layer: 지하차도 위치 및 형태

2) 고도(Elevation Standard Deviation, ESD)

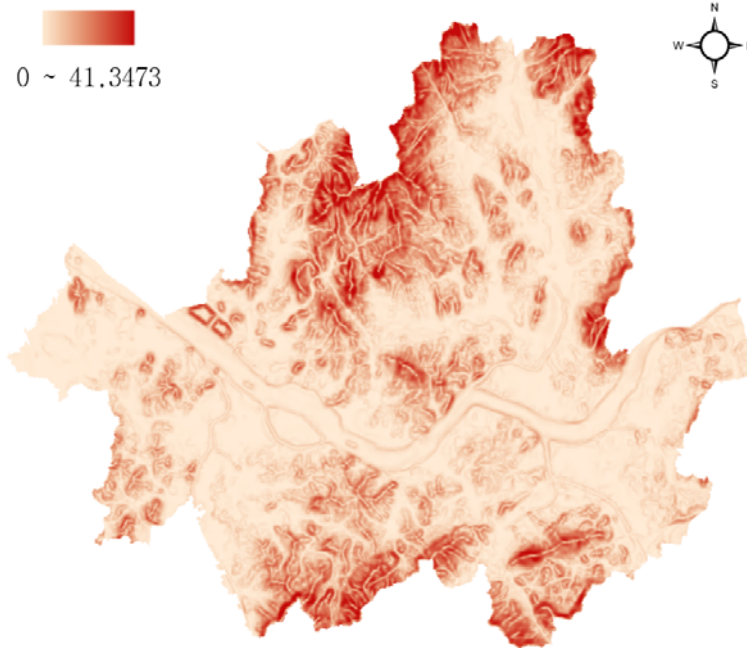
고도(Elevation Standard Deviation, ESD)는 평균 해수면을 기준으로 측정한 높이로, 저지대일수록 집수의 가능성이 높아 위험이 크고, 고지대일수록 집수의 가능성이 작아 위험이 낮다. ESD가 클수록 위험이 작아지므로 (-, Negative) 지표로 분류된다. 이 연구에서 서울시 ESD의 최솟값은 -11.142, 최댓값은 736.556, 평균은 60.297, 표준편차는 83.189로 도출되었다.



[그림 4-2] GIS Layer: Elevation Standard Deviation

3) 경사도(Slope)

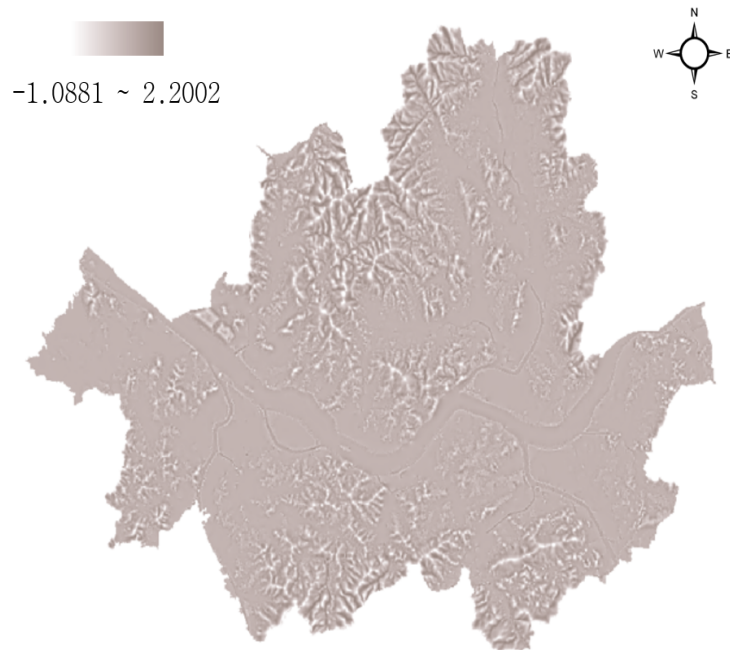
경사도(Slope)는 지표면의 가파른 정도로, 경사가 클수록 물이 빠르게 흐르기 때문에 우수의 침수 가능성이 낮아 침수 위험이 낮아진다(Xiao et al., 2017; Chen et al., 2023). 반면, 경사가 완만할 경우 가파른 경사와 비교했을 때 상대적으로 침수의 위험이 높다. ESD와 마찬가지로 Slope가 클수록 위험이 작아지므로 (-, Negative) 지표로 분류된다. 연구에서 도출한 서울시 Slope 최솟값은 0, 최댓값은 41.3473, 평균은 5.6229, 표준편차는 6.3427이다.



[그림 4-3] GIS Layer: Slope

4) 곡률(Curvature)

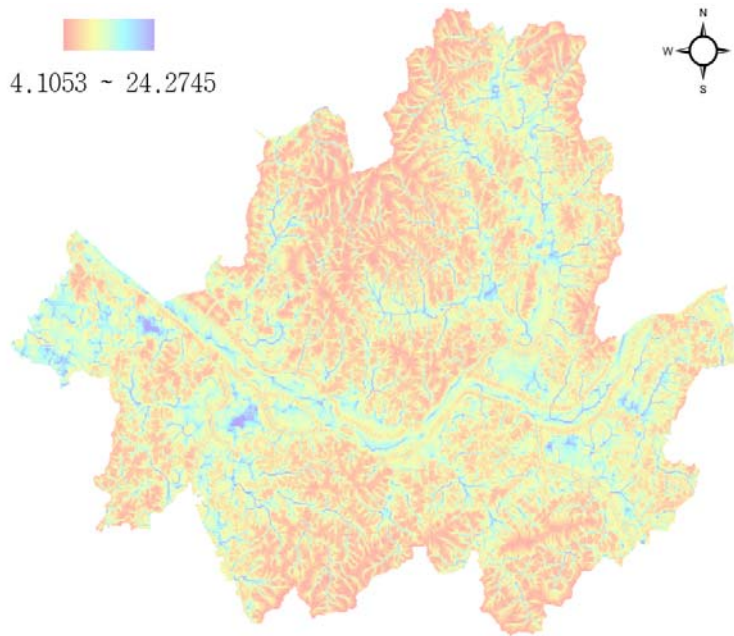
곡률(Curvature)이란 지표면의 오목 및 볼록 정도를 나타낸다. 음수일 때는 오목 사면으로 침수 위험이 커지지만, 양수일 때는 볼록 사면으로 위험이 낮아진다. Curvature가 클수록 위험이 작아지므로 (-, Negative) 지표로 분류된다. 본 연구에서 도출한 서울시 Curvature의 최솟값은 -1.0881, 최댓값은 2.2002, 평균은 -0.0015, 표준편차는 0.1747로 도출되었다.



[그림 4-4] GIS Layer: Curvature

5) 지표습윤지수(Topographic Wetness Index)

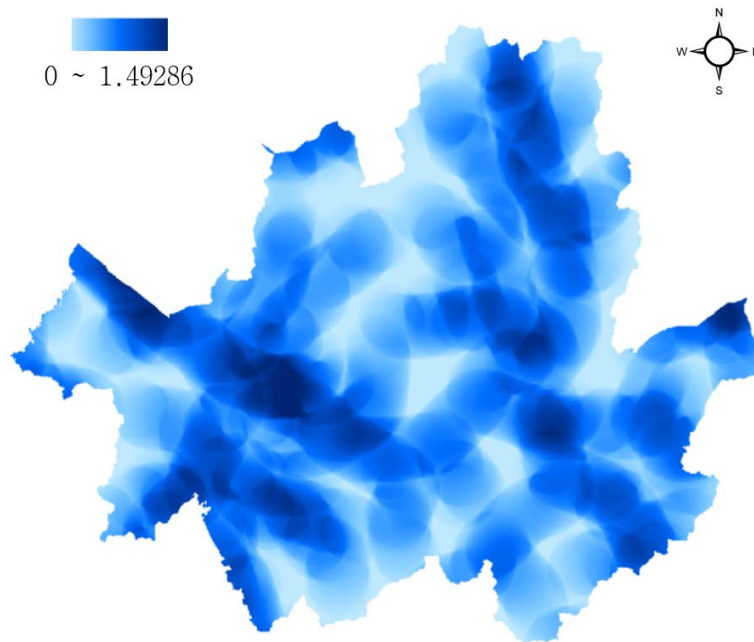
지표습윤지수(Topographic Wetness Index, TWI)는 강우로 빗물이 지표에 떨어졌을 때 사면 경사와 경사 방향을 고려하여 지형이 물을 얼마나 잘 모으고 보유할 수 있는지를 나타내며, 특히 물이 고이기 쉬운 지역을 식별하는 데 유용하다. 주로 토양 수분 상태, 침수 가능성, 식생 분포 등의 연구에 활용되며, 경사가 낮고 배수 면적이 넓은 지역일수록 지형 습윤 지수가 높게 나타난다. 이 지표를 통해 강우의 유출 패턴과 물이 축적되는 지형을 이해할 수 있다(Chen et al., 2023). TWI가 높을수록 홍수의 가능성이 낮아지므로 (-, Negative) 지표로 분류된다. 서울시 TWI의 최솟값은 4.1053, 최댓값은 24.2745, 평균은 8.4036, 표준편차는 2.2458이 도출되었다.



[그림 4-5] GIS Layer: Topographic Wetness Index

6) 하계망(Drainage Network)

하계망(Drainage Network)이란 하천을 포함한 모든 수계의 밀도로, 강우가 왔을 때 우수의 집수 및 범람 가능성에 대해 파악할 수 있는 지표이다. Drainage Network 밀도가 높을수록 침수 위험도가 증가하므로 (+, Positive) 지표이다. 연구에서 도출한 Drainage Network의 최솟값은 0, 최댓값은 1.4929, 평균은 0.4867, 표준편차는 0.3091이다.



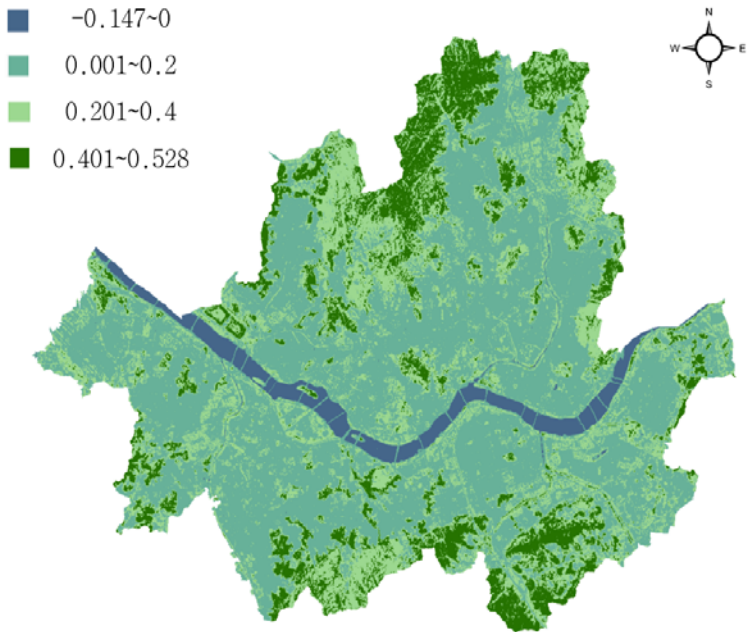
[그림 4-6] GIS Layer: Drainage Network

7) 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index)

정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)는 식생 생장률 및 조성 정도를 평가하는 지표로, NDVI가 높을수록 홍수의 위험도가 감소하므로 (-, Negative) 지표이다. 본 연구에서는 선행연구(Aquino et al., 2018)에서 제시한 NDVI 분류를 적용하였다. 연구를 통해 도출한 서울시 내 식생지수는 Moderate Low 이하로 대부분 지역이 Very Low 분류에 속한다.

[표 4-1] NDVI class interval(Aquino et al., 2018)

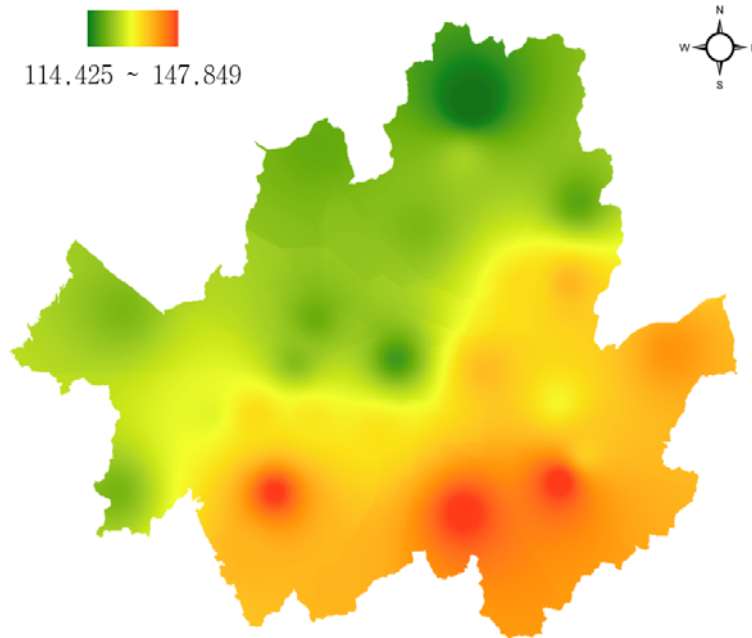
Class	Classification criterion
Bare soil and/or water	$NDVI \leq 0$
Very Low	$0 < NDVI \leq 0.2$
Low	$0.2 < NDVI \leq 0.4$
Moderately Low	$0.4 < NDVI \leq 0.6$
Moderately High	$0.6 < NDVI \leq 0.8$
High	$0.8 < NDVI \leq 1$



[그림 4-7] GIS Layer: Normalized Difference Vegetation Index

8) 강우강도(Rainfall Intensity)

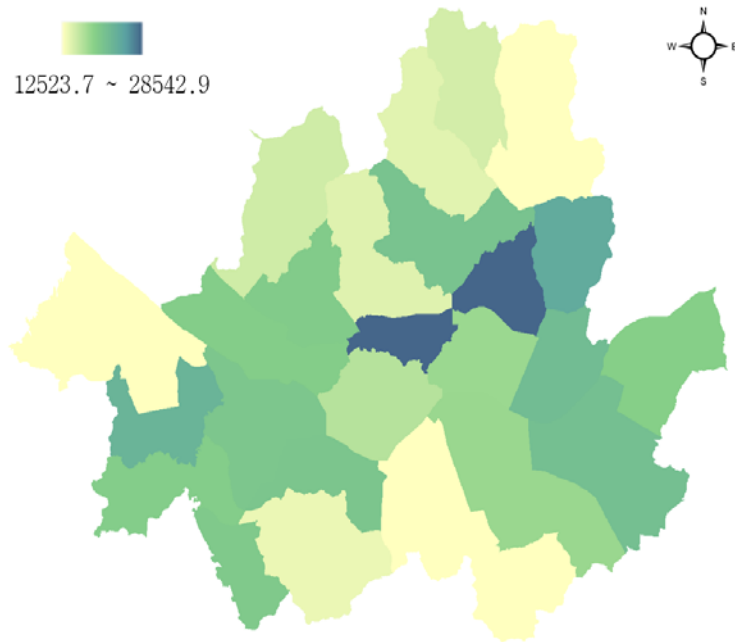
본 연구에서는 강우강도(Rainfall Intensity) 산출을 위해 2005년 7월부터 2024년 7월까지 20개년의 일 최대 강수량 기준 매년 침수값의 평균을 사용하였다. [그림 4-8]을 보면 노란색, 주황색, 붉은색 표기 지역에서 집중 강우가 빈번하게 발생함을 알 수 있다. 강우가 집중될수록 홍수 위험도가 커지므로 (+, Positive) 지표이다. 본 연구에서는 Rainfall Intensity의 최솟값은 114.4253, 최댓값은 147.8495, 평균은 131.8108, 표준편차는 6.9581로 나타났다.



[그림 4-8] GIS Layer: Rainfall Intensity

9) 우수관거밀도(Pipe Intensity)

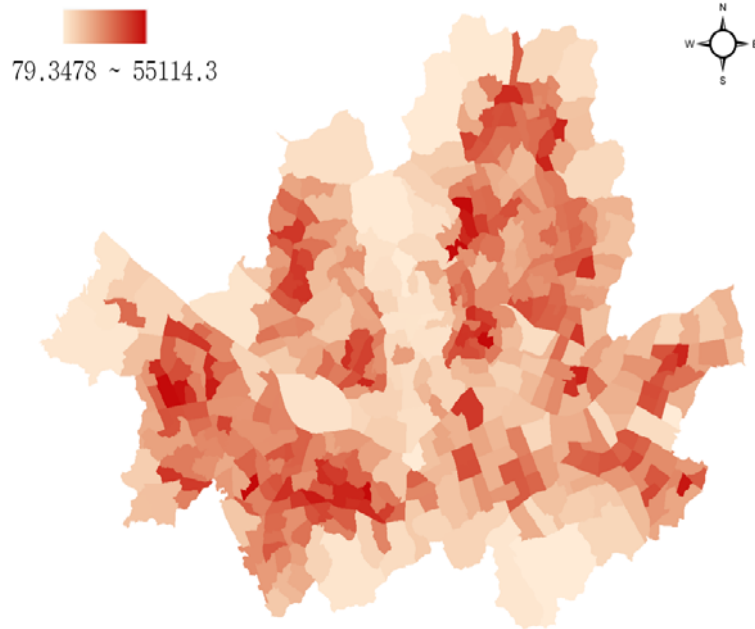
우수관거밀도(Pipe Intensity)는 빗물을 배수하기 위한 시스템으로, 「하수도법」 제2조 제3호에 따른 방재시설이다. 배수관의 밀도가 높을수록 침수 피해 가능성이 낮아지므로 (-, Negative) 지표이다. 연구에서 도출한 Pipe Intensity의 최솟값은 12,523.72, 최댓값 28,542.87, 평균값 17,826.46, 표준편차 3,765.91이다.



[그림 4-9] GIS Layer: Pipe Intensity

10) 인구밀도(Population Density)

인구밀도(Population Density)는 행정동 별 면적 대비 주민등록인구의 비율로 교통량의 대리 지표로 사용하였다. 인구밀도가 높을수록 홍수 위험 노출도가 증가하므로 (+, Positive) 지표이다. Population Density의 최솟값은 79.3478, 최댓값은 55,114.29, 평균은 16,167.89, 표준편차는 11,370.82가 나왔다.

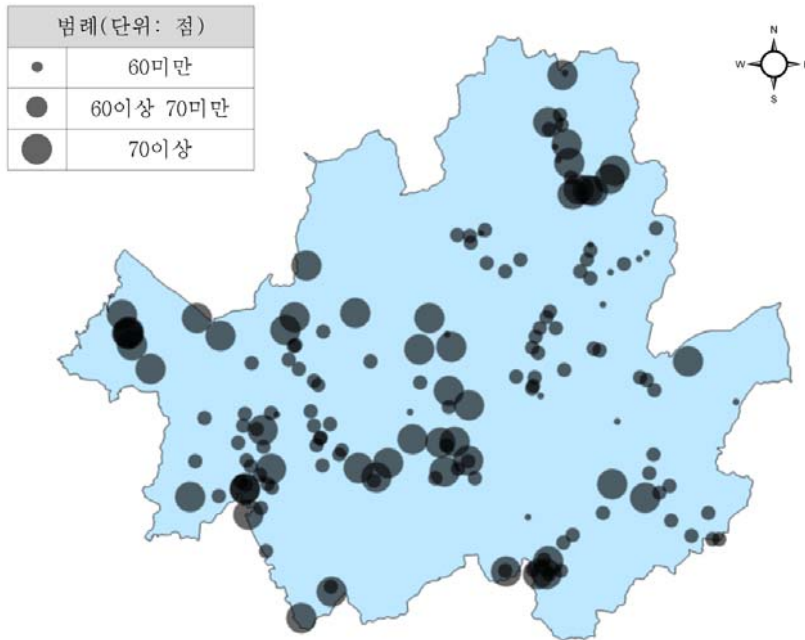


[그림 4-10] GIS Layer: Population Density

2_지하차도 침수 위험 분석

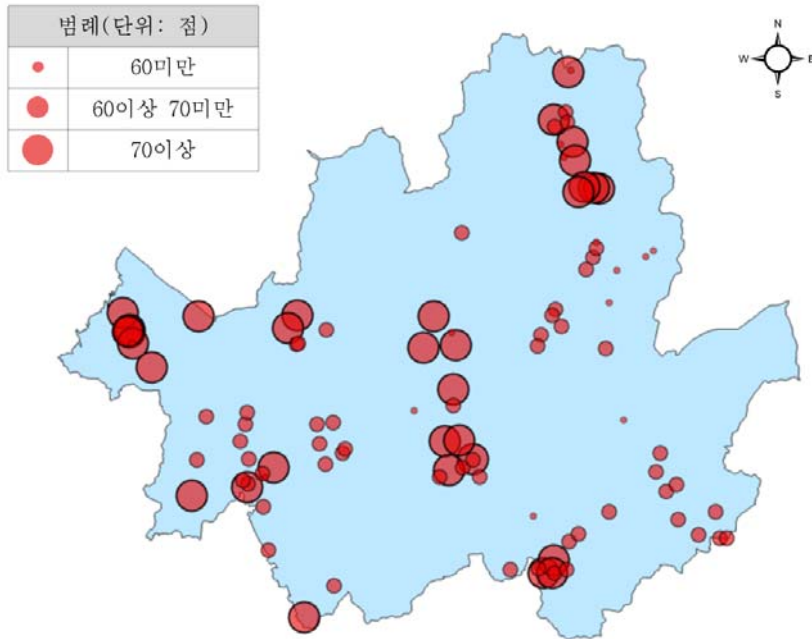
1) 엔트로피 분석 결과

서울시 지하차도 164개의 침수 위험도 평가 결과 70점 이상은 50개, 70점 미만 60점 이하는 96개, 60점 미만은 18개이다. 구체적인 수치는 부록의 [부록표 1] 지하차도 엔트로피 분석 결과에 나와 있다.



[그림 4-11] 전체 지하차도 엔트로피 분석 결과

이중 위험도가 높은 101개의 U자형 지하차도로 한정할 경우 70점 이상 36개, 70점 미만 60점 이하 53개, 60점 미만은 12개로 도출된다.



[그림 4-12] U자형 지하차도 엔트로피 분석 결과

2) 연장 및 생활인구 고려

이 연구에서는 서울시 지하차도의 침수 위험도를 상세히 평가하고자 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침」과 생활인구 데이터를 고려하였다. 먼저, 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침」에서 터널연장 기준을 참조하였다. 터널 연장 등급은 '일반 도로터널 및 소형 자동차도로터널'인 경우와 '방음터널'인 경우로 나뉜다. 방음터널은 방음재를 터널 내부에 부착하여 소음을 줄이는 구조를 가지고 있으며, 이러한 방음재는 소음의 반사를 막고 흡수하는 기능을 하여 화재 진화나 인명 구조가 상대적으로 어렵기 때문에, 재난 발생 시 대응에 취약할 수밖에 없다. 따라서, 일반터널에 적용되는 연장 기준이 아닌 방음터널의 연장 기준을 참고하여, 연장 길이 250m 이상의 지하차도를 위험이 높은 지하차도로 정의하였다. 이는 정부에서 지하차도 등급과 상관없이 250m 이상의 터널에는 무정전 설비의 설치를 의무화한 배경과도 맞닿아 있다. 해당 지침을 토대로 서울시 지하차도를 구분하면, 3km 이상은 0개, 1km 이상 3km 미

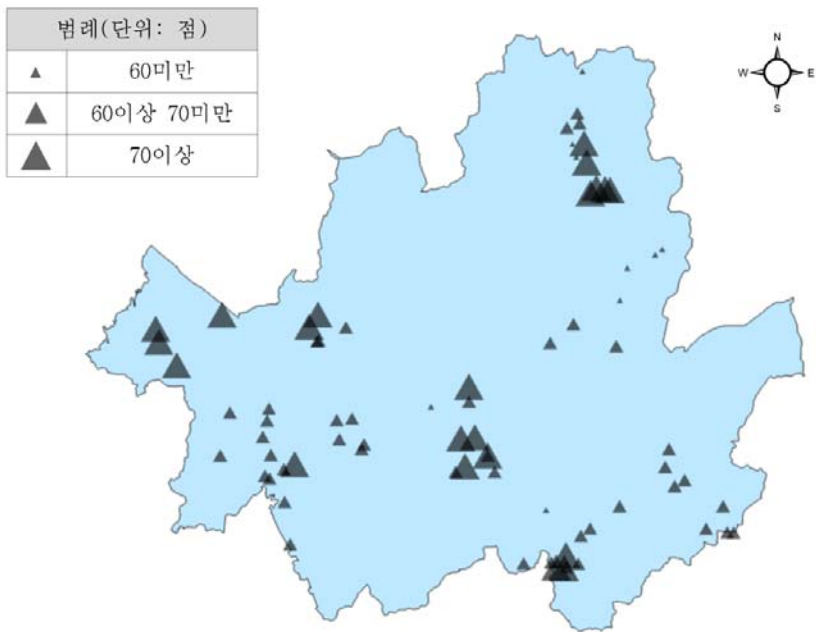
만은 5개, 250m 이상 1km 미만은 87개, 250m 미만은 72개이다. 본 연구에서는 이 중 U자형이면서 지하차도 연장 250m 이상인 76개의 지하차도를 추가로 분석하였다.

[표 4-2] 서울시 지하차도 연장 현황

(단위: 개)

구분	3km 이상	1km 이상 3km 미만	250m 이상 1km 미만	250m 미만	합계
서울시 지하차도	0	5	87	72	164
U자형 지하차도	0	5	71	25	101

U자형 지하차도이면서 지하차도 연장 250m 이상으로 한정할 경우 침수 위험도 평가 점수가 70점 이상은 27개, 70점 미만 60점 이하는 43개, 60점 미만은 6개가 도출되었다.



[그림 4-13] 지하차도 연장 250m 이상의 U자형 지하차도 엔트로피 분석 결과

또한, 침수 위험도 지표 중 교통량의 대리 지표로 행정구역별 주민등록인구를 사용하였으나, 결과 분석을 위해서 생활인구 데이터도 활용하여 보았다. 생활인구 데이터란 교통통신의 발달로 이동성과 활동성이 증가하는 상황을 반영하고자 행정안전부에서

2023년에 도입한 정책적 개념이다(행정안전부, 2024c). 「생활인구의 세부요건 등에 관한 규정」에 의거하면 생활인구는 「주민등록법」에 따라 주민으로 등록한 사람, 「출입국관리법」에 따라 외국인등록을 한 사람, 「재외동포의 출입국과 법적 지위에 관한 법률」에 따라 국내거소신고를 한 사람과 월 1회 이상 하루 3시간 이상 체류하는 사람을 합산해 계산한다.

본 연구에서는 서울 열린데이터 광장(data.seoul.go.kr)에서 공개한 행정동 단위의 2024년 7월 생활인구 데이터를 기반으로 생활인구 50만/일 조건에 해당하는 지역에 위치하는 지하철도를 판별하였다. U자 형태이면서 지하철도 연장 250m 이상에 생활인구 50만/일 조건을 부여하면, 70점 이상은 18개, 70점 미만 60점 이하는 32개, 60점 미만은 6개로 도출된다.



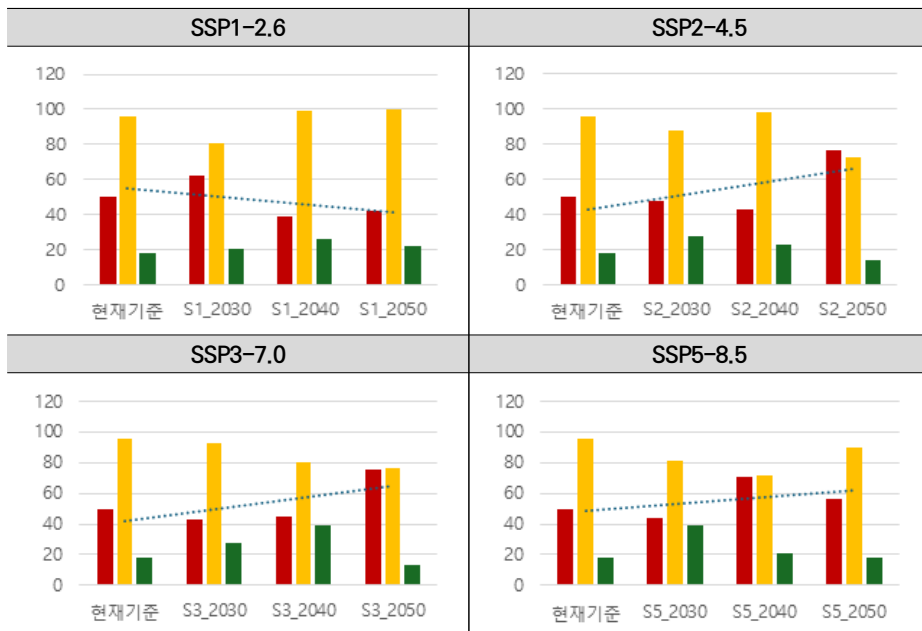
[그림 4-14] 생활인구 50만/일 대상, 지하철도 연장 250m 이상의 U자형 지하철도 엔트로피 분석 결과

3) 기후변화 시나리오 기반 강수예측 데이터 고려

기후변화에 따라 강수량이 증가한다는 점을 고려하여 IPCC AR6의 기후변화 시나리오인 공동사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 기반 미래강수 데이

터를 활용하여 지하차도의 위험도가 어떻게 변화하는지 분석하여 보았다. IPCC AR6에서는 온실가스 저감(mitigation) 활동과 적응(adaptation) 활동의 정도에 기반해 5가지 가정을 세웠지만, 기상청에서는 4가지 가정만을 토대로 강수예측 데이터를 구축했기에 본 연구에서도 4가지 가정(SSP1, SSP2, SSP3, SSP5)만을 고려했다. 시나리오 가정을 좀 더 정확하게 표기하면 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5이며, 첫 번째 숫자는 기후변화 적응 및 완화를 위한 사회경제적 노력을, 두 번째 숫자는 2100년 기준의 복사 강제력을 의미하고(기상청, 2023), 각 가정의 자세한 의미는 다음과 같다. SSP1-2.6은 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용 최소화 및 친환경 성장을 가정하며, SSP2-4.5는 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도를 중간단계로 가정하고, SSP3-7.0은 기후변화 완화 정책에 소극적이고 관련 기술 개발이 지연되는 상황을 가정하며, SSP5-8.5는 높은 화석연료 사용과 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정한다. 이 연구에서는 상기 4가지 SSP 시나리오에 기반하여 기상청에서 예측한 2030년대, 2040년대, 2050년대 평균 강수 데이터를 이용해 엔트로피 분석을 진행하였다. [표 4-3]을 보면 친환경 성장에 기반한 SSP1-2.6을 제외한 다른 시나리오의 경우 위험도 70점 이상의 지하차도가 증가하는 추세를 보인다.

[표 4-3] 기후변화 시나리오를 고려한 강수예측 데이터 분석



05. 결론

1_정책적 제언

본 연구에서는 서울시 지하차도를 대상으로 엔트로피 가중치 방법과 ArcGIS를 활용하여 침수 위험도를 평가하였다. 선행연구를 바탕으로 침수에 영향을 주는 10개의 주요 지표를 도출하였고, 엔트로피 분석법을 이용하여 지하차도의 상대적인 위험도를 지수화하였다. 또한, 현실적인 침수 가능성을 파악하고자 지하차도 형태, 연장, 지역별 생활인구를 고려하여 추가 분석하였다. 마지막으로 기후변화 상황을 고려한 미래 강수 예측 데이터를 활용해 위험 변화를 추정해 보았다.

그 결과 도출한 상대적으로 침수 위험이 높은 지하차도 분포 지역과 2022년 8월 서울 집중호우 시 침수가 발생한 지하차도들의 분포 지역이 유사하였다. 이는 서울시 지하차도 침수 위험도 평가 연구의 유효성과 신뢰성을 방증하여 준다고 할 수 있다. 나아가 본 연구에서 위험도가 높게 분석된 지하차도들을 선제적으로 관리할 필요성이 있음을 시사한다.

특히 U자형·연장 250m 이상·생활인구 50만/일의 조건을 고려하더라도 과거 침수 피해가 발생한 지역에 위치한 지하차도들이 여전히 높은 위험을 보이는 것으로 나타났다. IPCC AR6의 기후변화 시나리오를 가정하여 미래 위험을 분석한 결과 향후 기후변화로 인하여 지하차도의 침수 빈도 및 강도가 증가할 수 있는 환경이 조성되고 있으며, 지하차도의 경우 재산상의 손실뿐만 아니라 인명피해의 가능성이 있어 위험도에 따른 피해 예방 대책의 마련과 관련한 지속적인 관심이 필요하다.

지하차도 안전대책은 위험도 평가에 기반하여 단기 및 중장기로 구분해 시행할 필요가 있다. 근본적인 침수 위험 저감은 대규모의 토목공사와 예산 집행을 동반하므로 서울시 각 자치구 재정자립도를 감안하고, 배수용량 증진을 위한 투수성 포장 확대 대책, 대심도 빗물터널 6개소 설치 계획 등과 연동하여 중장기적으로 추진할 필요가

있다. 다만, 이들은 대규모의 예산을 필요로 하는 사업으로 단기간 내 시행이 어렵고, 시행이 완료되어 인프라가 잘 구축된다 하더라도 기후변화로 인한 재난의 위험은 상존함을 감안할 때, 침수 시 시민의 안전 확보를 위한 관리 방안은 여전히 필요하다. 따라서, 침수 시 위험 경감과 피해 예방을 위해 위험도가 높은 지하철도부터 내비게이션 시스템과 연동한 사전 고지 시행, 침수 감지 및 차단 설비 설치를 신속하게 추진해야 한다.

교통 시스템의 물리적 피해와 이로 인한 통행 제한은 재난 이후의 회복에도 부정적인 영향을 미친다. 교통망의 마비는 지역 사회의 기본 필요 충족 및 생계 활동을 제한하며, 공급망을 단절시켜 재난 피해를 가중한다. 즉, 지하철도 재난 시 신속한 대응은 단기적으로 직접적인 피해를 줄이고 장기적으로는 지속 가능하고 포괄적인 사회경제적 발전을 도모한다. 따라서, 재난 상황이 발생할 경우 피해를 최소화하기 위한 시스템을 갖추는 것이 매우 중요하다 할 수 있다. 기후 재난이 복합적으로 발생하고, 향후 피해 규모가 보다 증가할 것으로 예상되는 상황에서 지역 사회와 대응 시스템이 관련한 충격에 대처하고 회복할 수 있는 능력을 갖추 수 있도록 보다 노력을 기울여야 한다.

2_연구의 의의 및 한계

본 연구는 기존 서울시의 안전 정책 연구와는 다르게 시민이 공모에 참여하여 선정된 주제를 가지고 기존 연구자와의 원활한 협력을 통해 자율적으로 연구 성과를 도출했다는 데 의의가 있다. 하지만, 지하철도에 대한 정확한 정보(위치, 연장 등)가 공개되지 않고 접근이 제한되어 공개된 플랫폼(네이버, 구글)에서 자료를 수집하였는바 수집한 데이터와 서울시 보유 자료 간 차이가 있을 수 있고 그 정확성을 보장할 수 없다는 점이 본 연구의 한계라 할 수 있다. 향후 기후변화로 인하여 지하철도를 위시한 침수 위험도 평가 연구가 더 중요해질 것이므로 분석 방법이나 자료 공개의 측면에서 개선이 필요하다고 할 수 있다. 만약, 자료 접근성과 분석 편의성이 향상된다면 시민 연구자의 안전 정책 분야 참여가 더욱 활성화될 것으로 기대해 본다.

또한, 엔트로피 분석법은 평가 대상의 상대적인 위험도만을 도출하므로 본 연구에서 부여한 점수가 절대적인 위험을 나타낸다고 할 수 없다. 엔트로피 가중치 방법이 객관적이기는 하나, 전문가의 의견을 반영하지 못하는 한계가 있으므로, 전문가 인터뷰를 통한 가중치 부여법인 AHP 등을 결합하여 통합적인 평가를 시행해 볼 필요가 있다.

끝으로, 본 연구는 단기적으로 시행할 수 있는 재난 발생 시 피해 경감 방안에 초점을 두고 저감 방안을 고찰해 보았지만, 근본적으로 재해 영향을 최소화하고 사후 복구를 효과적으로 하기 위해서는 도시 인프라의 취약성 경감과 회복력 확보가 필수적이다. 기후변화로 인한 극한 기상현상과 이로 인한 위험에 대한 이해를 높이고, 취약성 경감 및 회복력 증진을 위한 장기적인 계획 수립과 실천이 매우 중요하다는 것이다. 따라서, 중장기적으로 기후변화 시나리오, 식별된 위험에 대한 취약성, 운영 성능, 사용 연한 동안 예상되는 영향을 바탕으로 교통 인프라의 회복력을 높이기 위한 구조적 조치를 취해야 한다. 종합적인 기후 및 재난 위험 평가를 바탕으로 지하철도를 비롯한 교통 시스템을 계획하고 정비해야 한다.

참고문헌

- 문영식, 남원호, 양미혜, 신지현, 전민기, 김태곤, 이승용, & 이광야, 2021, “계층화분석 및 엔트로피 가중치 산정 방법에 따른 농업가뭄재해 취약성 평가”, 「한국농공학회논문집」, 63(3), 13-26.
- 이선미, 최영제, & 이재응, 2020, “엔트로피 가중치 산정방법을 활용한 도시지역 홍수취약성 평가”, 「한국방재학회 논문집」, 20(6), 389-397.
- 이하늘, 김동현, 백선욱, 이준학, & 김수전, 2023, “도시하천유역의 홍수위험순위 결정을 위한 격자단 위 홍수위험도 평가”, 「Journal of Digital Contents Society」, 24(11), 2919-2927.
- Abdulrazzak, M., Elfeki, A., Kamis, A. S., Kassab, M., Alamri, N., Noor, K., & Chaabani, A., 2018, “The impact of rainfall distribution patterns on hydrological and hydraulic response in arid regions: case study Medina, Saudi Arabia”, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-18.
- Aquino, D. D. N., Rocha, O. C. D., Moreira, M. A., Teixeira, A. D. S., & Andrade, E. M. D., 2018, Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region, *Revista Ciencia Agronomica*, 49(3), 420-429.
- Chen, Y., Wang, D., Zhang, L., Guo, H., Ma, J., & Gao, W., 2023, Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 96001-96018.
- Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abdullah, R., Saleh, A., & Abustan, I., 2022, Optimality of flood influencing factors for flood hazard mapping: An evaluation of two multi-criteria decision-making methods, *Journal of Hydrology*, 612, 128055.
- Pathan, A. I., Girish Agnihotri, P., Said, S., & Patel, D., 2022, AHP and TOPSIS based flood risk assessment—a case study of the Navsari City, Gujarat, India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(7), 509.
- Peng, J., & Zhang, J., 2022, Urban flooding risk assessment based on GIS-game theory combination weight: A case study of Zhengzhou City, *International journal of disaster risk reduction*, 77, 103080.

Tang, Z., Zhang, H., Yi, S., & Xiao, Y., 2018, Assessment of flood susceptible areas using spatially explicit, probabilistic multi-criteria decision analysis, *Journal of Hydrology*, 558, 144–158.

Xiao, Y., Yi, S., & Tang, Z., 2017, Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference, *Science of the Total Environment*, 599, 1034–1046.

Yang, W., Xu, K., Lian, J., Ma, C., & Bin, L., 2018, Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods. *Ecological Indicators*, 89, 269–280.

감사원, 2019, 「감사 보고서 -대도시권 지하차도 안전관리 실태 점검-」.

국립기상과학원, 2020, 「한반도 기후변화 전망보고서 2020」.

국립기상과학원, 2024, 「우리나라 온난화 수준별 기후변화 영향 정보 전망보고서」.

기상청, 2023, 「서울특별시 기후변화 전망보고서 2023」.

기상청, 2024, 「2023년 이상기후 보고서」.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.

이준, 2023, 「지하차도 침수관리를 위한 제도개선방안 -청주시 오송역 사례를 중심으로-」, 한국교통연구원.

과학기술정보통신부·환경부, 2024년 7월 2일, “홍수 경보 지역 지날 때 차량 내비·지도앱이 위험 알려준다”, 대한민국 정책브리핑, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148930986>

곽진석, 2024년 7월 18일, “초량 참사 4년 지났는데...부산 지하차도 41곳 침수 사각지대”, 부산일보, <https://mobile.busan.com/view/busan/view.php?code=2024071810045717368>

김민범, 2024년 7월 10일, “현대차·기아 “내비게이션 고도화로 도로침수 참사 예방한다”... 민·관 업무협약 체결”, 동아일보, <https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20240710/125869527/1>

김호경 외, 2023년 7월 19일, “침수경보에도 통제안한 오송 지하차도, 13명 참변”, 동아일보, <https://www.donga.com/news/Society/article/all/20230717/120266676/1>

내 손안에 서울, 2023년 6월 26일, “전국 최초 '침수 예·경보제' 도입...서울시 풍수해 안전대책”, 서울특별시, <https://mediahub.seoul.go.kr/archives/2008333>

내 손안에 서울, 2024년 7월 17일, “위험시 진입 차단! 지하차도 98곳에 침수감지장치 설치”, 서울특별시, <https://mediahub.seoul.go.kr/archives/2011738>

문희철, 2022년 8월 11일, “서울 6곳에 빗물터널…처리용량 시간당 100mm로 높인다”, 중앙일보, <https://www.joongang.co.kr/article/25093510>

물순환안전국, 2024년 10월 10일, “기후재난 일상화…서울시, 사계절 상시 위기 대응으로 시민안전 지킨다”, 서울특별시, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/559911>

박다해, 2023년 10월 17일, “[단독] 서울 지하철도 48.5% 침수 대비 자동차단시설 없다”, 한겨레, <https://www.hani.co.kr/arti/area/capital/1112219.html>

서울인포그래픽, 2022년 8월 29일, “2022년 8월 집중호우, 서울시의 강우량과 피해특성은?”, 서울연구원, <https://www.si.re.kr/node/66289>

이규연, 2023년 7월 17일, “침수 취약 지하철도 13곳 여전히 자동차단시설 없다”, MBN 뉴스, <https://m.mbn.co.kr/tv/552/2636/1333346>

이선욱, 2024년 7월 20일, “시간당 100mm 극한 호우, 이제 일상이 되나”, BBC 코리아, <https://www.bbc.com/korean/articles/cl4yml4l6j1o>

이슬기, 2023년 7월 17일, “전국 지하철도 925개…50년 이상 호우 대비는 단 6곳”, KBS뉴스, <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=7725768>

이재영, 2024년 5월 12일, “서울 3개 대심도 빗물터널 공사업체 겨우 구해…연내 착공”. 연합뉴스, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20240511031200530>

조민수, 2021년 7월, “기후변화(Climate Change)에 따른 물순환(Water Cycle)의 변화 대응”, 물관리위원회, <https://www.water.go.kr/letter/12/sub2.html#focus1>

행정안전부, 2024a년 1월 1일, “생활인구 산정 최초 발표, 인구감소지역 맞춤형 정책 추진에 활용”, 행정안전부, https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type010/commonSelectBoardArticle.do;jsessionid=oKT5jwmeB1tftW-On0VBbt2o.node20?bbsId=BBSMSTR_000000000008&nttlId=106167

행정안전부, 2024b년 4월 24일, “지하차도 침수 및 도시침수 피해 방지 안전관리 대책 본격 추진”, 대한민국 정책브리핑, <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156626758#pressRelease>

행정안전부, 2024c년 6월 18일, “행정안전부는 지하철도 침수방지를 위해 지속적으로 노력하고 있습니다.”, 대한민국 정책브리핑, <https://www.korea.kr/news/estNewsView.do?newsId=156636447&catId=PRESS§Id=PRESS&tblKey=GMN#top50>

부록

[부록표 1] 지하철도 엔트로피 분석 결과

No	Name	Entropy Score	U-Shape	연장 250m 이상	생활인구 50만/일 이상
1	지하차도1	84.59	1	1	1
2	지하차도2	81.46	1	1	0
3	지하차도3	81.38	1	1	0
4	지하차도4	79.58	1	1	0
5	지하차도5	79.24	1	0	0
6	지하차도6	78.14	0	0	0
7	지하차도7	77.86	1	1	1
8	지하차도8	77.79	1	1	1
9	지하차도9	77.56	0	0	1
10	지하차도10	77.29	1	1	1
11	지하차도11	77.22	1	1	1
12	지하차도12	77.21	1	0	1
13	지하차도13	75.94	1	0	1
14	지하차도14	75.05	1	0	1
15	지하차도15	74.97	0	0	1
16	지하차도16	74.65	1	1	1
17	지하차도17	74.54	1	0	1
18	지하차도18	74.43	1	0	0
19	지하차도19	74.32	1	1	1
20	지하차도20	74.31	1	0	0
21	지하차도21	74.04	1	1	1
22	지하차도22	73.87	1	1	1
23	지하차도23	73.85	1	1	1
24	지하차도24	73.68	1	1	1
25	지하차도25	73.06	0	1	1
26	지하차도26	72.90	1	0	1
27	지하차도27	72.80	1	0	1

No	Name	Entropy Score	U-Shape	연장 250m 이상	생활인구 50만/일 이상
28	지하차도28	72.12	1	0	1
29	지하차도29	72.02	1	1	1
30	지하차도30	71.74	1	1	1
31	지하차도31	71.65	1	1	1
32	지하차도32	71.61	1	0	1
33	지하차도33	71.61	0	1	0
34	지하차도34	71.51	1	0	1
35	지하차도35	71.42	0	1	0
36	지하차도36	71.39	1	0	0
37	지하차도37	71.30	0	0	0
38	지하차도38	71.28	0	0	0
39	지하차도39	71.06	1	1	0
40	지하차도40	71.06	1	1	1
41	지하차도41	70.98	0	1	1
42	지하차도42	70.88	0	1	1
43	지하차도43	70.84	1	0	0
44	지하차도44	70.64	1	1	0
45	지하차도45	70.40	0	1	1
46	지하차도46	70.40	0	1	0
47	지하차도47	70.34	1	1	0
48	지하차도48	70.18	1	1	1
49	지하차도49	70.08	0	1	1
50	지하차도50	70.05	0	0	1
51	지하차도51	69.98	1	0	1
52	지하차도52	69.75	1	0	0
53	지하차도53	69.66	1	1	1
54	지하차도54	69.47	1	1	1
55	지하차도55	69.17	1	1	0
56	지하차도56	69.17	1	0	0
57	지하차도57	69.02	1	0	1
58	지하차도58	68.89	1	0	1
59	지하차도59	68.76	1	0	0
60	지하차도60	68.75	1	0	0
61	지하차도61	68.57	0	0	1
62	지하차도62	68.51	1	1	1
63	지하차도63	68.48	1	1	0
64	지하차도64	68.32	0	0	0
65	지하차도65	68.32	1	0	0

No	Name	Entropy Score	U-Shape	연장 250m 이상	생활인구 50만/일 이상
66	지하차도66	68.29	0	0	1
67	지하차도67	68.23	0	0	0
68	지하차도68	68.10	1	0	0
69	지하차도69	67.93	0	0	0
70	지하차도70	67.89	1	0	1
71	지하차도71	67.85	0	1	0
72	지하차도72	67.80	0	1	0
73	지하차도73	67.79	1	0	0
74	지하차도74	67.70	1	1	1
75	지하차도75	67.58	1	1	1
76	지하차도76	66.95	1	1	0
77	지하차도77	66.82	1	0	1
78	지하차도78	66.78	0	1	1
79	지하차도79	66.67	0	1	1
80	지하차도80	66.42	1	1	1
81	지하차도81	66.41	1	0	1
82	지하차도82	66.32	1	1	1
83	지하차도83	66.27	1	1	1
84	지하차도84	66.26	0	1	1
85	지하차도85	66.19	0	1	0
86	지하차도86	66.18	0	1	1
87	지하차도87	66.18	0	1	1
88	지하차도88	66.12	0	1	1
89	지하차도89	66.05	1	1	1
90	지하차도90	65.85	1	1	1
91	지하차도91	65.79	0	0	1
92	지하차도92	65.79	0	1	0
93	지하차도93	65.74	0	1	0
94	지하차도94	65.44	1	0	0
95	지하차도95	65.24	0	0	0
96	지하차도96	65.23	0	0	0
97	지하차도97	65.14	1	1	0
98	지하차도98	64.96	1	1	0
99	지하차도99	64.96	0	0	0
100	지하차도100	64.96	0	0	0
101	지하차도101	64.90	1	0	0
102	지하차도102	64.90	1	1	1
103	지하차도103	64.85	0	0	1

No	Name	Entropy Score	U-Shape	연장 250m 이상	생활인구 50만/일 이상
104	지하차도104	64.80	1	1	1
105	지하차도105	64.66	1	0	0
106	지하차도106	64.62	1	0	0
107	지하차도107	64.50	0	0	0
108	지하차도108	64.39	0	0	0
109	지하차도109	64.33	1	0	0
110	지하차도110	64.22	0	0	0
111	지하차도111	64.12	0	0	0
112	지하차도112	63.95	1	0	1
113	지하차도113	63.92	0	0	1
114	지하차도114	63.90	0	0	1
115	지하차도115	63.78	1	1	1
116	지하차도116	63.76	1	1	1
117	지하차도117	63.57	0	1	1
118	지하차도118	63.52	0	0	1
119	지하차도119	63.49	1	1	1
120	지하차도120	63.28	0	1	1
121	지하차도121	63.27	1	1	1
122	지하차도122	63.22	0	1	1
123	지하차도123	63.04	0	1	1
124	지하차도124	63.00	0	1	1
125	지하차도125	62.82	1	0	1
126	지하차도126	62.70	0	1	1
127	지하차도127	62.14	1	0	1
128	지하차도128	62.13	1	1	0
129	지하차도129	62.12	0	1	1
130	지하차도130	62.09	0	1	1
131	지하차도131	62.06	0	1	0
132	지하차도132	62.02	1	0	0
133	지하차도133	61.98	1	0	0
134	지하차도134	61.84	0	1	1
135	지하차도135	61.03	1	1	0
136	지하차도136	60.98	0	1	0
137	지하차도137	60.96	1	0	1
138	지하차도138	60.91	1	1	1
139	지하차도139	60.90	0	1	0
140	지하차도140	60.83	1	0	1
141	지하차도141	60.56	1	1	1

No	Name	Entropy Score	U-Shape	연장 250m 이상	생활인구 50만/일 이상
142	지하차도142	60.54	1	0	1
143	지하차도143	60.53	1	1	0
144	지하차도144	60.49	1	1	0
145	지하차도145	60.34	0	0	0
146	지하차도146	60.13	0	1	0
147	지하차도147	59.92	1	0	0
148	지하차도148	59.89	1	1	1
149	지하차도149	59.42	1	1	0
150	지하차도150	59.39	0	0	1
151	지하차도151	59.18	1	1	1
152	지하차도152	59.10	1	1	1
153	지하차도153	58.23	1	0	1
154	지하차도154	57.93	1	1	1
155	지하차도155	57.54	0	0	1
156	지하차도156	57.15	1	1	1
157	지하차도157	56.92	1	0	1
158	지하차도158	56.92	1	0	0
159	지하차도159	56.35	0	1	1
160	지하차도160	55.09	1	1	1
161	지하차도161	49.09	0	1	1
162	지하차도162	48.55	0	0	1
163	지하차도163	47.48	1	1	1
164	지하차도164	44.25	0	1	1

작은연구 좋은서울 2024-03

서울시 지하철도의 침수 위험도 평가

발행인 오 균

발행일 2024년 12월 20일

발행처 서울연구원

비매품

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

이 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.

비매품