



GIS를 활용한 잠재적 포트홀 발생 취약도로 분석 - 강남구를 중심으로 -

Analysis of Potential Pothole Vulnerable Roads Using GIS - Focused on Gangnam-gu -

박초롱* · 최규진** · 김소영*** · 이동현**** · 이종호***** · 손동욱*****

Chorong Park* · Kyujin Choi** · Soyeong Kim*** · Donghyeon Lee**** · Jongho Lee***** · Dongwook Sohn*****

* Main author, Ph.D. course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (parkchorong@yonsei.ac.kr)

** Coauthor, Master's course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (choikj331@yonsei.ac.kr)

*** Coauthor, Master's course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (soyeong0220@yonsei.ac.kr)

**** Coauthor, Master's course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (dhlee0919@yonsei.ac.kr)

***** Coauthor, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, South Korea (leejongho@kict.re.kr)

***** Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (sohndw@yonsei.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study evaluates pothole vulnerability, a growing issue driven by climate change and urban factors, with a focus on Gangnam District. The aim is to develop a GIS-based methodology to predict roads at high risk of potholes and create a vulnerability map. **Method:** The study integrates various factors, including climate and topographic factors (precipitation, DEM), environmental factors (Flood Prediction Map, flood trace map, deicing box), and physical road attributes (traffic lights, bus stops, traffic volume, construction sites). Public datasets are used to create a quantitative vulnerability map, identifying roads with high pothole risk. **Result:** The results visualize high-risk roads in Gangnam District across five levels, proposing a shift from reactive to preventive road management. This proactive approach can help reduce repair costs and improve road safety. Future research could include additional internal road factors, such as construction year and material quality, to refine the model's accuracy and applicability, enhancing its use in other urban areas facing similar challenges.

KEYWORD

포트홀
취약성 평가
지리정보시스템
지도화

Pothole
Vulnerability Assessment
GIS
Mapping

ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 21, 2025

Final revision received Mar. 18, 2025

Accepted Mar. 24, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

포트홀(Pothole)은 도로 표면이 움푹 파이는 현상으로 주로 빗물이나 눈이 아스팔트에 스며든 후 압력이나 온도 변화에 의해 발생한다. 이는 겨울철 동결과 융해의 반복, 여름철 집중호우 등 기후적 요인뿐만 아니라 염화칼슘 사용, 도로 시공 품질 저하, 배수 구조 불량 등 복합적 요인에 의해 형성된다. 최근 기후변화로 인한 이상기후 현상 등으로 인해 포트홀 발생이 더욱 증가하고 있으며 시민들의 안전과 도로 유지 비용 부담이 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다.

2020년부터 2023년 8월까지 전국적으로 보고된 포트홀 발생 건수는 22,692건에 달하며 서울시의 최근 3년간 포트홀 발생 현황도 Fig. 1.과 같이 매년 증가하고 있는 추세를 보인다[1]. 이로 인해 발생한 피해 배상 건수는 2018년 대비 약 2배, 배상액은 약 6배 증가한 것으로 나타났다. 서울의 경우 하루 평균 116건 이상의 포트홀이 발생하고 있으며, 2024년 1분기에는 전년 동기 대비 보수 건수와 면적이 2배 이상 증가하였다. 포트홀은 차량 전복, 낙차 사고, 구동계 파손 등 다양한 교통사고를 유발할 뿐만 아니라, 도로 사용자들의 돌발

적 회피 행동을 초래하여 대형 사고로 이어질 위험이 크다. 따라서 포트홀은 운전자 및 보행자의 안전뿐만 아니라 도로 보수 비용 증가와 같은 경제적 손실을 초래하는 심각한 문제이다.

현재 서울시는 노면 상태를 5단계로 구분하여 포트홀을 관리하고 있으며 AI 포트홀 자동탐지 및 신고 시스템을 도입해 사후 복구를 시행하고 있다. 하지만 이러한 사후 대응 중심의 관리 방식은 포트홀 발생 문제를 근본적으로 해결하기에 한계가 있다. 특히 지속적으로 증가하는 포트홀 발생 추세를 고려할 때, 사전 예방적 관리 시스템의 필요성이 절실하다.

The occurrence of potholes in Seoul during December over the past 3 years.

Unit: Cases

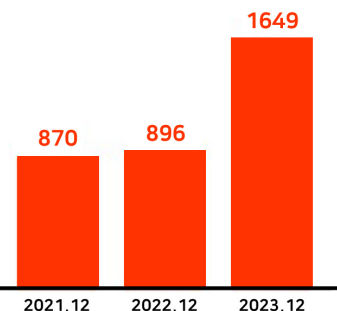


Fig. 1. The current status of pothole occurrences in Seoul

따라서 본 연구는 포트홀 발생의 주요 원인을 다각도로 분석하고 공공데이터를 활용하여 서울시 강남구의 포트홀 발생 취약 정도를 평가함으로써, 포트홀 발생 가능성이 높은 구간을 예측하는 취약도로 지도를 작성하는 방법론을 개발하는데 목적이 있다. 이를 통해 기존의 사후 복구 중심 시스템에서 벗어나 사전 예방적 조치를 통해 포트홀 발생을 줄이고, 교통사고 예방과 안전성을 높이는 기반을 마련하고자 한다. 또한, 예방적 관리로의 정책 전환을 통해 현재 포트홀 복구에 소요되는 막대한 비용과 행정력의 절감 효과도 기대할 수 있다.

본 연구에서 제시한 방법론은 단일 요소가 아닌 강수량, DEM (Digital Elevation Model), 침수예상도, 교통량 등 복합적 요소를 종합적으로 고려하여 포트홀 발생 가능성을 분석함으로써 더 정밀하고 효과적인 예측이 가능하며, 도시 전반의 안전 관리와 유지 보수 체계 개선에 기여할 것으로 기대된다.

1.2. 연구의 범위 및 체계

본 연구의 공간적 범위는 서울특별시 25개 자치구 중 강남구로 한정하였다. 강남구는 지난해 기준 포트홀 발생 빈도가 12,026건으로 서울시 자치구 중 영등포구 다음으로 두 번째로 높은 지역에 해당하며 서울의 주요 업무 및 상업 중심지로 높은 차량 통행량과 54.05%의 불투수면적 비율을 보유하고 있다. 또한 저지대 지형으로 인해 침수 피해가 잦아 포트홀이 발생하기 쉬운 조건을 갖추고 있다. 특히, 최근 몇 년 사이 이상기후로 인한 국지성 호우와 집중호우로 침수 피해가 빈번하게 발생하여 도로의 물 고임과 하중의 증가로 인해 포트홀 발생이 더욱 가속화될 것으로 예상되어 포트홀 취약도로 분석 대상으로 선정하였다. 시간적 범위는 강남구 내 포트홀 발생 요인 데이터를 수집할 수 있는 최근 5년(2019년~2023년)으로 설정하였다. 또한 본 연구는 선행연구 분석을 통해 포트홀 발생 원인과 취약성 분석 방법을 도출하고 강남구의 포트홀 취약성을 평가하기 위한 지표 선정과 분석 방법론을 제시한다. 이를 바탕으로 포트홀 발생 취약도를 등급화하고 시사점을 도출하여 포트홀 발생 가능성이 높은 구간을 예측하는 취약도로 지도를 작성하는 방법론을 개발하는 것을 목

적으로 한다.

2. 선행연구 분석

2.1. 포트홀 관련 선행연구 분석

현재 도로 관리는 일반적으로 소규모의 인력으로 도로 상태를 직접 조사하고, 보수하여 시간과 비용에 있어 상당한 부담이 되고 있다[2]. 특히, 최근 들어 기후변화와 같은 요인으로 포트홀의 수가 급증하고 있는데, 전략적인 유지관리 계획 수립을 위해서는 포트홀 발생 취약 구간 예측이 선행되어야 한다. 일반적으로 도로포장의 파손 예측 모델은 회귀분석법, 생존분석법, Markov모델, 확률론적 기반 모델 등으로 다양하다[3].

국내의 포트홀 관련 연구는 대다수가 포트홀 자동탐지와 관련되어 있고, 발생 가능성에 관련한 연구는 강수량과 강수일자[4] 등 포트홀 발생 요인을 종합적으로 분석하지 못하고 한정된 지표로 평가하고 있다. 도로파손으로 범위를 넓혀 보면 크게는 교통량, 하중, 기후로 분류하고 있으며 세부항목으로는 AADT (연평균 일교통량), ESAL (등가단축하중)을 중심으로 유지보수 경과 년수, 최초 포장 시기, 기온 등의 도로파손 요인을 제시하고 있다[3,5,6]. 해당 연구들은 이러한 평가를 통해 포트홀의 발생이나 도로파손 취약구역을 예측한 것이 아닌 도로파손을 예방하기 위한 새로운 도로의 포장 재료, 단면과 같은 설계기법들을 중심으로 제시하고 있다. 또한 제시된 평가 요소들은 제설제 등의 염화물에 의한 영향과 같은 화학적 요소에 의한 파손 발생 등을 분석하지 못한다는 한계가 있다. 이에, 본 연구는 교통량, 하중, 기후조건 외에도 도시환경에서 포트홀 발생을 유발시키는 다양한 발생 원인들을 분석하고 공공데이터를 활용하여 서울시 강남구를 중심으로 도로의 포트홀 발생 취약정도를 평가하여 이를 기반으로 포트홀 발생 취약지역을 분석하고자 한다.

2.2. GIS를 활용한 취약지 분석 관련 선행연구

GIS (Geographic Information System)는 공간 데이터 분석과 시

Table 1. Previous studies on factors contributing to Road Damage and vulnerability analysis using GIS

No.	Contents	Classification
[3]	- Development of a road pavement damage prediction model for highways using the XGBoost technique - The main influencing factors include the number of years in service, ESAL, and the number of days when the average minimum temperature is below -2 degrees	Road pavement deterioration
[5]	- The Random Forest classification model was utilized to set the road condition index as IRI - The main influencing factors include AADT, ESAL and the number of years since maintenance	
[6]	- Causes of road pavement deterioration and recommended alternatives for port access road - Identify factors contributing to pavement distress on port access road, such as climate impacts (intense rainy seasons) and traffic loads (high rates of heavy vehicle traffic) - Suggested alternatives include increasing the asphalt thickness to 7cm and using PSMA	
[7, 8, 9, 10]	- Assessment of regional disaster vulnerability using GIS-based methodologies - Identification of high-risk areas through multi-factor analysis, including climate hazards and urban infrastructure conditions	Vulnerability analysis using GIS
[11]	- Analysis of elderly mobility vulnerability in hilly urban areas using GIS - Identification of mobility-restricted zones based on population density, slope gradient, and public transport accessibility	
[12]	- Ground subsidence vulnerability assessment through GIS and statistical modeling - Evaluation of risk factors such as subsurface utility distribution, soil characteristics, and historical subsidence occurrences	

각화를 통해 다양한 분야에서 중요한 도구로 활용되고 있으며, 특히 취약도 평가 연구에서 그 타당성이 여러 선행연구를 통해 입증되어 왔다. 재해에 대한 지역별 취약성을 평가한 연구에서는 GIS를 통해 다양한 재해 영향요인 데이터들을 통합하고, 재해 취약지역을 시각적으로 명확하게 식별할 수 있었다[7,8,9,10]. 지역별 고령자 이동취약성을 분석한 연구에서는 GIS를 통해 고령자 밀도, 경사도 및 대중교통시설과의 거리 데이터 등을 통합하고, 고령자 이동취약지역을 시각적으로 도출하였다[11]. 지반함몰 취약성을 평가하고 예측한 연구에서는 GIS를 통해 지하매설물 데이터와 지반함몰 이력을 종합적으로 분석함으로써 효율적인 예측모델을 구축할 수 있다는 결론을 도출하였다[12]. 따라서, 본 연구에서는 포트홀 발생 취약도로를 도출하는데 공간데이터의 통합 및 분석에 있어서 타당성과 유용성이 입증된 GIS 방법론을 적용하였다. 이때, 세밀한 공간 분석과 다양한 데이터의 통합을 가능하게 하는 래스터 기반의 중첩방법을 적용하여 공간 데이터를 통합하였다. 이 방법은 일정한 크기의 셀로 구성되어 있어 도로의 미세한 변화를 감지할 수 있으며, 강수량, 교통량, 경사도 등 포트홀 발생에 영향을 미치는 다양한 연속적 데이터를 하나의 분석 프레임워크 내에서 결합할 수 있다는 장점이 있으며, 기존 연구들에서 유용성이 입증되었다[7,8,10,12].

선행연구 분석 결과 기존 연구들은 포트홀 자동탐지 및 도로포장 파손 예측 기법에 집중되어 있으며 현재 도로의 포트홀 발생 취약성을 종합적으로 평가한 연구는 부족한 실정이다. 또한 GIS를 활용한 취약도 분석 연구들을 토대로 본 연구에서는 포트홀 발생 취약지역을 분석하기 위해 래스터 중첩 분석 기법을 적용하였다. 본 연구에서 참고한 주요 선행연구들의 분석 내용은 Table 1.과 같다.

3. DB 구축 및 분석 방법

3.1. 분석지표 설정

본 연구에서는 포트홀 발생 취약도로를 평가하기 위해 선행연구를 통해 우선적으로 포트홀 발생에 영향을 미치는 외부 영향요인을 도출하였다. 기존 연구에서는 주로 아스팔트와 같은 도로 재료의 성능 평가나 포트홀 발생 후의 대처와 대응 방안에 중점을 두었다. 그러나 포트홀은 도로에 환경적, 구조적, 화학적 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하므로 기존의 접근 방식으로는 포트홀의 발생을 사전에 예측하고, 효과적으로 예방하는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 포트홀 발생의 기후 및 지형 요인, 도로 환경적 요인, 도로 물리적 요인과 같은 세 가지 요인으로 구분하여 평가지표를 선정하였다.

1) 기후 및 지형 요인

도로는 기후에 민감하게 반응한다는 특성이 있기에, 도로에서 발생하는 포트홀의 발생 취약도로를 평가하여 포트홀로 인한 사고를 예방하기 위해서는 기후 및 지형 요인을 체계적으로 분석하는 것이 필수적이다. 이에, 기후 및 지형 요인으로 강수량, DEM을 포트홀 취약도로 평가지표로 선정하였다. 첫 번째로, 포트홀은 우천 이후에 자주 발생하며, 강우의 강도가 세거나 지속 시간이 길어질수록 포트홀의 수가 증가하는 경향이 있다고 밝혀져 있다[4]. 또한, 과도한 강

수는 도로 포장재를 약화시키고 강수로 인한 물의 침투로 인해 기존의 도로 균열을 확대하여 포트홀을 발생을 촉진한다[13,14]. 따라서, 강수량이 많은 지역에서는 침수 위험을 높이고 도로의 무결성을 저하시켜 도로의 물리적 손상이 더욱 빈번하게 발생할 가능성이 높다. 이는 강수량이 포트홀 형성에 중요한 지표로 작용함을 시사한다. 두 번째로, 물은 중력의 영향으로 인해 높은 고도의 지역에서 낮은 고도의 지역으로 자연스럽게 흘러가기에, 지형의 경사와 형태는 물이 모이는 지역을 결정하게 된다. 물이 고이는 구역에서는 고인 물이 도로 포장재에 지속적으로 침투하게 되기에 포장재가 약화되어 포트홀이 발생하기 쉬운 상황이 조성된다[13]. 따라서, 포트홀 발생의 주요 요인 중 하나인 물의 침수 가능성과 침수 위험을 예측하는데 사용하기 위하여 지형의 고도 정보를 제공하는 디지털 고도 모델(DEM)을 활용하여 지형의 영향을 고려하였다.

2) 도로 환경적 요인

도로의 환경적 요인은 배수 시설의 효율성, 지역적 화학적 조건 등을 포함하며, 도로 파손에 미치는 직·간접적 영향을 평가하여 포트홀 발생 취약도로 예측에 결정적인 역할을 한다. 이에, 도로 환경적 요인으로 침수예상도, 침수흔적도, 제설함을 포트홀 취약도로 평가지표로 선정하였다. 우선, 배수의 측면에서 특정 지역의 침수 위험성 및 과거 침수 경험을 나타내는 침수예상도와 침수흔적도는 도로의 배수 상태의 비효율성을 의미하여 배수가 원활하지 않음을 나타낸다. 배수가 원활하지 못하여 침수가 자주 발생하는 지역에서는 빗물이 도로 표면에 장시간 머물게 되어 도로 아스팔트의 구조 손상을 가속화한다[15]. 또한, 2016년에 조사된 서울시 도로포장 유지관리 기본계획 수립에서 도로 포장 상태 불량 구간을 분석한 결과, 포장도로의 포트홀, 소성변형, 맨홀 단차 등으로 인해 노면수가 제대로 배수되지 않아 물고임이 발생하는 사례가 가장 많았다[16]. 즉, 물이 도로 표면과 구조에 지속적으로 영향을 미치므로 포트홀이 발생하기 쉬운 환경을 조성하게 된다. 따라서, 침수예상도 및 침수흔적도는 포트홀 발생 위험을 평가하는 데 중요한 역할을 한다. 다음으로, 겨울철 도로 유지 관리에 사용되는 염화칼슘과 같은 제설제는 저온 균열 후 눈과 함께 도로 균열로 침투하여 도로의 구조적 안정성을 해치는 것으로 밝혀졌다[17,18]. 이는 염화물계 제설제가 도로 재료의 부식을 촉진하여 도로 환경에 화학적 변화를 일으키기 때문이다. 따라서 제설제의 사용 및 그 분포와 영향을 지역적으로 파악하는 것은 포트홀 발생 위험성이 높은 도로를 식별하는 데 필수적이다.

3) 도로 물리적 요인

도로 표면과 구조에 직접적인 물리적 스트레스를 가하게 되면 도로의 마모나 손상이 가속화된다. 이에, 도로 물리적 요인으로 도로 마모 및 도로 하중의 측면을 고려하여 신호등, 버스정류장, 교통량, 공사현장을 포트홀 취약도로 평가지표로 선정하였다. 우선, 신호등과 그 주변 교차로 및 버스정류장은 차량의 빈번한 정지와 출발이 반복되며 특히, 버스와 같은 무거운 차량이 도로 표면에 상당한 하중을 가하게 된다[19]. 2009년 1월 포트홀 발생 및 보수실적을 보면 버스 전용차로의 비율이 상당히 높고, 버스와 같은 높은 하중의 차량이 포장파손에 영향을 미치는 것으로 밝혀져 있다[20]. 교차로 및 버스정

류장과 같은 정차구간에서는 차량의 감속 및 정차, 가속으로 인해 파손이 발생하며, 주행차로와는 다른 교통하중이 적용된다. 이러한 하중은 도로 표면을 압축하고 마모시키는 동시에 기존의 작은 균열을 확장시켜 궁극적으로 포트홀로 이어질 수 있는 위험이 존재한다. 따라서 도로마모 및 도로하중은 포트홀 형성을 가속화하는 주된 원인 중 하나로, 도로의 구조적 안전성을 심각하게 위협하여 포트홀 발생 위험성을 증가시킨다. 또한, 도로의 연한과 통행하는 차량 수는 포트홀 발생과 연관이 있는데[21], 교통량이 많은 도로에서는 지속적으로 높은 하중이 도로 표면에 작용하며 도로 표면의 손상을 가속화할 뿐만 아니라 도로 사용의 빈도가 높아지면서 도로 표면에 가해지는 압력과 마모가 증가하며 반복적 파손구간이 확대된다[22,23]. 이를 통해 도로에 가하는 충격이 포트홀 형성의 또 다른 중요한 요인으로 작용함을 확인할 수 있다. 공사현장 근처의 도로에서는 건설과 관련된 무거운 기계 및 차량이 자주 통행하게 되는데, 이러한 차량들은 일반적인 차량에 비해 더 큰 하중을 가하게 된다. 공사 장비의 이동은 특히 도로 표면에 강한 압력을 가하며, 이러한 반복적인 압력은 도로 재료의 조기 마모와 균열 형성을 초래할 수 있다[24]. 이러한 균열들은 시간이 지나면서 포트홀로 발전할 가능성이 높아진다. 이처럼 도로의 물리적 요인은 포트홀의 발생에 직접적으로 기여하는 주요 요소로 포트홀 취약도로 평가지표로 선정되었다.

3.2. 공간 DB 구축

포트홀 발생 취약도로 분석을 위해 강남구의 기후 및 지형적 요인, 도로 환경적 요인, 도로 물리적 요인별 데이터를 수집하고 공간 DB를 구축하였다. 분석 데이터는 국가에서 제공하고 있는 공공데이터를 확보하여 사용하였으며, GIS를 통해 데이터를 통합 및 가공하였다. 본 연구에서 사용된 포트홀 취약도로 평가지표와 해당 지표별 데이터명 및 출처는 Table 2.와 같다.

강남구의 기후 및 지형적 요인 분석을 위해 기상청 방재 기상 관측(AWS) 데이터를 CSV 형식으로, 국토지리정보원의 수치표고모델(DEM_90M) 데이터를 IMG 형식으로 취득하였다.

도로 환경적 요인 분석을 위해 서울시 열린데이터 광장에서 제공하는 침수예상도 및 침수흔적도 데이터를 SHP 형식으로, 서울시 염화칼슘 살포 위치 및 제설함 위치 데이터를 CSV 형식으로 취득하였다.

도로 물리적 요인 분석을 위해 서울시 신호등 표준좌표 데이터 및 버스정류장 위치 데이터를 CSV 형식으로 취득하였으며, 교통량 조사 자료를 PDF 형식으로, 강남구 민간 공사현장 데이터와 건설공사 추진 현황 데이터를 CSV 형식으로 취득하였다.

CSV 형식으로 취득된 데이터는 모두 XY 좌표 및 주소 데이터를 포함하고 있어 GIS의 지오코딩(geocoding) 및 XY table to point 도구를 활용하여 포인트 데이터로 변환하였다. 최종적으로 통합된 공간 데이터베이스를 구축하여 강남구 포트홀 발생 취약성 분석과 공간적 분포 평가에 활용하였다.

3.3. 분석 방법

포트홀 취약도로를 평가하기 위한 지표로 강수량, DEM, 침수예상도, 침수흔적도, 제설함, 신호등, 버스정류장, 교통량, 공사현장 총

Table 2. Assessment indicator and utilized public data

Indicators			Data		
			Name	Source	Format
Climate and topographic factors	Climate	Precipitation	Disaster prevention weather observation (AWS)	Meteorological administration	CSV
	Topographic	DEM	Digital elevation model (DEM)_90M	National geographic information institute	IMG
Road environment factors	Drainage	Flood prediction map	Seoul flood hazard prediction spatial information	Seoul open data	SHP
		Flood trace map	Seoul flood trace map	Seoul open data	SHP
	Chemical factors	Deicing box	Seoul calcium chloride storage location information	Seoul open data	CSV
			Seoul snow removal box location information		
Physical factors of road	Road wear & road load	Traffic light	Seoul traffic light standard data	Public data portal	CSV
		Bus stop	Seoul bus stop location information	Seoul open data	CSV
		Traffic volume	Seoul traffic volume survey data	TOPIS	PDF
		Construction	Seoul Gangnam-gu private construction sites	Public data portal	CSV
			Seoul city construction project status	Seoul open data	CSV

9가지 평가지표를 선정하였다. 선정된 평가지표는 기존 문헌분석을 통해 각 지표별 적합한 세부적인 평가 방법 및 기준을 적용하였으며, 이는 Table 3.과 같다.

첫 번째로, 기후 및 지형요인은 강수량과 DEM 두 가지의 평가지표로 구성된다. 강수량은 데이터의 공백 문제를 해결하기 위해 역거리 가중치 보간법(IDW)을 활용하여 기상 관측소 사이의 강수량 값을 추정하였다. DEM은 강남구의 지형 데이터를 나타내며, 고도 정보를 포함한다.

두 번째로, 도로 환경적 요인은 침수예상도, 침수흔적도, 제설함 세 가지의 평가지표로 구성된다. 침수예상도 및 침수흔적도는 SHP 파일로 제공된 데이터를 활용하여 해당 구역 내 지역과 외 지역을 구분하여 점수를 부여하였다. 제설함은 밀도분석을 통해 공간적 분포를 분석하였다.

세 번째로, 도로 물리적 요인은 신호등, 버스정류장, 교통량, 공사현장 네 가지의 평가지표로 구성된다. 신호등과 버스정류장은 각각의 도로 마모 영향 반경을 고려하여 반경 내 구역과 외 지역을 구분

Table 3. Assessment methods for pothole vulnerable roads

Indicators			Method	Assessment criteria
Climate and topographic factors	Climate	Precipitation	IDW	- The vulnerable areas increase with higher precipitation - 5-grade classification (20/40/60/80/100)
	Topographic	DEM	Raster file	- The vulnerable areas increase with lower elevation - 5-grade classification (20/40/60/80/100)
Road environment factors	Drainage	Flood prediction map	Shp file	- 100 if within range, 0 if not
		Flood trace map	Shp file	- 100 if within range, 0 if not
	Chemical factors	Deicing box	Point density	- The vulnerable areas increase with higher deicing box - 5-grade classification (20/40/60/80/100)
Physical factors of road	Road wear & road load	Traffic light	Buffer (70m)	- 100 if within traffic light range (70m), 0 if not
		Bus stop	Buffer (120m)	- 100 if within bus stop range (120m), 0 if not
		Traffic volume	IDW	- The vulnerable areas increase with higher traffic volume - 5-grade classification (20/40/60/80/100)
		Construction	Buffer (200m)	- 100 if within construction range (200m), 0 if not

Factor-wise Vulnerability Calculation

$$S_1 = X_{Precipitation} + X_{DEM}$$

$$S_2 = X_{Flood Prediction Map} + X_{Flood Trace Map} + X_{Deicing Box}$$

$$S_3 = X_{Traffic Light} + X_{Bus Stop} + X_{Traffic Volume} + X_{Construction}$$

Final Pothole Vulnerability Calculation

$$S_{final} = S_1 + S_2 + S_3$$

Fig. 2. Pothole vulnerability assessment method

하여 점수를 부여하였다. 교통량은 IDW 보간법을 통해 강남구 교통량을 예측하였으며, 공사현장은 도로사업 운영 시 도로변으로부터의 영향범위를 고려하여 분석하였다.

모든 평가지표는 공간적 영향을 반영하여 5등급으로 나누고, 각 등급에 20, 40, 60, 80, 100점의 점수를 부여하였다. 이를 통해 각 지표별 점수를 산출한 후 이를 폴리곤으로 생성하고 래스터로 변환하여 최종 취약점수를 계산하였다. 기후 및 지형 요인(S_1), 도로 환경적 요인(S_2), 도로 물리적 요인(S_3)을 각각 평가한 뒤, 각 지표별 동일한 가중치를 부여하여 최종 포트홀 취약점수(S_{final})를 산출하였다. 평가방법에 대한 산출식은 Fig. 2와 같다.

4. 강남구 포트홀 취약도로 분석

4.1. 지표별 포트홀 취약도로 평가방법 적용

앞서 지표별로 도출된 적합한 포트홀 취약도로 평가방법 및 종합 방법을 검증하기 위하여 강남구를 대상으로 Esri사의 ArcGIS Pro (지리정보시스템)을 활용하여 포트홀 발생 요인별 취약지역과 포트홀 발생 취약 점수 및 종합 점수를 도출하였다. 이를 위해 데이터 전처리, 분석, 시각화 과정을 단계적으로 수행하였다.

먼저 수집된 기후 및 지형, 도로 환경적, 도로 물리적 요인 데이터를 기반으로 각각의 공간 분석을 진행하였다. 각 요인의 세부 분석 및 점수화 과정은 앞서 3.3에 설명된 방식에 따라 이루어졌으며, 강남구 전역의 공간적 분포를 고려하여 데이터의 신뢰성을 확보하였

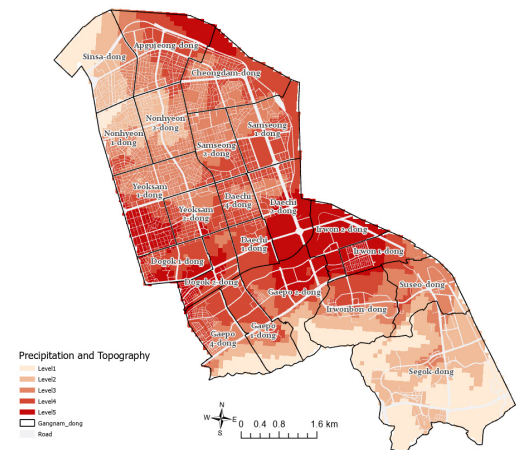


Fig. 3. Analysis of climate and topographic factors in Gangnam-gu

다. 분석 과정에서 IDW, 버퍼링(Buffering), 재분류(Reclassification) 등 다양한 GIS 기능이 활용되었으며, 각 지표별 분석 결과는 래스터 중첩 방법을 통해 최종적으로 통합되었다. 요인별 종합 점수는 지표별 점수를 합산한 결과로 산출되었으며, 이를 기반으로 강남구 내 포트홀 취약지역의 분포를 시각화하고 주요 취약지역을 도출하였다.

1) 기후 및 지형 요인

기후 및 지형 요인은 강남구의 강수량과 지형 데이터를 기반으로 포트홀 취약도 결과를 도출하였다(Fig. 3.). 그 결과 가장 취약한 등급인 Level 5로 분류된 지역은 일원2동, 대치2동, 개포2동, 역삼1동, 일원1동으로 나타났다. 이는 기존 강남구 내에서도 상습적으로 침수가 발생했던 강남역 일대, 대치역 일대, 청담동 및 압구정동 일부 지역들과 일치하는 것으로 분석된다. 해당 지역들은 강수량이 비교적 높고, 지형적으로 저지대에 위치하여 물이 고이기 쉬운 환경적 특성을 갖고 있어 강우 시 배수가 원활하지 않아 도로 마모 및 포트홀 발생 가능성이 커지기 때문에 침수 예상 지역에 대한 침수 방지 시설 확충 등의 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

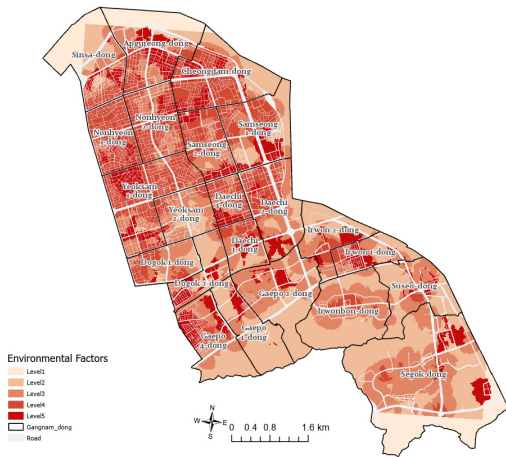


Fig. 4. Analysis of road environmental factors in Gangnam-gu

2) 도로 환경적 요인

도로 환경적 요인은 강남구의 침수예상도, 침수흔적도, 제설함 데이터를 기반으로 포트홀 취약도 결과를 도출하였다(Fig. 4.). 그 결과 가장 취약한 등급인 Level 5로 분류된 지역으로 역삼1동, 압구정동, 청담동, 세곡동, 개포4동 순으로 높은 취약도를 보였다. 역삼1동의 경우 침수흔적도, 침수예상도, 제설함 밀도 값 전체에서 높은 위험도 값이 적용된 것으로 나타났으며 압구정동, 세곡동의 경우 과거 침수흔적도는 적으나 앞으로의 침수 발생 가능성을 나타내는 침수예상도가 높아 해당 지역의 취약도를 높이는 주요 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 또한 역삼1동, 청담동, 대치2동은 도로 표면을 손상시키고 환경에 영향을 미치는 염화칼슘 보관함의 밀도가 높은 것으로 나타났다. 제설함의 밀도가 높은 주변 도로들은 염화칼슘이 자주 살포되었을 가능성이 높아 도로 취약도가 높을 것으로 판단된다.

3) 도로 물리적 요인

도로 물리적 요인은 강남구의 신호등, 버스정류장, 교통량, 공사현장 데이터를 기반으로 포트홀 취약도 결과를 도출하였다(Fig. 5.). 그 결과 가장 취약한 등급인 Level 5로 분류된 지역은 청담동, 압구정동, 개포4동, 일원본동, 논현2동이 주요 취약지역으로 확인되었다. 청담동과 압구정동은 주요 교차로와 버스정류장이 밀집된 지역으로 차량의 빈번한 정차와 가속감속으로 인해 도로 마모가 심화되었을 가능성이 높을 것으로 판단된다. 특히 강남역 일대를 포함하여 강남구 전체 주요 도로들은 교통량이 워낙 많고, 버스정류장 및 공사현장이 밀집해 있어 도로의 취약도가 높을 것으로 판단된다.

4.2. 최종 포트홀 취약도로 분석

앞서 기후 및 지형 요인, 도로 환경적 요인, 도로 물리적 요인의 분석 결과를 종합하여 강남구 내 최종 포트홀 취약도로를 시각화하였다(Fig. 6.). 도로별 취약도는 총 5단계로 위험도를 구분하였으며 빨간색으로 표시된 도로(Index 61-78)는 강남구 내에서도 포트홀 발생 위험이 가장 높은 도로를 나타낸다. 구체적으로 살펴보면, 강남구로 들어오고 나갈 수 있는 교량 진입구간인 성수대교 남단이 포트홀 발생 취약 도로로 확인되었다. 교량 진입부는 상시 높은 교통량과

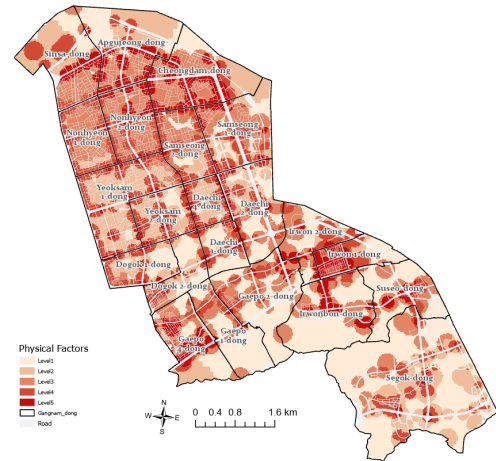


Fig. 5. Analysis of road physical factors in Gangnam-gu

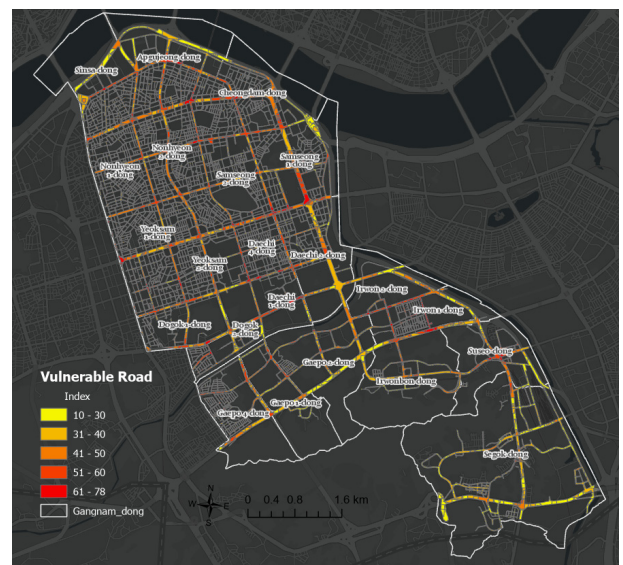


Fig. 6. Final analysis results of vulnerable roads in Gangnam-gu

대형 차량의 빈번한 통행으로 인해 도로 손상이 가중되는 것으로 판단된다. 또한 강남구 내 주요 간선도로 중 학동사거리, 청담사거리 등 도산대로 일대, 삼성아이파크타워 인근 봉은사로, 선릉역과 삼성역을 잇는 테헤란로 및 영동대로 일부, 상습 침수구역인 강남역과 대치역 인근 등이 취약도로로 확인되었다. 이는 강남구의 대표 업무지구를 관통하며 교통량이 매우 많고 차량 정체가 잦아 취약성이 높게 분석된 것으로 판단된다. 강남구 내 일반도로 중에서는 삼성서울병원 앞 도로, 일원1동 내부 주요도로, 강남구청 인근 도로 등이 포트홀 발생에 취약한 것으로 나타났다. 이는 주거지와 병원, 공사현장 등의 문제가 겹치며 지형적 요인까지 더해 취약성이 높아진 것으로 판단된다. 특히 강남구청 인근 도로는 행정 중심지로 유동인구 및 차량의 집중현상으로 인해 도로 취약성이 높아졌을 것으로 판단된다.

5. 결론

포트홀은 도로의 구조적 안전성과 교통안전에 심각한 위협을 가

하는 주요 요인으로, 잦은 이상기후 발생과 도시의 환경 변화로 인해 발생 빈도가 증가하고 있다. 이에 본 연구는 포트홀 발생 취약성을 평가하기 위한 체계적이고 정량적인 방법론을 제시하였다. 본 연구는 국내외 선행연구를 바탕으로 포트홀 발생에 영향을 미치는 요인을 도출하고, 강남구를 대상으로 GIS 기반 취약도로 평가 체계를 구축하였다. 강수량, DEM, 침수예상도, 제설함, 신호등, 교통량 등 다양한 평가지표를 선정하여, 기후 및 지형 요인, 도로 환경적 요인, 도로 물리적 요인으로 세분화하였다. 또한, 이러한 지표별 평가 방법을 GIS를 활용해 통합적으로 분석하고 강남구 내 포트홀 발생 취약지역을 5단계로 구분하여 시각화하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 취약도로 분석 체계의 유용성을 검증하였다.

결론적으로, 본 연구는 기존의 사후 복구 중심의 도로 관리 방식을 넘어, 사전 예방적 관리 가능성을 제시한 점에서 의의를 가진다. 특히, GIS 기반으로 도시 환경과 도로 조건을 정량적으로 분석하여 도로의 취약성을 시각화하고 예방 조치를 구체화할 수 있는 방안을 제안하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 도출된 취약도로 지도는 도로 관리의 우선순위를 설정하고, 위험 지역에 대해 단계별로 구체적인 예방 대책을 마련할 수 있는 근거를 제공한다. 높은 위험도를 나타낸 지역은 배수 개선, 도로 포장 보강, 정밀 점검 강화 등의 조치를 통해 포트홀 발생을 사전에 방지할 수 있다. 중간 위험도의 지역은 정기적인 유지보수와 예방적 점검을 통해 안정성을 확보할 수 있다. 낮은 위험도의 지역은 지속적인 모니터링을 통해 안전 상태를 유지하며, 장기적으로 위험 요인을 관리할 수 있다.

그러나 본 연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 모든 평가 지표에 동일한 가중치를 부여하여 분석하였으며, 지표 간 중요도를 반영하지 못했다는 점에서 한계가 있다. 향후 지표별 중요도를 반영한 가중치 분석이 이루어진다면 보다 정교한 결과를 도출할 수 있을 것이다. 둘째, 본 연구는 포트홀 발생에 영향을 미치는 외적 요인(기후, 지형, 도로 환경 등)을 중심으로 분석하였으나, 도로의 시공 연도, 재료, 포장 상태 등 내적 요인은 포함하지 못했다. 이러한 내적 요인을 반영한 후속 연구가 필요하다. 셋째, 본 연구는 구축 가능한 공간 정보에 국한된 지표를 사용하여 분석을 진행하였으며 포트홀 발생에 영향을 미치는 모든 요인을 포괄하지 못했다는 한계가 있다. 또한, 실제 포트홀이 발생한 위치 데이터를 확보하지 못하여 분석 결과와의 비교 검증이 이루어지지 못했다. 향후 다양한 공공데이터의 추가 제공이 이루어진다면 보다 정확하고 상세한 분석이 가능할 것이다.

이처럼 본 연구는 한계점도 존재하지만 포트홀 발생 취약지역을 효율적으로 분석하고 관리할 수 있는 데이터를 제공함으로써, 지자체 및 정부가 도로 안전 정책을 수립하고 실행하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 공공 데이터의 한계를 보완할 수 있는 AI기반 딥러닝 기반 예측 모델을 적용하거나, IoT 센서를 활용한 실시간 도로 모니터링 체계를 구축하는 방안도 고려할 필요가 있다. 또한, 다른 지역과 도시로의 확대 적용을 통해 국내 도로 관리 시스템의 효율성과 안전성을 제고할 수 있는 기틀을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] 중앙일보, 서울시 포트홀 발생 현황, <https://www.joongang.co.kr/article/25224782>, 2024.01.26. // (JoongAng Ilbo, The current status of pothole occurrences in Seoul, <https://www.joongang.co.kr/article/25224782>, 2024.01.26.)
- [2] 류승기, 스마트 교통을 위한 도로 위험 정보 수집 기술 연구, 정보와통신, 제38권 제6호, 2021.06, pp.24-28. // (S.G. Ryu, A study on road hazard information collection technology for smart traffic, Journal of the Korea Institute of Communications and Information Sciences, 38(6), 2021.06, pp.24-28.)
- [3] 이용준, 선종완, XGBoost를 활용한 고속도로 콘크리트 포장 파손 예측, 한국건설관리학회논문집, 제21권 제6호, 2020.11, pp.46-55. // (Y.J. Lee, J.W. Sun, Predicting highway concrete pavement damage using XGBoost, Korean Journal of Construction Engineering and Management, 21(6), 2020.11, pp.46-55.)
- [4] 한대석, 우천에 따른 포트홀 발생 특성을 고려한 도로순찰 전략, 한국산학기술학회논문지, 제21권 제12호, 2020.12, pp.603-611. // (D.S. Han, Road patrol strategy based on pothole occurrence characteristics considering rainfall effects, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 21(12), 2020.12, pp.603-611.)
- [5] 김기남, 이동열, 이민재, 머신러닝 기반 도로파손에 대한 요인 분석, 대한토목학회 학술대회논문집, 2020.10, pp.960-961. // (K.N. Kim, D.Y. Lee, M.J. Lee, Factor Analysis for road pavement deterioration based on machine learning, KSCE 2020 Convention, 2020.10, pp.960-961.)
- [6] 김영민 외 4인, 부두 인접도로 교통특성에 따른 도로파손 유형 분석 및 설계 개선 연구, 한국도로학회논문집, 제23권 제6호, 2021.12, pp.137-146. // (Y.M. Kim et al., A study of road distress analysis and design improvement according to traffic characteristics of the logistic road for port freight transport, International Journal of Highway Engineering, 23(6), 2021.12, pp.137-146.)
- [7] 장경은 외 4인, GIS 네트워크 분석을 활용한 중구 화재 취약 지역 분석, 한국생태환경건축학회지, 제21권 제6호, 2021, pp.79-86. // (K.E. Jang et al., Jung-gu Fire vulnerable area analysis using GIS network analysis, KIEAE Journal, 21(6), 2021, pp. 79-86.)
- [8] 안관중, 박용미, 최원식, 취약인자의 엔트로피 기반 중첩 분석을 이용한 부산광역시 의 적설재해 취약지역 등급 평가, 대한원격탐사학회지, 제36권 제2호, 2020, pp.217-229. // (C.J. An, Y.M. Park, W.S. Choi, Evaluating vulnerability to snowfall disasters using entropy method for overlapping distributions of vulnerable factors in Busan, Korea, Korean Journal of Remote Sensing, 36(2), 2020, pp. 217-229.)
- [9] 최해림, 한우석, 의료 취약성을 고려한 폭염 재해 취약성 분석 및 취약지역의 특성 도출, 국토연구, 제110호, 2021, pp.63-79. // (H.R. Choi, W.S. Han, Heat wave disaster vulnerability assessment and identification of vulnerable area characteristics considering medical vulnerability, The Korea Spatial Planning Review, 110, 2021, pp. 63-79.)
- [10] 심해영, 조보라, 윤순진, 효율성·형평성을 고려한 폭염취약지도 구성 -폭염저감시설로서의 쿨링포그 최적 입지 도출을 중심으로-, 서울도시연구, 제21권 제4호, 2020, pp.41-63. // (H.Y. Sim, B.L. Ju, S.J. Yun, A study on heat wave vulnerability mapping based on efficiency and equity -Focusing on an optimum location choice for cooling fog in Seoul-, Seoul Studies, 21(4), 2020, pp.41-63.)
- [11] 김종혁, 장영호, 이재규, GIS 분석을 통한 구릉지 고령자 이동취약지역 분석 연구 -서울시를 중심으로-, 한국공간디자인학회 논문집, 제19권 제1호, 2024, pp.89-97. // (J.H. Kim, Y.H. Jang, J.K. Lee, Analysis of elderly transportation vulnerable areas in hilly terrain through GIS -A study centered on Seoul-, Journal of Korea Institute of Spatial Design, 19(1), 2024, pp. 89-97.)
- [12] 서장원, 류동우, 염병우, 토립자 유실을 고려한 로지스틱 회귀분석 및 GIS 기반 도시 지반함몰 취약성 평가, 터널과 지하공간, 제30권 제2호, 2020, pp.149-163. // (J.W. Suh, D.W. Ryu, B.W. Yum, Logistic regression and GIS-based urban ground sink susceptibility assessment considering soil particle loss, Tunnel and Underground Space, 30(2), 2020, pp. 149-163.)
- [13] 조명환, 윤승우, 이윤환, 아스팔트 콘크리트 포장의 포트홀(Pothole) 유지보수 방안, 한국도로학회지: 도로, 제15권 제2호, 2013.06, pp.43-51. // (M.H. Jo, S.U. Yun, Y.H. Lee, Maintenance strategies for potholes in asphalt concrete pavement, Road Engineers, 15(2), 2013.06, pp.43-51.)

- [14] 임정혁 외 3인, 도로 이용자 안전을 위한 경기도 포트홀 현황 분석 및 향후 관리 방안의 제안, 한국도로학회논문집, 제21권 제1호, 2019.01, pp.51-59. // (J.H. Im et al., Suggestion of future pavement maintenance by pothole analysis in Gyeonggi-do, International Journal of Highway Engineering, 21(1), 2019.01, pp.51-59.)
- [15] 진정훈, 김지선, 이윤한, 기후변화에 따른 아스팔트 포장도로의 조기파손, 한국도로학회지: 도로, 제15권 제2호, 2013.06, pp.5-12. // (J.H. Jin, J.S. Kim, Y.H. Lee, Early deterioration of asphalt pavement due to climate change, Road Engineers, 15(2), 2013.06, pp.5-12.)
- [16] 신상영, 김상균, 백종탁, 서울시 노면 물고임 실태와 관리 방안, 서울연구원, 2018.12. // (S.Y. Shin, S.G. Kim, J.R. Baek, Current conditions and management measures of road puddles in Seoul, The Seoul Institute, 2018.12.)
- [17] 조신행, 김낙석, 배수성 아스팔트콘크리트 혼합물의 반복 동결융해 저항성 평가, 대한토목학회논문집 D, 제32권 제1D호, 2012.01, pp.33-39. // (S.H. Jo, N.S. Kim, An evaluation of resistances in porous asphalt concrete mixtures due to repeated cyclic freeze-thawing, Journal of the Korean Society of Civil Engineers D, 32(1D), 2012.01, pp.33-39.)
- [18] 류성룡, 박병용, 정창현, 고열전도 콘크리트를 활용한 저온열원 융설시스템의 전열성능 실험연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제13권 제3호, 2019.06, pp.165-175. // (S.R. Ryu, B.Y. Park, C.H. Cheong, Small-scale experimental study on thermal performance of snow melting system using low temperature heat source and highly thermal conductive concrete, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 13(3), 2019.06, pp.165-175.)
- [19] 서울특별시, 서울시 도로포장 유지관리 기본계획, 서울특별시 안전총괄본부, 2017.12. // (Seoul Metropolitan Government, Seoul Metropolitan Government road pavement maintenance basic plan, Seoul Metropolitan Government, 2017.12.)
- [20] 배윤신 외 3인, 서울시 통합 도로포장 관리정책 개발, 서울연구원, 2011.12. // (Y.S. Bae et al., Development of integrated pavement management policies in Seoul, The Seoul Institute, 2011.12.)
- [21] 김은경, 인천시 안전한 도로환경조성을 위한 정책 제언: 기반침하 관리 대책을 중심으로, 도시연구, 제13호, 2018.06, pp.79-106. // (E.K. Kim, Policy suggestions for the creation of a safe road environment in Incheon City: Focused on measures for the ground settlement management, Korean Journal of Urban Studies, 13, 2018.06, pp.79-106.)
- [22] 박성완, 안동석, 반복 교통하중에 의한 도로지반의 장기변형 예측, 대한토목학회논문집 D, 제30권 제5D호, 2010.09, pp.505-512. // (S.W. Park, D.S. An, Predicting long-term deformation of road foundations under repeated traffic loadings, Journal of the Korean Society of Civil Engineers D, 30(5D), 2010.09, pp.505-512.)
- [23] 국토교통부, 2021 도로포장관리시스템: 최종보고서, 2022.03. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Final-report of the national highway pavement management system 2021, 2022.03.)
- [24] 김영하, 이운길, 이영수, 누적영향평가를 위한 평가범위 산정에 대한 연구 -생활환경분야를 중심으로-, 환경영향평가, 제17권 제5호, 2008.10, pp.299-309. // (Y.H. Kim, O.K. Lee, Y.S. Lee, A study on range of environmental impact assessment for cumulative effect assessment -A review on living environment sector-, Journal of Environmental Impact Assessment, 17(5), 2008.10, pp.299-309.)