

빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 간 연계 방안 연구

Big Data-Based Landslide Risk Analysis for Buildings and
Study on Linking Disaster Risk at the Building Unit

조영진 Cho, Youngjin
허한결 Heo, Hankyul
현태환 Hyeon, Taehwan
송유미 Song, Yumi
김호걸 Kim, Hogul
염승일 Yum, Seungil
김준우 Kim, Junwoo

(a u r i

일반연구보고서 2024-10

**빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및
건축물 단위 재난 리스크 간 연계 방안 연구**

Big Data-Based Landslide Risk Analysis for Buildings and
Study on Linking Disaster Risk at the Building Unit

지은이	조영진, 허한결, 현대환, 송유미, 김호결, 염승일, 김준우
펴낸곳	건축공간연구원
출판등록	제2015-41호 (등록일 '08. 02. 18.)
인쇄	2024년 12월 29일, 발행: 2024년 12월 31일
주소	세종특별자치시 가름로 143, 8층
전화	044-417-9600
팩스	044-417-9608

<http://www.auri.re.kr>

가격: 10,000원, ISBN:979-11-5659-498-7

이 연구보고서의 내용은 건축공간연구원의 자체 연구물로서
정부의 정책이나 견해와 다를 수 있습니다.

| 연구책임

조영진 선임연구위원

| 연구진

허한결 부연구위원

현태환 부연구위원

송유미 연구원

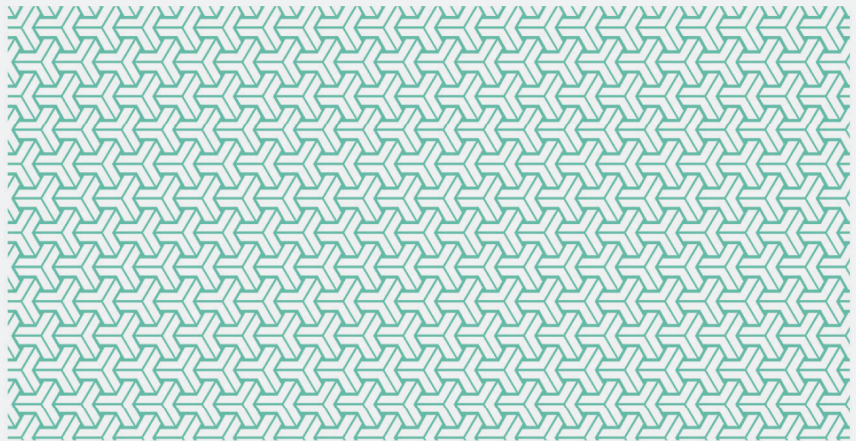
| 외부연구진

김호걸 청주대학교 조경도시학과 부교수

염승일 청주대학교 조경도시학과 조교수

김준우 청주대학교 조경도시학과 연구원

연구요약



1. 서론

최근 이천 쿠팡 물류센터 화재, 강남역 침수, 예천 산사태와 같은 대규모 재난이 빈번히 발생하며 국민의 안전에 대한 우려가 커지고 있다. 건축물과 도시공간에서 발생하는 재난은 국민의 일상과 밀접하게 연결되어 있어 불안을 증폭시키고 있다. 건축물의 경우 재난 발생시 피해비용이 크고, 건축물 내 재실자의 신체적 상해 및 사망사고도 발생할 수 있는 상황이다. 이에 따라 건축물의 재난·재해 위험성을 분석하고 안전을 확보할 수 있는 방안 마련 필요성이 대두되고 있다.

산사태는 극한강우 발생 시 특히 많이 발생하며, 건축물 자체에 물리적 피해를 입히기도 하며, 건축물 내·외부 공간에 재산 및 인명 피해를 야기한다. 특히 2023년 7월 예천에서 발생한 산사태와 같은 경우 산림 인근 건축물 및 거주자의 대규모 인명 및 재산 피해가 발생하여 산사태에 대한 국민의 관심이 높아졌다. 이에 대응하기 위한 다양한 방안들이 법·제도적으로 제시되고 있으며, 해외에서도 다양한 방식으로 피해 최소화 방안을 모색하고 있다.

건축물의 특성과 입지는 재난·재해의 발생 가능성과 피해 규모에 중요한 영향을 미친다. 예를 들어, 연면적이 큰 건축물은 상대적으로 화재 발생 가능성이 높고, 저지대 건축물은 침수 피해가 발생할 가능성이 높으며 지하층이 있을 경우 피해 규모가 커질 가능성이 높다. 이같은 건축물의 재난 피해 특성을 이용하면 재난 리스크가 높은 건축물을 도출하는 것이 가능할 것이며, 이들 건축물에 대해 우선적으로 점검하고 관리하여 효율적인 건축물 안전 확보가 가능해질 것이다.

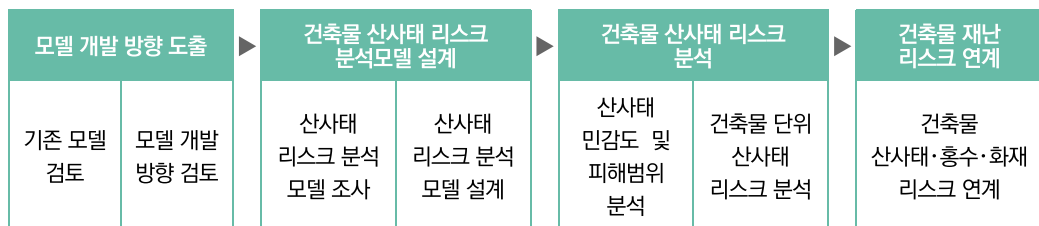
건축물 단위의 재난 리스크는 다양한 요인에 의해 결정되어 정확하게 예측하거나 추정하기 어렵다. 최근에는 IoT, 머신러닝, 딥러닝 등 첨단 기술과 빅데이터를 활용하여 기존 연구보다 높은 정확도로 건축물 및 도시공간의 재난 리스크 분석이 가능해졌다. 대규모 데이터를 처리해 건축물의 복잡한 특성을 통합적으로 분석하고, 다양한 재난 유형에 대한 리스크 분석 모델 구축이 가능하게 되었다. 이를 이용한 건축물 재난 리스크 분석을 바탕으로 건축물의 안전을 확보하기 위한 대책 마련이 가능해졌다.

본 연구는 건축물에 피해를 줄 수 있는 다양한 재난 리스크의 분석 방법을 도출하고, 재난 리스크를 연계하는 방안을 마련하고자 한다. 해당 연구는 3개 연도에 걸친 연구과제의 3년차 연구이며, 1차연도와 2차연도 연구에서 건축물의 화재, 홍수 리스크에 대한 연구를 수행하였다. 3차연도에는 추가적인 재난 요소로 건축물 산사태 리스크에 대한 분석 방법을 개발하고, 여러 재난 리스크의 연계 방법을 개발 및 적용하고자 한다.



연차별 모델 개발 현황

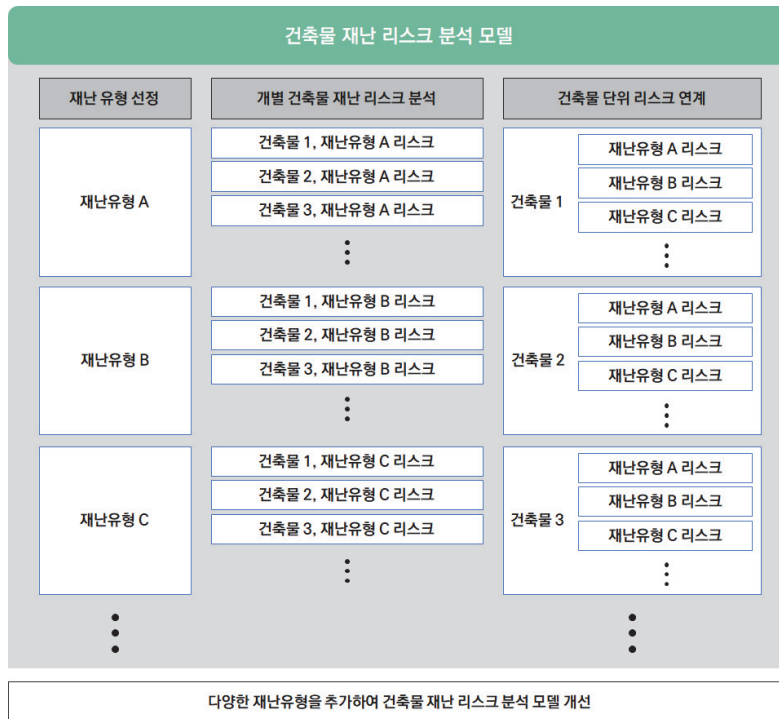
본 연구는 세부적으로 네 단계로 구분할 수 있다. 첫째, 건축물 리스크 분석 모델 개발 방향 도출이다. 기존 모델을 검토하고 본 연구에서 개발하려는 모델의 개발 프레임 제시하고자 한다. 둘째, 건축물 산사태 리스크 분석모델 개발이다. 1차 및 2차연도 연구에서 도출하지 않은 재난 유형인 건축물 산사태 리스크 분석 방법을 개발하고자 한다. 셋째, 개발한 모델을 이용하여 건축물 산사태 리스크 분석을 수행한다. 이를 통해 건축물 재난 리스크 연계를 위한 산사태 부문의 건축물 리스크 데이터를 구축하고자 한다. 마지막으로 건축물 산사태, 홍수, 화재 리스크를 건축물 단위에서 연계하고자 한다. 이를 통해 건축물 재난 연계 모델의 실효성을 검증하고, 전체 연구 과정에서 도출된 시사점을 종합하여 건축물의 재난안전 제고를 위한 정책 개선 방안을 제시하고자 한다.



건축물 산사태 리스크 분석모델 프로세스

2. 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 방향

본 연구에서 개발하고자 하는 건축물 리스크 분석 모델은 세 가지 기준을 충족하도록 개발하고자 한다. 첫째, 다양한 재난 유형에 대응할 수 있고, 재난 유형을 자유롭게 추가하거나 제거할 수 있어야 한다. 둘째, 건축물 단위의 재난 리스크를 제시할 수 있어야 한다. 셋째, 건축물 재난 리스크를 바탕으로 대응방안을 마련할 수 있도록 결과를 이해하기 쉬워야 한다. 이를 위한 건축물 재난 리스크 분석 모델은 개별 재난 유형에 대한 건축물 단위의 리스크를 분석하고, 건축물 단위로 분석된 재난 리스크를 연계할 수 있도록 개발하고자 한다.



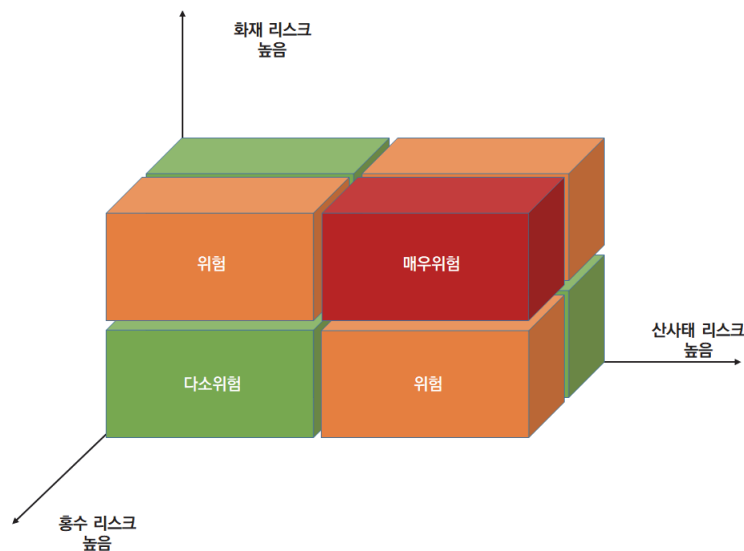
건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 개념

건축물 재난 리스크 분석 모델의 분석 프로세스는 총 세 단계로 구분할 수 있다. 첫째, 고려하고자 하는 재난 유형을 선정하는 단계이다. 단, 본 연구의 건축물 재난 리스크 분석 모델은 건축물 단위의 리스크 연계를 목적으로 하기 때문에 건축물에 피해를 입힐 수 있는 재난 유형을 선정할 필요가 있다. 둘째, 재난 유형별로 건축물 단위의 재난 리스크를 도출하는 단계이다. 이를 위해 재난 유형별 리스크 분석 방법을 개발할 필요가 있으며, 본 연구에서는 기존 연구의 건축물 화재와 홍수 리스크 분석 방법에 이어 건축물 산사태 리스크 분석 방법을 개발하고자 한다.

셋째, 건축물 단위로 재난 리스크를 연계하는 단계이다. 서로 다른 재난 리스크를 동일한 건축물 단위에서 연계하기 위해 본 연구에서는 다차원 매트릭스 기법을 적용하였다.

다차원 매트릭스는 여러 차원의 데이터를 동시에 정리·분석할 수 있는 도구로, 리스크 간 상호작용을 체계적으로 파악하고 종합적인 대응 전략을 수립하는 데 효과적이다. 이를 통해 리스크 간 상관관계를 고려한 우선순위 설정, 다양한 시나리오 분석, 그리고 복잡한 데이터의 체계적 관리가 가능하다. 그러나 다차원 매트릭스는 차원이 많아질수록 복잡성과 데이터 요구량이 급격히 증가한다. 충분한 데이터가 없거나 리스크의 정량화가 어려울 경우 분석의 신뢰도가 낮아질 수 있으며, 구축과 유지에 필요한 비용과 시간이 커 작은 조직에서는 부담이 될 수 있다.

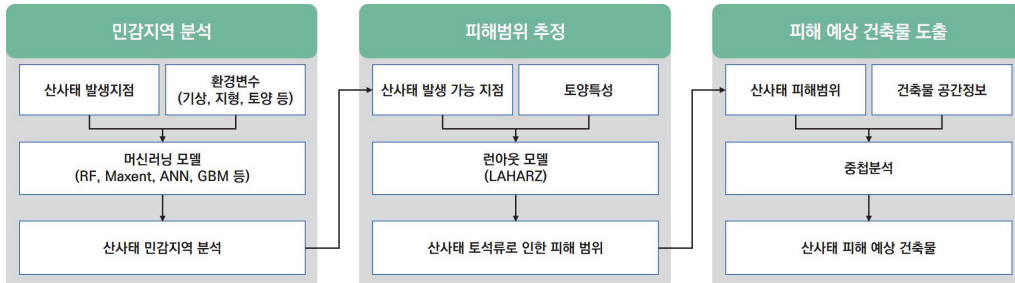
본 연구에서는 다차원 매트릭스를 활용해 건축물의 화재, 홍수, 산사태 리스크를 건축물 단위에서 종합적으로 분석할 수 있도록 하였다. 이를 통해 각 건축물의 재난유형별 리스크 수준을 확인하고, 세 가지 재난에 대한 통합적 리스크 수준 또한 분석할 수 있다. 이를 통해 재난 유형 조합에 따른 건축물의 위험도를 평가하고, 특정 상황에 대비한 전략 수립이 가능하다.



다차원 매트릭스 기반의 건축물 재난 리스크 연계 개념

3. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계

건축물 산사태 리스크 분석 모델은 1) 산사태 민감지역 분석, 2) 산사태 피해범위 추정, 3) 산사태 피해 예상 건축물 도출의 총 세 단계 프로세스로 구성하였다.



건축물 산사태 리스크 분석모델 개념

산사태 민감지역 도출을 위해 과거 산사태 발생지점 데이터와 산사태 발생에 영향을 미치는 지형, 토양, 식생, 기후 관련 환경 변수를 사용하였다. 종속변수로 사용하는 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 피어슨 상관계수를 활용해 높은 상관성을 가진 변수는 제외하여 적용하였다. 산사태 민감지역 분석을 위한 모델로는 ANN, XGBoost, GLM 등 머신러닝 기반의 앙상블 모형을 사용하였다. 최종 모델의 정확도 분석을 위한 AUC값은 0.934로 모델의 정확성이 높은 것으로 나타났다.

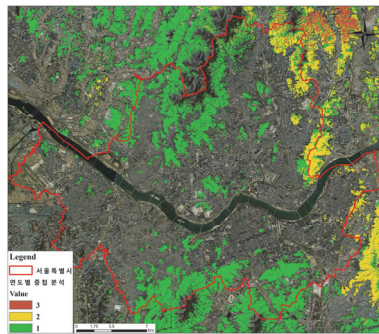
산사태 피해범위 도출은 다양한 런아웃 모델을 검토하여 최종적으로 LAHARZ를 사용하였다. LAHARZ는 토석류의 흐름을 분석할 수 있는 소프트웨어로 미국 지질조사국(USGS)에서 개발하였으며, 산사태 피해범위 분석에 빈번하게 사용되고 있다. 분석을 위해 산사태 민감지역 도출 결과에서 산사태 발생 가능 지점을 추출하고, 기상조건과 지형, 지질, 토양, 식생 등 정보를 활용하여 산사태 발생 시 토석류로 인한 피해범위를 분석하였다.

마지막으로 산사태 토석류의 피해범위 내에 포함된 건축물을 추출하였다. 이를 위해 건축물대장 정보를 지오코딩하여 공간데이터로 변환하여 사용하였다. 지오코딩은 biz-gis의 지오코딩툴을 사용하였으며, 서울시 전체 건축물 596,244동을 대상으로 분석을 수행하였다.

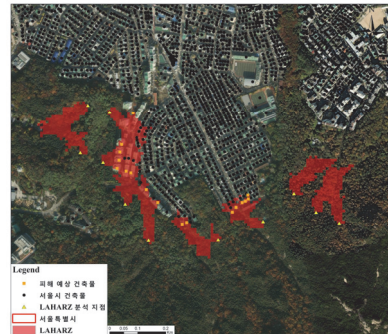
4. 건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 분석

건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 분석을 위한 대상지는 서울시로 선정하였다. 서울시의 건축물 홍수 및 화재 리스크는 2차년도 연구결과를 활용하였으며, 건축물의 산사태 리스크는 본 연구에서 분석하여 도출하였다. 모델 분석을 통해 나타난 산사태 민감 지역에 과거 산사태 발생지점의 비율은 88.4%로 비교적 높은 정확도를 나타내고 있다.

건축물 단위 산사태 리스크 도출을 위해 서울시 관악구를 대상으로 산사태 피해범위 분석을 수행하였다. 산사태 발생 가능 지점은 산사태 민감성 분석 결과 민감성이 80% 이상으로 나타난 지역을 추출하였다. 관악구 내에는 산사태 민감성 분석에 의한 산사태 발생 가능지점이 총 19곳으로 도출되었고 해당 지점들에 대해 LAHARZ 모델을 구동하였다.



서울시 산사태 민감도 분석 결과



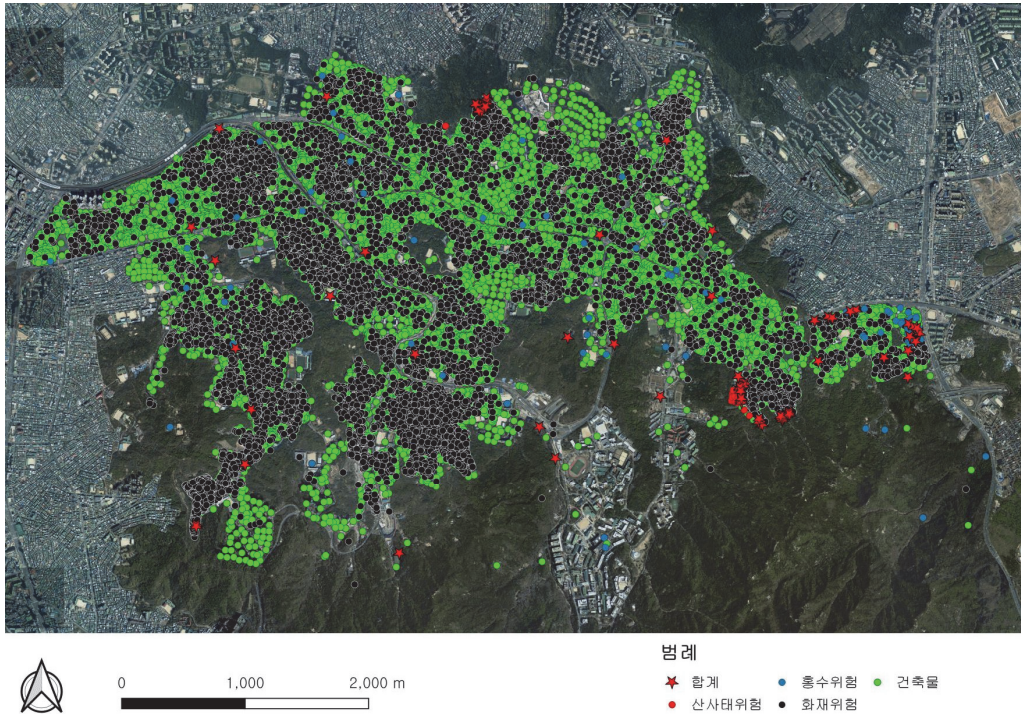
LAHARZ 모델 구동 결과 예시

산사태 민감도 및 피해범위 분석 결과

산사태 피해범위 도출 후 건축물 공간정보와 중첩 분석을 수행하였다. 19곳의 산사태 발생 가능지점 중 10개 지점에서 산사태 발생 시 피해범위 내에 건축물이 위치하나, 나머지 9개 지점에서는 산사태가 발생하여도 피해를 입는 건축물이 없는 것으로 도출되었다. 결과적으로 서울시 관악구 내 산사태 발생 시 피해를 입을 가능성이 높은 건축물은 총 67개 동으로 도출되었다.

마지막으로 서울시 관악구를 대상으로 건축물 화재, 홍수, 산사태 리스크를 연계하였다. 다차원 매트릭스를 통해 세 가지 리스크를 연계 분류하면, 건축물의 리스크는 총 8가지 카테고리로 구분되며, 리스크가 높은 재난 유형의 수에 따라 ‘매우 위험’, ‘위험’, ‘다소 위험’, ‘안전’으로 분류된다.

관악구 내 32,079개 건축물 중 화재 및 홍수 리스크가 높은 건축물은 48동 (0.15%)이며, 주로 하천변과 대로변에 위치한다. 반면, 화재 및 산사태 리스크가 높은 건축물은 47동(0.15%)으로, 주로 산림 주변에 분포한다.



건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 결과

홍수 및 산사태 리스크가 모두 높은 건축물은 없었으며, 따라서 세 가지 재난 유형의 리스크가 모두 높은 건축물도 존재하지 않는 것으로 나타났다. 두 가지 이상의 재난 유형 리스크가 모두 높은 건축물은 총 95동(0.3%)으로, 이는 화재 및 홍수, 화재 및 산사태 리스크가 높은 건축물 수의 합계와 일치한다. 도출된 건축물 재난 유형별 리스크 특성과 리스크가 높은 건축물의 지역분포를 바탕으로 건축물의 안전 확보를 위한 점검지역 설정, 점검항목 설정, 대응방안 마련이 가능할 것이다.

5. 결론

본 연구는 건축물의 다양한 재난 리스크를 연계하여 사전에 확인하고, 이를 토대로 효율적인 관리 방안을 제안할 수 있는 기초자료를 도출하고자 하였다. 기존 1차, 2차연도 연구와 연계하여 건축물의 산사태, 홍수, 화재 리스크를 연계 분석하였으며, 이를 위해 건축물 산사태 리스크 분석 방법을 개발하고 다양한 리스크를 연계할 수 있는 다차원 매트릭스 기법을 도입하였다. 연구 결과 건축물의 재난 리스크를 높은 정확도로 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 연구를 통해 세 가지 정책적 시사점을 얻을 수 있었다.

첫째, 건축물 단위의 데이터 연계 강화가 필요하다. 건축물 재난 리스크 분석을 위해 다양한 데이터가 활용되었으나, 현재 데이터는 개별 시스템에서 비효율적으로 관리되고 있다. 화재, 홍수, 산사태 등 재난 관련 정보를 건축물 생애이력 시스템으로 통합하여 유통함으로써 데이터 연계성을 높이고, 재난안전 통계분석, 경보발령, 긴급점검과 같은 안전관리 활동을 원활히 수행할 수 있는 체계를 마련해야 한다.

둘째, 건축물 단위의 재난위험 확인 시스템이 필요하다. 현재 건축물 단위의 재난안전 정보를 제공하는 서비스는 제한적이며, 국민이 자신의 건축물이 재난으로부터 안전한지 확인하기 어려운 실정이다. 건축물 생애이력 관리시스템을 활용하여 건축물 단위로 재난위험을 확인할 수 있는 서비스를 구축하면, 거주자와 이용자가 안전 여부를 손쉽게 파악하고 대응방안을 모색할 수 있다. 이를 통해 재난안전 확보와 건축물 관리의 효율성을 증대시킬 수 있다.

셋째, 건축물 통합 안전 플랫폼을 도입할 필요가 있다. 현재 화재, 홍수, 산사태 등의 재난 정보는 각기 다른 기관에서 관리하며, 건축물 단위로 통합 제공되지 않아 효율성이 떨어진다. 건축물 거주자와 이용자가 화재, 홍수, 산사태 외에도 폭염, 태풍 등 다양한 재난 정보를 한눈에 확인할 수 있는 통합 플랫폼을 구축해야 한다. 이를 위해 각 기관 간 데이터 연계와 부족한 재난위험 데이터의 추가 구축 방안이 필요하다.

주제어

빅데이터, 건축물 화재 위험, 건축물 홍수 위험, 건축물 산사태 리스크, 머신러닝

차례

CONTENTS

제1장 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	2
1) 연구의 배경	2
2) 연구의 목적 및 기대효과	7
2. 연구의 범위 및 방법	8
1) 연구의 범위	8
2) 연구의 방법	9
3. 산사태 피해 및 대응 현황	11
1) 국외 산사태 발생 현황 및 대응 사례	11
2) 국내 산사태 발생 현황 및 대응 사례	23
3) 시사점	33
제2장 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 방향	35
1. 모델 개발 방향 검토	36
1) 건축물 리스크 분석 모델 개념	36
2) 리스크 연계 방안	38
2. 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델	45
1) 화재 및 홍수 리스크 분석 관련 동향	45
2) 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발	46
3) 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 적용	48
3. 모델 개발 방향	50

차례 CONTENTS

제3장 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계	53
1. 모델 개발의 틀	54
2. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계	55
1) 적용 모델 검토	55
2) 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계	64
3) 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발 방향	66
3. 산사태 민감지역 분석 모델 개발	67
1) 대상지 선정 및 특성	67
2) 입력데이터 선정 및 구축	67
3) 앙상블 모형 구동	74
4. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발	76
1) 입력데이터 구축	76
2) 피해범위 분석	77
3) 건축물 단위 리스크 분석	80
제4장 건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 분석	81
1. 건축물 산사태 리스크 분석	82
1) 산사태 민감지역 분석 결과	82
2) 산사태 민감지역 분석 기반 산사태 발생 시작지점 추정 결과	86
3) 산사태 피해범위 추정 결과	87
2. 건축물 재난 리스크 연계 분석	91
1) 개별모형 분석 결과	91
2) 모형 연계 결과	94
3. 소결	98

차례 CONTENTS

제5장 결론	101
1. 연구요약	102
2. 정책화 방안	104
3. 연구의 한계 및 향후과제	108
참고문헌	111
Summary	119

표차례 LIST OF TABLES

[표 1-1] 전세계 산사태 피해금액	12
[표 1-2] 최근 5년간 산사태 발생 이력	24
[표 1-3] 최근 5년간 지역별 산사태 발생 횟수	24
[표 2-1] 다차원 리스크 매트릭스의 분석 결과 예시	44
[표 2-2] 재난·재해 분석 변수 정리	46
[표 2-3] 건축물 화재 및 홍수 리스크 유형	49
[표 3-1] 산사태 민감성 평가에 사용된 모델	57
[표 3-2] 토석류 런아웃 모델의 특징	62
[표 3-3] 산사태 리스크 모델의 종속변수	68
[표 3-4] 산사태 리스크 모델의 독립변수	69
[표 4-1] 산사태 피해 예상 건축물의 용도 및 구조	89
[표 4-2] 건축물 재난 유형별 리스크	91
[표 4-3] 건축물 재난 유형별 리스크	95
[표 4-4] 건축물 재난 유형별 활용 데이터 목록	100
[표 5-1] 「건축물관리법」 제7조 개정안	104

그림차례

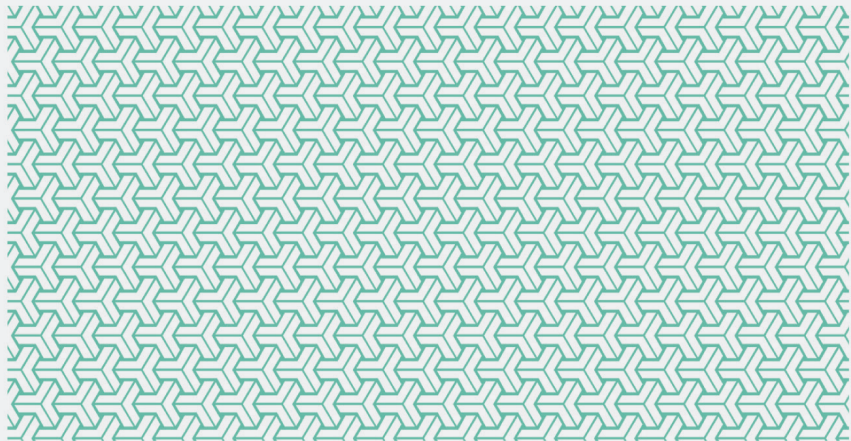
LIST OF FIGURES

[그림 1-1] 건축물 홍수 및 산사태 발생 현황	2
[그림 1-2] 딥러닝 알고리즘 개념과 딥러닝 기반 리스크 분석 사례	4
[그림 1-3] 연차별 건축물 재난안전 분석모델 고도화 요약	6
[그림 1-4] 연구 흐름도	10
[그림 1-5] 워싱턴주 오소 산사태	12
[그림 1-6] 워싱턴주 오소 산사태로 인한 경관 변화	13
[그림 1-7] 베네수엘라 바르가스 산사태 피해지역 전경	15
[그림 1-8] 바르가스 산사태에 의한 건축물 피해	16
[그림 1-9] 인도 말린 산사태 발생 사진	18
[그림 1-10] 인도 말린 산사태 전후 항공사진	19
[그림 1-11] 테라스 시공 예시	20
[그림 1-12] 콜롬비아 모코아 산사태	20
[그림 1-13] 모코아 산사태 피해복구 현장	22
[그림 1-14] 중국 저우취현 산사태	23
[그림 1-15] 전라북도 남원시 산사태	25
[그림 1-16] 경상북도 예천군 산사태 현장	25
[그림 2-1] 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 개념	36
[그림 2-2] 리스크 분석을 위한 딥러닝 적용 개념도	37
[그림 2-3] 통합 재난리스크관리 개념의 개발사	38
[그림 2-4] 통합 재난리스크관리의 리스크 통합 개념	39
[그림 2-5] DMSC의 서비스체인 프로세스	41
[그림 2-6] 다차원 리스크 매트릭스 활용 사례	42
[그림 2-7] 리스크 산정 개념	45
[그림 2-8] 모델 개발 과정 요약	46
[그림 2-9] 화재 리스크 분석 모델 변수 중요도	47
[그림 2-10] 홍수 리스크 분석 모델 변수 중요도	48
[그림 2-11] 건축물 홍수 및 화재 리스크 지도(개별 분석 결과)	48
[그림 2-12] 건축물 홍수 및 화재 리스크 지도(연계 분석 결과)	49
[그림 2-13] 연차별 모델 개발 현황	50
[그림 3-1] 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발의 틀	54
[그림 3-2] 앙상블 모델의 구조 개념	57

그림차례 LIST OF FIGURES

[그림 3-3] 산사태 런아웃 분석의 기본 개념	58
[그림 3-4] FLO 2D모델을 사용한 토석류 흐름 분석 예시	59
[그림 3-5] RAMMS 모델을 사용한 토석류 흐름 분석 예시	60
[그림 3-6] D-Claw과 FLO 2D, RAMMS, 모델들을 비교	61
[그림 3-7] 산사태 민감지역 및 피해 범위 기반 리스크 분석 모델 흐름	65
[그림 3-8] 서울시와 경기도의 산사태 발생지점	68
[그림 3-9] 산사태 민감성 분석을 위한 환경변수 구축 결과	72
[그림 3-10] LAHARZ 모델을 사용한 화산성 이류 및 토석류 위험 구역	77
[그림 3-11] 우면산의 실제 산사태 피해 범위와 적정 부피값 설정을 위한 LAHARZ 테스트 구동 결과	79
[그림 4-1] 연도별 산사태 민감지역 분석	82
[그림 4-2] 연도별 산사태 민감지역 변수 중요도 및 개별 모형 AUC값	83
[그림 4-3] 연도별 산사태 민감지역 및 중첩분석 지도	84
[그림 4-4] 산사태 민감지역 종합 분석 변수 중요도 및 개별 모형 AUC값	85
[그림 4-5] 관악구 LAHARZ 구동 지점	86
[그림 4-6] 관악구에 대한 LAHARZ 구동 결과	87
[그림 4-7] 건축물 산사태 리스크 산정 방식 개선 개념	88
[그림 4-8] 재난 유형별 건축물 리스크 지도	92
[그림 4-9] 다차원 매트릭스기반 건축물 재난 리스크 연계	94
[그림 4-10] 건축물 화재 및 홍수 리스크 지도	95
[그림 4-11] 건축물 화재 및 산사태 리스크 지도	96
[그림 4-12] 건축물 재난 리스크 지도	97
[그림 5-1] 건축물 생애이력 관리시스템의 건축물 검색 화면	106
[그림 5-2] 국민재난안전포털의 자연재해 통계지도	107

제1장 서론



1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 방법
3. 산사태 피해 및 대응 현황

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

□ 건축·도시공간 재난 증가 및 피해발생에 대한 국민 관심 집중

2021년 이천 쿠팡 물류센터 화재, 2022년 강남역과 관악구 반지하 침수사태, 2023년 예천 산사태 등 국민 안전을 위협하는 대규모 재난이 지속적으로 발생하고 있다.

재난의 종류

「재난 및 안전관리 기본법」 제3조에 따르면, '재난'이란 국민의 생명·신체·재산과 국가에 피해를 주거나 줄 수 있는 것을 말한다. 이를 크게 자연재난과 사회재난으로 구분하고 있으며, 자연재난은 태풍·홍수·강풍·폭염·지진 등 자연현상으로 인하여 발생하는 재해로, 사회재난은 화재·붕괴·교통사고·감염병 등으로 발생하는 피해로 세분하고 있다. 이러한 재난은 종류별 정도의 차이는 있지만 대부분 사용 중인 건축물과 직간접적으로 관련이 있다.

출처 : 조영진. 2023. 재난과 데이터 그리고 건축물 재난 예방. p. 6

특히, 이 같은 재난이 국민 삶과 밀접한 도시 및 건축물 주변에서 발생하여 불안감을 증폭시키고 있는 현실이다. 뿐만 아니라 국민들이 재난·재해 발생에 따른 인명 및 경제적 피해에 대한 정보를 접하고 있어, 건축·도시공간에서 발생하는 재난과 재해에 대한 관심도가 높아지고 있다.



건축물 홍수 피해



건축물 산사태 피해

[그림 1-1] 건축물 홍수 및 산사태 발생 현황

출처 : (좌) 정세진. 2022. 신림동 숨진 가족처럼...영화 '기생충' 반지하 집에 32만 가구가 산다. 머니투데이. 2024.04.28. 접속;
(우) 김규현. 2023. '예천 산사태' 경북 북부 폭우 피해액 2,946억원 잠정 집계. 한겨레. 2024.04.28. 접속

최근 사례를 살펴보면 많은 건축물이 재난·재해로 인해 피해를 입었으며, 국민들은 재난·재해로부터 안전한 건축물을 요구하고 있다. 건축물은 국민들이 가장 많은 시간을 보내는 공간 중 하나이며, 재난과 재해로부터 건축물의 안전이 확보되지 않을 경우 국민 불안감이 증폭될 수 있다. 건축물의 안전을 확보하기 위해 현재 재난·재해로부터 위험한 건축물이 무엇인지, 해당 건축물의 안전 확보를 위한 수단은 무엇인지 확인할 필요가 있다.

□ 건축물 리스크 분석을 통한 건축물 재난별 위험도 파악 가능

건축물 특성과 입지가 재난·재해 발생 가능성에 영향을 미치며, 발생 시 피해 정도에 영향을 준다. 예를 들어, 연면적이 큰 건축물은 화재가 발생할 가능성이 높고, 저지대에 위치한 건축물은 홍수피해를 입을 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 도로 연결성이 낮은 건축물이 화재 발생 시 피해규모가 클 것이며, 건축면적이 큰 건축물일수록 홍수 발생 시 피해규모가 클 것으로 알려져 있다(조영진 외 2023, pp.98-101). 즉, 건축물 특성과 입지환경 특성을 이용하여 건축물 리스크를 분석 가능함을 확인할 수 있다.

건축물 재난·재해 리스크 분석 결과를 토대로, 리스크가 높은 건축물부터 점검 및 관리함으로써 효율적인 건축물 안전확보가 가능할 것이다. 우리나라에 있는 건축물은 700만 동이 넘으며, 모든 건축물을 일일이 점검하고, 재난·재해 대응 능력을 개선하기는 어렵다. 다만, 재난과 재해 발생위험이 큰 건축물, 재난과 재해 발생 시 피해가 클 것으로 예상되는 건축물을 선제적으로 도출하고 이에 대응한다면, 효율적으로 안전을 확보할 수 있다.

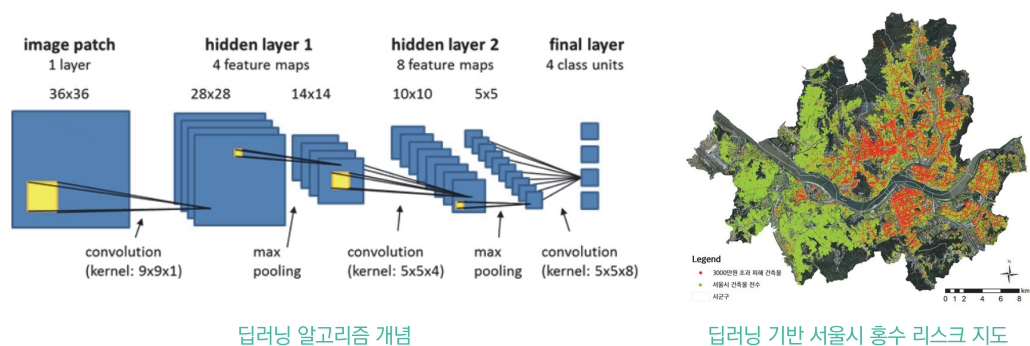
□ IoT, 머신러닝, 딥러닝 등 제4차 산업혁명 기술 기반 리스크 분석 고도화 필요

IoT, ICT 기술 개발로 수집되는 데이터 크기가 방대해졌으며, 진정한 의미의 빅데이터 활용이 가능해졌다. 다양한 기기와 시스템에서 수집되는 데이터의 양이 기하급수적으로 증가하고 있고, 단순한 저장을 넘어, 분석 및 활용이 가능한 진정한 의미의 빅데이터 시대가 도래하였다. 예를 들어, 스마트 시티에서는 교통 흐름, 에너지 소비, 공기 질 등 다양한 데이터를 수집하여 도시의 효율적인 관리와 운영을 가능하게 되었고, 의료 분야에서는 환자의 건강 데이터를 분석해 맞춤형 진단과 치료가 가능해졌다.

뿐만 아니라 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘 개발로 빅데이터를 활용한 리스크 분석 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 기존 정성적 연구 대비 높은 정확도를 나타내고 있다. 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘은 방대한 양의 데이터를 처리하고 분석

할 수 있으며, 기존의 정성적 연구 방법에 비해 높은 정확도를 나타내는 것이 특징이다. 또한, 딥러닝 기술은 데이터의 복잡한 특성을 분석하고 이해하는 데 강력한 도구로 작용하여 다양한 산업에서 리스크 관리의 새로운 지평을 열고 있다. 이처럼, 빅데이터와 첨단 알고리즘의 결합은 리스크 분석의 효율성과 정밀성을 크게 향상시켜 더욱 정확하고 신속한 의사 결정을 내릴 수 있도록 돕는다.

결과적으로, 빅데이터와 머신러닝 및 딥러닝 기술을 활용한다면 건축물 재난·재해 리스크 분석이 가능할 것이며, 기존의 연구들보다 좋은 결과를 도출할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 다양한 데이터의 취사선택을 효율적으로 수행하는 딥러닝 모델을 사용한다면, 건축·도시공간의 다양한 데이터를 복합적으로 사용할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.



딥러닝 알고리즘 개념

딥러닝 기반 서울시 홍수 리스크 지도

[그림 1-2] 딥러닝 알고리즘 개념과 딥러닝 기반 리스크 분석 사례

출처 : (좌) Trimble. 2021. Deep Learning (CNN) Algorithms. Reference Book eCognition Developer. https://docs.ecognition.com/v10.0.2/eCognition_documentation/Reference%20Book/02%20Algorithms%20and%20Processes/9%20Deep%20Learning%20%28CNN%29%20Algorithms/Deep%20Learning%20%28CNN%29%20Algorithms.htm. 2024.04.28. 접속;

(우) 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p.10

□ 건축물 재난 피해감소를 위해 리스크 분석에 기반한 합리적 점검체계 필요

사전예방적 건축물 재난·재해 대응을 위해 화재·홍수·산사태 리스크가 높은 건축물 식별 및 리스크 정도에 대한 파악이 필요하다. 전술한 것처럼 빅데이터, 머신러닝, 딥러닝 등 기술을 이용하여 건축물의 리스크를 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 리스크 분석을 위한 데이터 수집 및 연계 방안을 개발하고, 데이터를 이용한 분석의 틀 구축 등 추가적인 연구가 필요한 부분이 남아있다.

건축물의 재난·재해 리스크를 바탕으로, 「건축물관리법」 등에 근거하여 기 시행 중인 건축물 점검의 효율화 및 합리화 방안을 마련할 필요가 있다. 현재 시행 중인 건축물 점검 제도는 건축물의 재난 및 재해 안전 관점에서 다소 비효율적일 수

있다. 이를 개선하지 않으면 재난 발생 시 효과적인 대응이 어려울 수 있다.

따라서 점검 절차를 간소화하고, 리스크 평가를 기반으로 한 맞춤형 점검 방안을 도입함으로써 점검의 실효성을 높여야 한다. 이를 통해 건축물의 재난 및 재해 리스크를 사전에 예방하고, 안전한 생활환경을 조성할 수 있을 것이다.

□ 화재, 홍수 등 건축물에 피해를 입히는 재난·재해에 통합적 대응 필요

개별적 재난·재해에 대응할 뿐만 아니라, 화재, 홍수, 산사태 등 다양한 재난·재해에 통합적으로 대응할 수 있는 건축물 통합예방안전 모델이 필요하다. 다양한 재난·재해에 효과적으로 대응하기 위해 개별적 대응 방식에서 벗어나 통합적인 예방 및 안전 모델이 필요하다. 화재, 홍수, 산사태와 같은 자연재해는 각각의 특성에 맞는 대응 방안을 요구하지만, 건축물 측면에서의 대응 우선순위를 판단하기 위해서는 통합적인 리스크 평가가 필요하다.

즉, 통합적인 대응 체계를 갖춘 건축물 예방안전 모델을 개발할 필요가 있다. 통합안전 모델을 통해 지속적인 모니터링과 유지보수가 가능하며, 이를 통해 인명과 재산 피해를 줄이고, 안전하고 지속가능한 건축물과 생활환경을 조성할 수 있을 것이다. 본 연구에서 개발하는 건축물 화재·홍수·산사태 리스크 통합분석 모델에 기초하여 건축물 통합예방안전 모델의 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

□ 데이터 기반 건축물 재난 안전 확보 연구의 지속적 추진 필요

빅데이터를 활용한 건축물의 재난 안전 관련 연구는 2022년, 2023년에 이어 지속되는 연구로, 연구의 품질을 제고하고, 건축물 안전 확보를 위해 지속적으로 추진할 필요가 있다.

빅데이터 기반 건축물 화재 예측 모델 개발 연구 (2022)

- 건축물 화재 발생 가능성을 예측하기 위해 건축물 속성정보와 범죄발생 데이터를 활용
- 정확도는 70% 미만으로 낮으나 건축물 속성과 화재발생과의 상관관계를 확인

빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구 (2023)

- 재난 발생에 더하여 피해금액까지 고려하는 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석을 수행
- 정확도 80% 이상의 높은 정확도를 확보하였으며, 예상되는 피해금액의 높고 낮음을 사전에 판단
- 화재와 홍수 두 가지 재난을 모두 고려함으로써 건축물 관리의 우선순위 판단 근거 마련

□ 건축물 재난 안전 확보 연구에 건축물 산사태 리스크 고려 필요

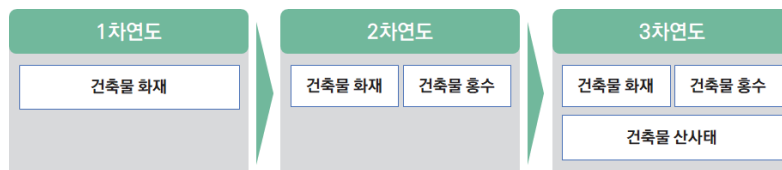
산사태는 자연재해 중에서도 예측이 어렵고 단시간에 큰 피해를 초래할 수 있는 재난이다. 특히 우리나라는 산림이 많고 폭우 및 태풍으로 인한 산사태 발생 가능성이 높은 축에 속한다. 최근 몇 년간 한국에서는 여름철 집중호우와 태풍으로 인해 산사태 피해가 빈번히 보고되었다. 특히, 산림 인근 지역에서 주거 및 경제 활동을 하는 경우가 많아 산사태 발생이 인명 및 재산 피해로 이어지고 있다. 이러한 상황에서 건축물의 산사태 리스크를 분석하고 예방 조치를 마련하는 것이 중요한 과제로 떠오르고 있다.

한국에서는 매년 여름철 집중호우 시 산사태로 인한 피해가 꾸준히 보고되고 있다. 2020년 여름, 중부 지방을 강타한 집중호우로 인해 약 600건 이상의 산사태가 발생했으며, 2022년 태풍 힌남노의 영향으로 남부 지방에서도 대규모 산사태가 발생하여 많은 가옥과 농경지가 매몰되는 사례가 있었다. 가장 최근에는 2023년 7월 예천 산사태로 인해 주택 및 인명피해가 발생하여 산사태가 단순히 자연재해를 넘어 사회적, 경제적 타격을 입히는 재난임을 확인하였다.

산사태는 주로 급경사지나 산지 인근 건축물에서 발생 위험이 높다. 따라서 건축물이 위치한 지형, 토양 상태, 주변 식생, 그리고 강우량 데이터 등을 종합적으로 분석하여 리스크를 사전에 파악할 필요가 있다. 이러한 분석을 통해 사전 예방 조치가 가능할 것이며, 산사태 발생에 따른 피해를 최소화하고, 사회적 및 경제적 손실을 절감시킬 수 있을 것이다. 즉, 산사태 리스크 분석은 인명과 재산 피해를 예방하는 데 핵심적인 역할을 한다. 이에 산사태 리스크 분석을 통해 보다 안전한 환경을 조성할 수 있도록 연구를 수행하고자 한다.

□ 화재 및 홍수에 더하여 산사태 리스크를 종합적으로 고려한 모델 개발

본 연구는 건축물 화재, 홍수 리스크 분석 모델에 더하여 건축물 산사태 리스크를 고려한 건축물 화재·홍수·산사태 리스크 분석 모델을 개발하고자 한다.



[그림 1-3] 연차별 건축물 재난안전 분석모델 고도화 요약

출처 : 연구진 작성

2) 연구의 목적 및 기대효과

□ 건축물 산사태 리스크 분석 방법 개발

기존 산사태 관련 연구는 산사태 민감지역을 분석하여 산사태 발생 가능성이 높은 지역을 찾는 연구에 집중되어있다. 그러나 본 연구는 건축물의 산사태 리스크를 분석하기 위해 산사태 발생 시 피해를 입을 가능성이 높은 건축물을 도출하고자 한다. 이를 위해 산사태 민감지역 분석, 산사태 피해범위 분석, 건축물 공간정보와 중첩분석 등 다양한 분석을 연계하여 건축물의 산사태 리스크를 분석할 수 있는 방법론을 제안하고자 한다.

□ 건축물 안전 개선을 위한 재난·재해 취약 건축물 도출 방안 마련

소규모건축물 등 정기점검 사각지대에 있는 건축물 중 재난·재해 취약 건축물에 대한 점검 필요성 제안하고자 한다. 현재 「건축물관리법」에서 다루지 못하는 건축물 중 재난 및 재해 리스크가 높은 건축물이 있음을 확인하고, 이 같은 건축물의 특징을 도출함으로써 정기점검 사각지대에 있는 건축물 유형을 제시하고자 한다. 이를 통해 건축물 안전을 개선할수 있는 효율적 점검 프로세스 모색하고자 하며, 이를 위한 근거자료를 제시하고자 한다.

□ 건축물 단위 화재·홍수·산사태 리스크 연계 모델 개발 및 정확도 향상

각종 건축물 재난·재해에 통합적으로 대응하는 ‘건축물 화재·홍수·산사태 리스크 연계 분석 모델’을 개발하고자 한다. 2022년 ‘건축물 화재 발생 예측모델’, 2023년 ‘건축물 화재 및 홍수 리스크 분석모델’을 기 개발 하였으며, 2024년에는 산사태 리스크 분석 모델을 개발 및 기존 모델의 분석 결과와 연계하여 다양한 재난 및 재해 리스크 분석이 가능한 모델을 제시하고자 한다.

□ 공공데이터 연계 방법 실증 및 빅데이터 구축을 위한 기초 확립

산개되어있는 공공데이터를 건축물 재난·재해 리스크 분석에 활용할 수 있도록 연계하고 활용할 수 있는 방법론을 도출할 수 있다. 정부는 「공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률」에 근거하여 공공데이터 포털을 운영중이며, 국가가 구축한 다양한 데이터를 관리 및 유통하고 있다. 이 같은 데이터를 활용함으로써 건축물의 재난 및 재해 안전을 개선하는 방법론 개발 뿐 아니라, 데이터 연계 방안을 마련하고 개별 부처에서 생산 및 관리하는 공공데이터들의 활용성을 제고하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

1) 연구의 범위

□ 공간적 범위

연구의 공간적 범위는 서울시로 선정하였다. 서울시는 공공데이터의 가용성이 높아 다양한 데이터를 활용한 분석이 가능하다. 특히 이전 연구인 “빅데이터 기반 건축물 화재 예측 모델 개발 연구(2022)”, “빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구(2023)”의 연구대상지와 동일하게 설정하여 연구의 연속성을 부여하였다. 또한, 홍수와 화재 데이터가 잘 구축되어 있으며, 과거 우면산 산사태와 같은 산사태로 인한 건축물 피해 발생 이력이 있는 지역이다.

□ 내용적 범위

연구의 내용적 범위는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 건축행정데이터와 공공데이터의 연계 방안을 도출하고 이를 연계하는 것이다. 이를 위해 데이터 수집, 정제 및 전처리를 진행하고, 매칭키를 도출하여 데이터 연계 방안을 모색할 것이다. 또한, 데이터 연계 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 그 해결 방안을 제시함으로써 향후 건축·도시공간 빅데이터 생산을 위한 기초연구로서 의미를 갖는다.

둘째, 건축물의 산사태, 홍수, 화재 리스크 분석모델을 개발하고 검증할 것이다. 이를 위해 재난 유형별 리스크 분석 방법을 도출하고, 건축물 산사태, 홍수, 화재 리스크 분석모델을 개발하고자 한다. 또한, 기 개발된 리스크 분석모델을 보완하고 개선 방안을 제시함으로써 향후 건축물 단위 리스크 연계모형 개발 및 완성도를 제고하고자 한다.

셋째, 건축물 산사태, 홍수, 화재 리스크 분석모델의 활용 방안을 제안하고자 한다. 본 연구에서 개발한 모델을 적용하여 산사태, 홍수, 화재 대응이 필요한 건축물을 도출하고 검증할 수 있다. 뿐만 아니라 본 연구의 예측 결과와 리스크가 높은 건축물들의 특성을 활용하여 건축물의 재난·재해 대응 및 안전성 개선 방안을 제시하고자 한다.

2) 연구의 방법

□ 문헌조사

- 산사태 발생 및 대응 현황 관련 사례조사
- 산사태 분석모형 조사

□ 건축물 단위 데이터 구축

- 건축물 형상정보와 속성정보 연계를 통한 건축물 공간정보 구축
 - 건축물 형상정보 및 속성정보 연계방안 도출
 - 품질 저하를 최소화하는 건축물 단위 데이터 연계
- 산사태·홍수·화재 피해 예측을 위한 속성정보 생산 및 건축물 단위 연계
 - 건축물 산사태·홍수·화재 피해에 영향을 미치는 변수 도출
 - 관련 데이터 수집 및 가공을 통한 데이터베이스 구축
 - 피해정보 및 건축물 데이터 등 이기종 데이터 연계

□ 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발

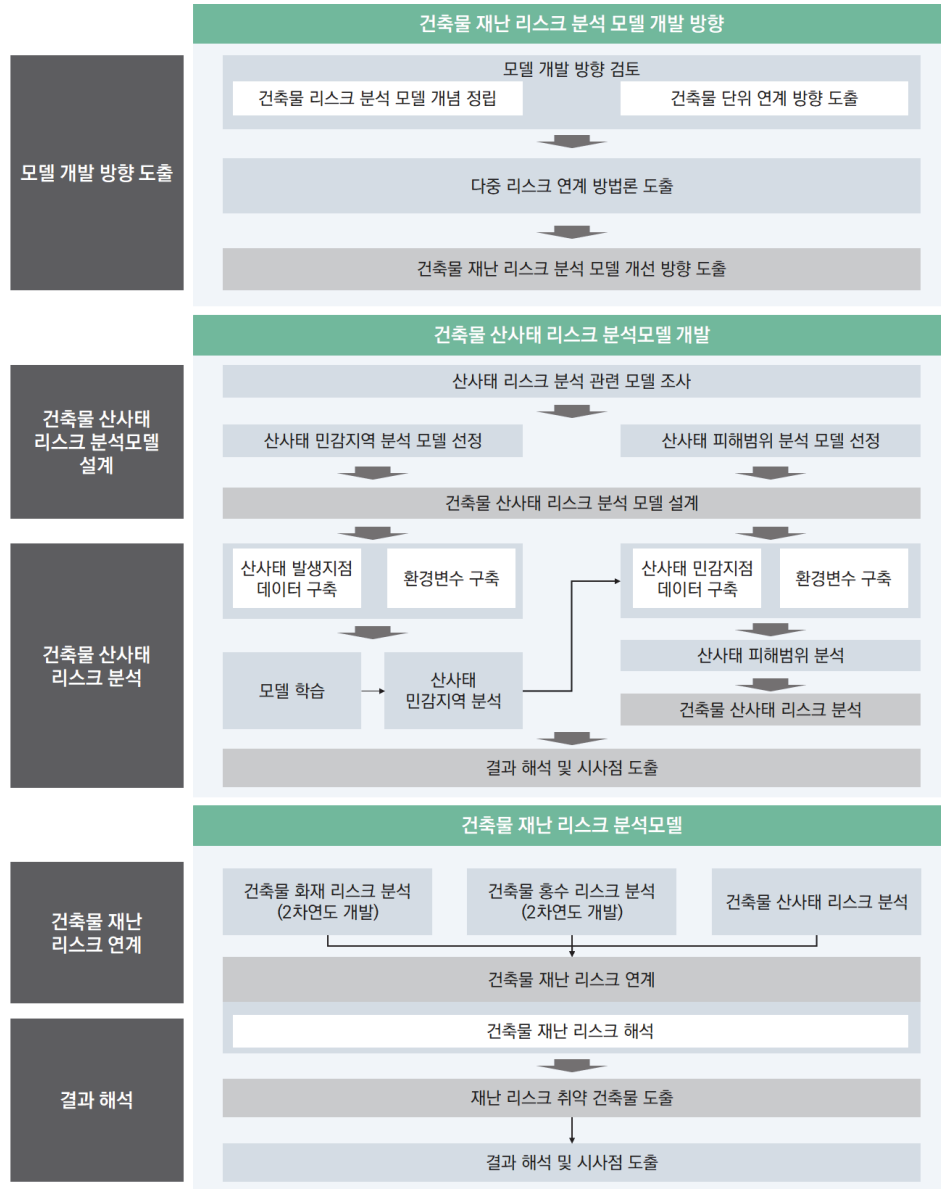
- 산사태 리스크 분석 모델 연구
 - 산사태 리스크 분석을 위한 산사태 발생 메커니즘 조사
 - 산사태 발생이 건축물 피해정도에 영향을 주는 매커니즘 분석
- 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발
 - 독립변수와 종속변수 선정
 - 기계학습 및 딥러닝 등 리스크 분석 모형 선정
 - 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발

□ 건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 분석

- 리스크 분석모델 설계
- 건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 분석 및 결과 해석

□ 전문가 활용

- 산사태 전문가 대상 리스크 분석을 위한 주요변수 도출 및 검증
- 분석모형 선정 및 검증 방법 검토
- 데이터 및 개발 모델 활용 방안 검토



[그림 1-4] 연구 흐름도

출처 : 연구진 작성

3. 산사태 피해 및 대응 현황

본 연구에서는 건축물 재난 리스크 분석 모델에 포함될 세 번째 재난 유형으로 산사태를 검토하고자 하였다. 산사태는 건축물에 피해를 입히는 주요 요인 중 하나이다. 건축물에 가장 큰 피해를 주는 재난유형은 화재로 1차연도에 다루었으며, 두 번째로 큰 피해를 입히는 재난유형은 침수로 2차연도에 다루었다. 산사태는 침수와 함께 폭우가 야기하는 피해 중 하나로 건축물에 대한 피해규모가 상당한 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구는 국내·외 산사태 발생 현황 및 대응 사례를 검토함으로써 산사태 피해에 대한 이슈를 파악하고, 건축물 재난 리스크 분석 모델에 산사태를 포함시킬 당위성에 대해 검토하고자 한다.

1) 국외 산사태 발생 현황 및 대응 사례

□ 산사태 발생 동향

NASA는 전 세계 산사태 발생지도를 구축하고 있으며, 2007년부터 2019년 사이에 약 11,033회의 산사태가 발생한 것으로 집계하고 있다.¹⁾ 뿐만 아니라 WHO (World Health Organization)에 따르면 1998년부터 2017년까지 20년간 산사태로 인해 약 480만 명이 피해를 입었고 18,000명 이상이 사망하였다. 특히 기후 변화로 인해 더 많은 산사태가 발생할 것으로 예상하고 있다.²⁾

2015년부터 2024년까지 10년간 발생한 전세계의 대규모 산사태 피해금액은 총 약 25억 달러(약 3조 4,700억 원) 수준으로 집계되고 있다.³⁾ 해당 데이터는 Our World in Data에서 집계하는 것으로, 국제적 및 국가 단위의 지원이 필요했던 산사태를 중심으로 산정된 피해금액이다.

산사태 발생지점 및 피해금액의 경우 전 세계적인 발생동향을 추적하기 어려워 원격탐사를 이용한 발생지점 추정, 미디어나 뉴스 및 보고서에 제시된 산사태 발생 사례를 통해 집계된다. 다만, 규모가 큰 산사태 발생 횟수만 보더라도 약 20년간 1만회 정도로 발생 횟수가 많으며, 최근 10년간의 피해금액이 3조 4,700억 원에 이르는 것을 볼 때 세계적으로 산사태 피해가 큰 것을 확인할 수 있다.

1) Landslides@NASA. Landslide Team Projects. <https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html#GLC>. 2024.06.07. 접속

2) World Health Organization. Landslides. https://www.who.int/health-topics/landslides/#tab=tab_1. 2024.06.07. 접속

3) OurWorldinData. 2024. Economic damage by natural disaster type, 2013 to 2024. Apr 11.

[표 1-1] 전세계 산사태 피해금액

발생년도	피해금액(\$)	발생년도	피해금액(\$)
2015	8,000,000	2020	130,000,000
2016	725,000,000	2021	250,000,000
2017	147,300,000	2022	0
2018	928,036,000	2023	0
2019	200,000,000	2024	88,110,000

출처 : OurWorldinData. 2024. Economic damage by natural disaster type, 2013 to 2024.
Apr 11. 2024.06.07. 접속. 으로부터 재편집

① 워싱턴주 오소 산사태⁴⁾

□ 개요

2014년 3월, 워싱턴 주 오소의 소규모 마을 인근에서 발생한 산사태로 주변지역에 큰 피해가 발생하였다.



[그림 1-5] 워싱턴주 오소 산사태

출처 : Long, Priscilla. 2014. Catastrophic landslide hits Steelhead Haven, near Oso, Snohomish County, on March. HistoryLink.org. Sep 17. 2024.06.16. 접속

해당 산사태로 인해 49동의 건축물이 매몰되었으며, 43명이 사망하는 인명피해가 발생하였다. 이는 미국 역사상 가장 치명적인 산사태 중 하나로 기록되어 있다.

4) The Seattle Times. <https://special.seattletimes.com/o/flatpages/local/oso-mudslide-coverage.html>. 2024.06.16. 접속

□ 피해현황

오소 산사태로 인해 43명 사망 및 다수의 부상자가 발생하였다. 또한, Steelhead Haven 지역 49채의 주택과 기타 구조물이 매몰된 것으로 보고되었다. 미국에서 가장 큰 피해를 준 산사태 중 하나로 기록된 오소 산사태는 산사태 규모가 매우 큰 편에 속하기 때문에 대부분의 건물이 완전 파손되었으며, 잔해가 매우 넓은 지역에 광범위하게 흩어졌다. 또한, 전력 및 급수 시스템을 포함한 대부분의 사회 기반시설이 심각하게 손상되어 산사태 발생 이후에도 인근 거주자 생활에 큰 영향을 주었다. 산사태 발생지역 주변의 주요 도로인 530번 주도(State Route 530)가 약 1.6km차단되었다. 도로는 약 6미터 깊이의 토사, 나무 등 잔해에 묻혀 차량이 전혀 지나갈 수 없는 상태가 되었고, 산사태 피해를 입은 지역이 주변 지역으로부터 고립될 수밖에 없는 상황을 야기하였다.

Stillaguamish 강의 북쪽 지역이 산사태 잔해로 인해 부분적으로 막혀 다양한 문제를 야기하였다. 강이 막혔기 때문에 상류지역은 홍수 위험에 직면하였으며, 댐이 갑자기 무너질 경우 하류 지역 또한 잠재적인 홍수 위험이 예상되었다. 또한, 산사태로 인해 주변 경관이 극단적으로 변화하였으며, 기존의 산 비탈면은 평지에 가까운 상태로 변화하였다. 약 7,500,000m³의 잔해가 흘러내렸기 때문에 기존의 산림 경관을 전혀 찾아볼 수 없는 상태로 변화하였다.



[그림 1-6] 워싱턴주 오소 산사태로 인한 경관 변화

출처 : Seattle Times staff. 2024. Oso landslide: A 2014–2024 timeline of devastation, discovery and memory. The Seattle Times. Mar 18, 2024.06.16. 접속

산사태로 인해 많은 주민들이 원 거주지에서 떠나 대피해야 했고, 이로 인해 임시 및 장기 이재민이 발생되었다. 인명, 재산 피해로 인해 대부분의 주민들이 정신적 트라우마를 겪었다. 많은 사람들이 산사태 및 관련 재난에 대한 불안감을 호소하였으며, 몇몇은 이에 더하여 집과 막대한 재산피해를 입었다. 주택과 인프라가 파괴됨으로써 복구 및 재건을 위해 상당한 비용 지원이 이루어졌다. 30번 주도와 인근 도로, 그리고 산사태 피해를 입은 건축물 소유자 및 거주자는 오랜 기간 동안 피해복구를 진행하였다.

□ 대응방안

산사태 발생 이후 오소지역에는 경사계, 피에조미터(piezometer), 지상 기반 레이다 시스템을 포함한 첨단 지질 모니터링 장비를 산사태 지역과 그 주변에 설치하였다. 이러한 장비는 지면의 움직임, 지하수 수위의 변화 등을 탐지하여 산사태 발생 가능성을 예측하고 경고할 수 있는 근거자료를 제시해준다. 이같은 측정 에 기반한 조기 경보 시스템을 개발하였다. 주 및 지방 기관은 지질학자들과 함께 토양 안정성에 대한 실시간 데이터를 제공하는 조기 경보 시스템을 구축하여 산사태에 사전에 대비할 수 있도록 하였다. 즉, 산사태 조기 경보 시스템을 통해 잠재적인 산사태 발생가능성을 거주자 및 관계기관에 경고하여 적시에 대피하고 위험 완화 조치를 취할 수 있도록 대처하였다.

산사태 발생가능성 자체를 차단하기 위해 주변 경사면 관리 및 배수 개선활동을 수행하였다. 피해 지역과 주변 지역의 경사면을 안정화하기 위해 사면 안정화 작업을 수행하였다. 이를 위해 옹벽 건설, 토양 못 박기(Soil nailing)⁵⁾ 등 관련 공법이 적용되었다. 또한 산사태를 유발할 수 있는 토양 공극 내 물 축적을 방지하기 위한 배수관리가 필요하였다. 유출수를 관리하고 경사면의 정수압을 줄이기 위해 수평 배수 및 지표수 전환 채널과 같은 효과적인 배수 시스템을 설계하고 설치하는 작업을 수행하였다.

지역 및 주 정부는 산사태 고위험 지역의 개발제한을 위해 관계법을 개정하였다. 향후 도시 및 건축계획 시 산사태 위험을 고려하도록 하였으며, 관련하여 토지이용 및 개발지역 관련 법규를 개정하였다. 이에 따라 새로운 도시개발 및 건축을 위해 산사태 위험이 높은 지역으로부터 일정 거리 이격하도록 기준이 제시되었다. 이같은 기준은 향후 산사태가 발생하여도 발생지 주변 거주자를 최소화하여 인명피해를 줄이고, 관련 재산피해를 줄이는 것을 목표로 한다.

5) 경사면에 철근을 설치하여 안정성을 높임

② 베네수엘라 바르가스(Vargas) 산사태⁶⁾

□ 개요

1999년 12월, 베네수엘라 바르가스 주에서는 역사상 최대 규모의 산사태가 발생하였다. 폭우로 인해 대규모 홍수가 발생했으며, 이와 동시에 산사태가 발생하여 며칠에 걸쳐 광범위한 피해가 발생하였다. 일반적으로 바르가스의 비극이라고 불리는 이 재해 발생은 대규모 인명 손실과 광범위한 재산 피해, 그리고 장기적인 사회·경제적 영향을 초래한 것으로 보고되었다.



[그림 1-7] 베네수엘라 바르가스 산사태 피해지역 전경

출처 : Larsen *et al.*, 2002. Natural hazards on alluvial fans: The Venezuela debris flow and flash flood disaster. U.S. Geological Survey Fact Sheet 103-01. USGS. p.2

□ 피해현황

바르가스 산사태를 포함한 전반적인 재난·재해에 의해 30,000명의 사망자가 발생하였으며, 총 약 20만 명이 넘는 피해자가 발생하였다. 많은 생존자들은 피난처, 음식, 기본 필수품 없이 남겨졌습니다. 전체적인 피해금액은 약 20억 달러 수준으로 집계되었으며, 현재까지 베네수엘라에서 가장 많은 사망자를 발생시킨 자연재난으로 기록되어있다.

6) Wiecezorek *et al.*, 2016. Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation. U.S. Geological Survey Open File Report 01-0144. USGS. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0144/>. 2024.06.16. 접속

많은 양의 건축물들이 산사태로 인한 토사에 의해 무너지거나 토사 아래에 묻혀 사용불가능한 상태가 되었다. 산사태로 인한 토사물이 빠르게 휩쓸었고, 전체 물량이 많아 강력한 위력을 지녀 건축 구조물들이 대부분 파괴되거나 일부 크고 작은 피해를 입었다. 또한, 학교, 병원 등 주요 공공건물이 손상되거나 파괴되어 필수 서비스 제공이 중단되었다. 의료 시설 파괴로 인해 부상자 치료가 더욱 어려워졌다. 뿐만 아니라 피해지역 및 인근지역의 도로, 교량, 공공시설을 포함한 중요 기반 시설이 심하게 손상되거나 완전히 파괴되었다. 주요 접근 경로가 전혀 이용불가능한 상태가 되어 구조 및 구호 활동에도 차질이 발생하였다.

산사태로 인해 바르가스 지역 및 산림 경관이 급격하게 변화하였다. 산림의 비탈면이 무너져 내렸고, 토사물이 강으로 흘러들어 강의 흐름이 변화하였으며, 넓은 범위에 토사가 쌓여 정상적인 활동이 불가능한 황무지로 변화하였다. 뿐만 아니라, 산사태 이후에도 산림 식생 손상으로 인해 토양침식이 지속적으로 발생하였다. 또한, 수질오염이 발생하여 해당지역 거주자들에게 2차적인 피해를 입혔다.



[그림 1-8] 바르가스 산사태에 의한 건축물 피해

출처 : Muñoz *et al.*, 2012. Risk Management at the Latin American Observatory. Risk Management – Current Issues and Challenges. doi:10.5772/50788. p.543

바르가스지역 산사태의 경우 홍수와 복합적으로 일어난 피해이기 때문에 명확하게 산사태 피해액이라고 보기는 어려우나, 전반적인 피해액은 수십억 달러 수준으로 추산되고 있다. 건축물과 기반 시설이 파괴되면서 지역 경제가 타격을 입었고 특히, 주민 생활에 심각한 타격을 입혔다. 정부는 임시대피소를 설치하고, 피해복구를 위한 막대한 비용을 투입하였다. 그러나, 인프라 손실로 인한 구호품 전달 및 구조팀 지원에 어려움이 있었고, 전반적인 도시 인프라 손실이 막대하여 해당 지역이 복구되기 위해 수년의 시간이 경과하였다.

□ 대응방안

산사태에 취약한 비탈면 안정화를 위해 옹벽과 같은 구조물을 건설하였다. 이 같은 구조물은 비탈면의 경사를 완만하게 조정하여 산사태 예방에 도움을 준다. 또한 산사태 이후 황폐화된 산림에 재조림 사업을 진행하였다. 특히 심근성 식물을 식재함으로써 토양안정화를 도모하였고, 표면의 토양 유출을 줄이도록 하는 등 산사태 방지 효과에 중점을 두어 추진되었다. 또 다른 산사태의 직접적인 원인인 물관리를 위해 지표수 및 지하배수 관리를 위한 작업을 수행하였다. 산지에 배수 시스템을 새롭게 구축함으로써 지표수 관리를 도모하였고, 수평 배수와 같은 지하 배수 시스템을 설치하여 지하수 수위를 관리하고 있다.

산사태 발생에 따른 피해를 최소화하기 위해 산사태 위험지역을 설정하고, 건축법 개정을 통해 건축기준을 강화하였다. 위험지역 설정의 경우 산사태 고위험 지역을 지정하고 이를 바탕으로 토지 이용 계획을 수정하였다.⁷⁾ 즉, 산사태 발생 가능성이 높거나, 산사태 피해위험이 있는 지역에 새로운 개발을 사전에 방지하도록 하였다. 건축 기준과 관련해서도 산사태 토석류의 영향을 받는 면적을 최소화하는 방안이 제안되었다(Larsen *et al.* 2002, p.2). 이에 더하여 안전 지역에 주택개발 사업을 수행하고, 고위험 지역에 거주하는 주민들의 경우 안전한 지역으로의 이주를 지원하였다.

또한, 산사태 발생을 예측하고 경보하기 위한 시스템을 개발하였다. 산사태 발생 가능성을 예측하기 위해 주변 산림의 지질조사를 수행하였으며, 산사태를 유발하는 주요 요인인 기상 모니터링 및 예측 시스템을 구축 및 연동하였다. 이를 바탕으로 실시간 기상 모니터링 및 기상관측과 예측에 기반한 산사태 경보 시스템을 구축하였다.

③ 인도 말린 산사태⁸⁾

□ 개요

말린 산사태는 인도 마하라슈트라주 푸네군 말린 마을에서 발생하였다. 2014년 7월 30일, 강한 폭우로 인해 산사태가 유발되었으며 많은 양의 토석류가 발생하여 큰 피해가 발생하였다.

7) Wicczorek *et al.*. 2016. Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0144/>. 2024.06.16. 접속

8) BBC. 2014. <https://www.bbc.com/news/world-asia-28559617>. 2024.06.16. 접속



[그림 1-9] 인도 말린 산사태 발생 사진

출처 : Petley, Dave. 2014. Malin landslide in Pune, India: a mass fatality mudslide yesterday. AGU Blogosphere. Jul 31. 2024.06.13. 접속

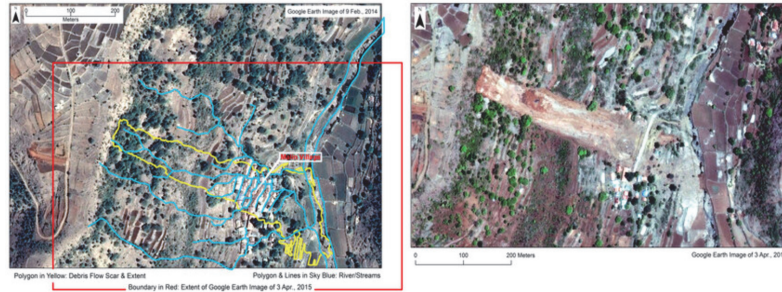
해당 재난으로 인해 경제적 손실 뿐 아니라 상당한 양의 인명피해가 발생하였으며, 건축물 및 인프라에도 많은 손상이 발생하였다. 특히 해당 산사태는 구릉지 농촌 지역에서 발생하였으며, 이 같은 지역이 산사태 등 자연재해에 취약하다는 점을 드러낸 사례가 되었다.

□ 피해현황⁹⁾

산사태로 인해 최소 151명이 목숨을 잃었다. 뿐만 아니라 많은 사람들이 잔해로 인해 부상을 입거나 잔해에 파묻혀 시신을 회수하지 못하는 등 실종신고 되는 경우가 빈번하게 발생하였다. 또한 약 55채의 건축물이 파괴되는 등 거주지의 상당 부분이 소실되었다. 당시 이 지역에는 약 200명이 거주하였으나, 산사태로 인해 마을의 대부분이 토석류에 휩쓸려 주민들의 생존을 위협하였다.

물질적 피해 측면에서 산사태는 주거용을 포함한 많은 건축물과 도시 인프라를 파괴하여 지역 전체를 황폐화시켰다. 악천후와 까다로운 지형으로 인해 구조 및 구호 활동이 저해되어 산사태 이후 대응 및 복구 작업이 지연되었다. 인도에서는 국가재난대응군과 기타 기관들이 구조 활동에 참여했으며, 생존자를 찾고 시신을 수습하기 위한 시도가 며칠 동안 계속되었으나 적체된 토사량과 잔해가 많아 성과를 거두기 힘든 수준이었다.

9) IANS. 2014. Maharashtra's worst landslide claims 82 lives, 130 still trapped. IN DIA TODAY. Aug 2. 2024.06.13. 접속



[그림 1-10] 인도 말린 산사태 전후 항공사진

출처 : Mishra *et al.*, 2017. Post-Disaster Investigation of the Malin Slope Failure Deccan Plateau, India. National Geographical Journal of India. *National geographical Society of India*. v.63 n.3. p.3

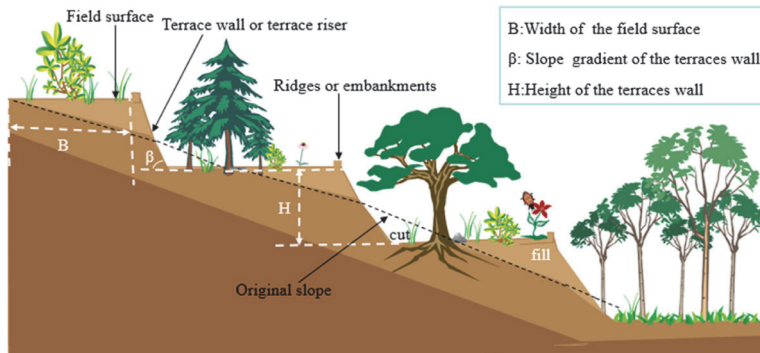
말린 지역 내의 거의 모든 건축물과 구조물이 파괴되었다. 산사태로 인해 집들이 붕괴되어 형체가 남지 않는 수준의 잔해가 되었으며, 대부분은 시설들이 1미터 이상 깊이의 진흙과 바위 아래로 묻혔다. 학교와 공공시설을 포함한 대부분의 기반 시설도 파괴되었다. 도로, 교량, 전력선 등 주요 기반 시설이 심하게 손상되거나 완전히 파괴되었다. 산사태로 인해 도로가 파괴됨으로써 피해지역 접근이 극도로 어려워졌으며, 구조 및 구호 활동을 지연시켰다.

농촌지역이었던 말린은 산사태 이후 주 생계수단인 농경지를 잃었다는 점에서 더욱 피해가 극심하다. 대부분의 농경지가 진흙과 잔해에 묻혀 사용할 수 없는 상태가 되었고, 이 지역의 많은 주민들이 오랜 기간 경제활동 수단을 잃어 간접적이지만 지속적인 경제적 타격을 입었다. 말린의 구릉 지형은 산사태로 인해 변화하였다. 식생 황폐화로 토양 침식 가능성이 증가하였으며, 배수패턴 또한 바뀌어 추가적인 산사태를 유발할 수 있는 상태가 되었다.

□ 대응방안¹⁰⁾

인도 말린 지역 또한 다른 산사태 대응방안과 마찬가지로 물리적 산사태 방지 인프라 강화를 수행하였다. 산림 내 불안정한 비탈면을 찾아 옹벽을 건설하고 토양 못 박기 등 사면안정화 시공을 진행하였다. 산사태 위험이 있는 비탈면의 경사도 개선 및 형태 개선을 위해 테라스 시공을 진행하였다. 이와 함께 물 관리 시스템을 개선하기 위한 배수시스템을 설치하였고 이를 통해 토양 강도가 유지되도록 하였다.

10) Ocean Global. 2023. The Ultimate Guide to Landslide Prevention: Tips and Techniques for a Secure Environment. Jul 7. 2024.06.13. 접속



[그림 1-11] 테라스 시공 예시

출처 : Deng *et al.*, 2021. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*. v.9 i.3. p.345.

물리적 대응방안과 함께 자연환경 개선을 통한 산사태 발생 방지 작업이 이어졌다. 조림사업을 통해 산사태로 사라진 식생을 복원함으로써 토양안정화를 도모하였다. 식생은 토양 내 수분흡수를 통해 산림 안정화에 기여하며 토양의 표면유출을 제한함으로써 산사태 방지에 기여한다.

④ 콜롬비아 모코아(Mocoa) 산사태¹¹⁾

□ 개요

2017년 3월 31일, 콜롬비아 푸투마요의 모코아 지역에 강력한 산사태가 발생하여 큰 피해가 발생하였다. 폭우로 인한 산사태로 300명 이상이 사망하고 넓은 범위의 건축물 및 도시기반시설이 파괴되었다.



[그림 1-12] 콜롬비아 모코아 산사태

출처 : NBC NEWS. 2017. Colombia Mourns Hundreds Killed in Mudslides. Apr 6. 2024.06. 16. 접속

11) BBC. 2017. <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-39510721>. 2024.06. 13. 접속

□ 피해현황¹²⁾

산사태로 인해 300명이 넘는 지역 주민들이 사망하였고, 실종자를 합하면 약 1,000명으로 추산하고 있다. 또한, 약 400여명의 부상자가 발생하였다. 산사태의 특성 상 발생 이후 탈출할 시간이 매우 촉박하였고, 이로 인해 사상자 수가 급증하였다. 지역 내 주거용 건축물을 포함한 많은 건축물과 인프라가 손상되었다. 수백 동의 건축물이 토사에 휩쓸리거나 문혀 손상되거나 이용할 수 없는 상태가 되었다. 직접적인 피해를 입지 않은 건축물의 경우에도 도로나 상수도 시스템 등 인프라가 손상되어 사용할 수 없는 상태가 되었다. 이에 따라 약 4,500명의 이재민이 발생하였다.

다른 많은 산사태와 같이 산림훼손 및 비탈면 붕괴에 의한 경관 및 환경파괴가 일어났다. 산사태 피해지역으로 접근하기 위한 도로의 파괴되어 구호물품 전달과 구조인력 지원을 지연시켰다. 또한, 산사태의 피해범위가 한 지역이 아닌 모코아 인근 17곳에서 발생하였다. 피해범위가 넓어 구조 및 복구를 위한 고려범위가 넓었고, 이에 따른 재정투입 및 소요시간이 증가되었다. 모코아 지역은 현재도 약 25,000명의 주민이 산사태 위험 지역 근처에서 생활하는 것으로 나타나 추가적인 문제발생 가능성 또한 제기되고 있다.¹³⁾

□ 대응방안

군, 경찰, 민방위, 소방서, 적십자 인사로 구성된 1,300명 이상의 구조인력이 파견되었다. 뿐만 아니라 구조 및 복구 작업을 위해 헬리콥터 10대, 비행기 6대, 보트 7대, 기타 차량 63대를 파견한 것으로 보고되었다.¹⁴⁾ 산사태로 거주지를 잃은 주민들을 위해 300동의 건축물을 제공하였으며, 다양한 방면에서 주민들의 재정착을 도운 것으로 보고되었다.¹⁵⁾ 다만, 산사태 이후 산사태 방지 방안에서는 산림 조림 및 배수관리 이상의 특별한 사항을 찾아보기는 어려웠다.

12) Zimmermann, María Lourdes.. 2017. A foreseen environmental disaster in Colombia?. MONGABAY. Apr 20. 2024.06.11. 접속

13) Moloney, Anastasia.. 2019. Danger still lingers two years after Colombia's deadly Mocoa landslide. Reuters. Mar 31. 2024.06.14. 접속

14) Zimmermann, María Lourdes.. 2017. A foreseen environmental disaster in Colombia?. MONGABAY. Apr 20. 2024.06.11. 접속

15) PreventionWeb. 2019. Danger still lingers two years after Colombia's deadly Mocoa landslide. Mar 31. 2024.06.13. 접속



[그림 1-13] 모코아 산사태 피해복구 현장

출처 : (좌) Lehmann *et al.*. 2018. How Landslides Become Disasters. EOS. Aug 27, 2024. 06.16. 접속; (우) ZD. 2017. UN reports over 250 people dead in Colombian landslides. XINHUANET. Apr 4, 2024. 06.16. 접속

⑤ 중국 저우취현(Zhouqu county) 산사태¹⁶⁾

□ 개요

2010년 8월 8일, 중국 간쑤성 저우취현에서 집중호우로 인한 산사태가 발생하였다. 민산 산맥의 가파른 경사면에서 발생한 산사태는 도시를 관통하여 백룡강 지역에 심각한 피해를 야기하였다.

□ 피해현황

저우취현 산사태로 인해 최소 약 1,500명의 사망자와 약 250명의 실종자가 발생하였다.¹⁷⁾ 진흙과 잔해에 묻혀 건축물, 도로, 공공시설 등 도시의 많은 부분이 심각하게 피해를 입었다. 산사태의 주요 원인으로는 산림 벌채가 지목되고 있으며, 폭우로 인근 강의 댐이 무너지면서 산사태를 발생시켰다. 이때 발생한 산사태로 약 180만 입방미터의 토사가 인근 지역을 덮쳤고, 최대 5층 높이의 건축물까지 타격을 입은 것으로 보고되었다.

16) BBC. 2010. <https://www.bbc.com/news/world-asia-pacific-10905399>. 2024. 06.11. 접속

17) Xiang, Zhang. 2010. Reliefweb. <https://reliefweb.int/report/china/china-steps-disaster-prevention-work-zhouqu-after-massive-landslide>. 2024.06.12. 접속



[그림 1-14] 중국 저우취현 산사태

출처 : Earth Observatory. 2010. Landslide in Zhouqu, China. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/45329/landslide-in-zhouqu-china>. 2024.06.16. 접속

총 300동 이상의 저층 건축물이 모두 토사에 매몰되는 등 한 마을이 모두 토사에 매몰되는 규모의 산사태 피해를 입었다. 매몰된 건축물 중에는 저우취현의 병원을 포함하여 학교, 상수도 시스템 등 주요 인프라가 포함되어있어 대부분의 도시 기능이 마비되었다. 이로 인해 총 4만 5천여명의 거주자가 대피하였으며, 많은 물량의 토사가 방해하여 구조작업에 어려움이 있었다.¹⁸⁾

□ 대응방안¹⁹⁾

저우취현 산사태 피해복구 비용으로는 약 1조 원 정도(약 50억 위안)가 투입되었으며 총 170여개의 재건축 프로젝트를 수행하였다. 이외에도 산사태 예방을 위한 산림 재조림 및 도시 재건축을 진행하는 것으로 알려져 있다.

2) 국내 산사태 발생 현황 및 대응 사례

① 국내 산사태 발생이력

우리나라는 2019년부터 2023년까지 최근 5년간 약 4,600건의 산사태가 발생한 것으로 파악되고 있다.²⁰⁾ 발생한 산사태 총 면적은 2,312ha에 이르며, 사망자는

18) Li, Liu.. 2010. UNICEF sending medical supplies to landslide-hit Zhouqu County. UNICEF. Aug 20. 2024.06.11. 접속

19) Lina, Yang. 2011. NW China's Zhouqu mourns victims, steps up reconstruction one year after devastating mudslide. reliefweb. Aug 8. 2024.06.10. 접속

2019년 3명, 2020년 9명, 2023년 13명으로 집계되고 있다. 또한, 2016년부터 2023년까지 집계된 산사태 피해액은 총 6천8백억원 수준에 이르는 것으로 집계되었다.²¹⁾

[표 1-2] 최근 5년간 산사태 발생 이력

	2019	2020	2021	2022	2023
산사태 복구비(백만원)	53,428	393,463	14,999	82,110	142,822
산사태(ha)	156	1,343	27	327	459

출처 : e-나라지표. 산사태피해현황. https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1311. 2024.06.13. 접속. 으로부터 재편집

지역별로는 경상북도가 약 1,100건으로 가장 많은 산사태가 발생했으며, 충청북도가 약 700건, 강원도가 약 600건 순으로 산사태가 많이 발생하였다. 서울특별시의 경우 5년간 총 27건의 산사태가 발생한 것으로 조사되었으며, 주요 발생지역은 서초구, 동작구, 금천구 등으로 나타났다. 최근 5년간 서울시에서 발생한 가장 큰 산사태는 2022년에 원지동 산사태로 약 2.8ha규모이다.

[표 1-3] 최근 5년간 지역별 산사태 발생 횟수

지역	발생횟수	지역	발생횟수
강원도	620	서울특별시	27
강원특별자치도	64	세종특별자치시	17
경기도	402	울산광역시	8
경상남도	297	인천광역시	1
경상북도	1,134	전라남도	236
광주광역시	38	전라북도	501
대구광역시	11	제주시	1
대전광역시	20	충청남도	490
부산광역시	50	충청북도	699

출처 : 공공데이터포털. 산림청_최근 5년간 전국 산사태 발생 이력. <https://www.data.go.kr/data/15125006/fileData.do>. 2024.06.13. 접속. 으로부터 재편집

최근 5년간 발생한 가장 큰 규모의 산사태는 2020년 전라북도 남원시에서 발생한 산사태로 피해물량이 약 20ha에 이른다. 이때 산사태로 인한 주택 파손으로 20여명의 주민이 대피하였다. 남원시의 산사태는 2020년 8월 7일부터 내린 약 300mm의 폭우가 야기한 것으로 보고되었다.²²⁾

20) 공공데이터포털. 산림청_최근 5년간 전국 산사태 발생 이력. <https://www.data.go.kr/data/15125006/fileData.do>. 2024.06.13. 접속. 으로부터 재편집

21) e-나라지표. 산사태피해현황. https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1311. 2024.06.13. 접속



[그림 1-15] 전라북도 남원시 산사태

출처 : 임채두. 2020. 남원 산동면 산사태로 주민 20여명 대피…인명피해 확인 중. 연합뉴스. 8월 8일 기사. 2024. 06. 13. 접속

두 번째로 큰 규모의 산사태는 2023년 경상북도 예천군에서 발생한 산사태로, 피해물량 약 12ha규모이다. 해상 산사태는 2023년 7월 13일부터 이어진 폭우로 인해 발생하였으며 주민 7명이 사망하고 4명이 실종되는 등 국내에서 발생한 산사태 중 피해가 큰 편에 속한다. 뿐만 아니라 경상북도 예천군의 경우 정부가 관리하는 ‘산사태 취약 지역’에 속하지 않는 지역으로, 지자체가 미리 대비하기 어려웠다는 문제점이 지적되고 있다.²³⁾



[그림 1-16] 경상북도 예천군 산사태 현장

출처 : 김규현. 2023. ‘예천 산사태’ 경북 북부 폭우 피해액 2,946억원 잠정 집계. 한겨레. 8월 10일 기사 2024.06.16. 접속

세 번째로 큰 규모의 산사태는 충청북도 제천시에서 발생한 산사태로 기록되어 있다. 2020년 8월 금성면 산림에서 발생한 산사태는 11ha 규모를 기록하였다. 산사태로 인해 토사가 마을 진입로를 덮어 통행이 불가능해졌으며, 인근 캠핑장에서 산사태가 발생하여 1명이 사망하는 피해를 입었다.

22) 임채두. 2020. 남원 산동면 산사태로 주민 20여명 대피…인명피해 확인 중. 연합뉴스. 8월 8일 기사. 2024. 06. 13. 접속

23) 민경환. 2023. ‘예천 산사태’ 정부 지정 취약지역 66곳 전부 비껴갔다. 세이프타임즈. 7월 18일 기사. 2024.06.10. 접속

② 산사태 관련 법제 현황

□ 산사태 발생 관련 법제 현황

산사태 발생과 직접적으로 관계가 있는 법률로는 「급경사지 재해예방에 관한 법률」, 「사방사업법」, 「산림기본법」, 「산림보호법」, 「산지관리법」, 「자연재해대책법」, 「재난 및 안전관리 기본법」 등 총 7개 법률이 있다. 이중에서 전반적인 재난·재해를 다루는 「자연재해대책법」과 「재난 및 안전관리 기본법」을 제외한 5개 법률이 산사태를 더 중점적으로 다루고 있다.

산사태에 대한 정의는 「사방사업법」 제2조(정의) 제5호에서 “자연적 또는 인위적인 원인으로 산지가 일시에 붕괴되는 것”으로 정의하고 있다. 또한 「사방사업법」은 제3조의2(사방사업 기본계획 등)을 통해 산사태 예방을 위한 사방사업 기본계획을 수립하도록 하며, 산사태 위험지역 확인을 위해 제3조의3(황폐지 실태에 대한 조사)를 통해 황폐지를 조사하도록 명시하였다. 「사방사업법」에는 제4조(사방지의 지정) 및 제20조(사방지의 지정해제 등)을 통해 사방사업 대상지를 지정하거나 해제할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 「사방사업법」은 사방시설의 안전진단이나 관리, 데이터베이스 구축, 사방기술 개발 등에 관한 사항을 명시하고 있다.

사방사업법

제2조(정의) 이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. (생략)
2. “사방사업”이란 황폐지를 복구하거나 산지의 붕괴, 토석·나무 등의 유출 또는 모래의 날림 등을 방지 또는 예방하기 위하여 인공구조물을 설치하거나 식물을 파종·식재하는 사업 또는 이에 부수되는 경관의 조성이나 수원의 함양을 위한 사업을 말한다.
- 3.~4.(생략)
5. “산사태”란 자연적 또는 인위적인 원인으로 산지가 일시에 붕괴되는 것을 말한다.
6. “토석류”(土石流)란 산지 또는 계곡에서 토석·나무 등이 물과 섞여 빠른 속도로 유출되는 것을 말한다.

제3조의3(황폐지 실태에 대한 조사) ① 산림청장은 사방사업의 효율적 추진을 위하여 황폐지의 실태에 대한 기초조사를 5년마다 실시하고 그 결과를 기본계획에 반영하여야 한다.

② 산림청장은 제1항에 따른 기초조사 결과 집중호우 등으로 인하여 지형의 변화, 생태계 또는 생활권에 피해가 발생할 우려가 있는 지역에 대하여는 정밀조사를 할 수 있다.

(생략)

출처 : 사방사업법. 법률 제19117호. 2022.12.27.. 타법개정

「산림보호법」은 제2조(정의)에서 「사방사업법」 제2조(정의) 제5호를 인용하여 산사태에 대해 정의하고 있다. 또한 제45조의3(산사태예방연도별대책의 수립·시행)을 통해 전국 산사태예방장기대책 수립을 명시하고 있으며, 제45조의4(산사태예방지원본부의 설치·운영)을 통해 산사태예방지원본부의 설치 및 운영 근거를 제공하고 있다. 이뿐만 아니라 「산림보호법」은 산사태정보체계의 운영, 산사태 위기경보 발령, 산사태 발생지 복구 등 산사태 예방 및 대응을 위한 대책 마련 근거를 제공한다.

산림보호법

제45조의4(산사태예방지원본부의 설치·운영) ① 산림청장은 「재난 및 안전관리 기본법」 제14조에 따른 중앙재난안전대책본부에서 정하는 여름철 재해대책기간 동안 전국산사태예방연도별대책의 체계적 추진과 산사태 발생 위험 정보의 수집·전파, 신속한 대응 및 상황관리 등을 위하여 산림청장 소속으로 산사태예방지원본부를 설치·운영하여야 한다.

② 산사태예방지원본부의 장은 산림청장이 된다.

③ 산사태예방지원본부의 운영 또는 그 밖에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

출처 : 산림보호법. 법률 제20309호. 2024.2.13.. 타법개정

「급경사지 재해예방에 관한 법률」은 일견 산사태만을 대상으로 하는 법류처럼 보이나, 산림이 아닌 모든 급경사지를 포함하는 지역의 재해예방을 다룬다. 법률 제2조(정의)의 제1호에서 명시한 것처럼 해당 법률에서 급경사지란 “택지·도로·철도 및 공원시설 등에 부속된 자연 비탈면, 인공 비탈면(옹벽 및 축대 등을 포함한다. 이하 같다) 또는 이와 접한 산지”로, 산지가 일부 포함되어 산사태를 포함하는 것으로 볼 수 있다. 「급경사지 재해예방에 관한 법률」은 제5조(급경사지에 대한 안전점검)에 근거하여 급경사지 안전점검을 실시하며, 제6조(붕괴위험지역의 지정 등)에 근거하여 위험지역을 지정하고 관리할 수 있는 기반을 마련하고 있다. 뿐만 아니라 붕괴위험지역 정비 중기계획 수립, 정보체계 구축 등에 대해 명시하고 있다.

급경사지 재해예방에 관한 법률

제5조(급경사지에 대한 안전점검) ① 관리기관은 소관 급경사지에 대하여 연 2회 이상 안전점검을 실시하고, 특별자치시장·시장(「제주특별자치도 설치 및 국제자유도시 조성을 위한 특별법」 제11조제1항에 따른 행정시장을 포함한다. 이하 같다)·군수 또는 구청장(구청장은 자치구의 구청장을 말한다. 이하 같다)에게 그 결과를 통보하여야 한다.

② 관리기관은 제1항에 따른 안전점검 결과를 해당 관리기관의 인터넷 홈페이지를 통하여 공개하여야 한다.

③ 제2항에 따라 공개하는 안전점검 결과의 범위, 공개 기간, 그 밖에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

- ④ 특별자치시장·시장·군수 또는 구청장(이하 “시장·군수·구청장”이라 한다)은 관할 구역 안에 있는 급경사지에 대하여 연 1회 이상 안전점검을 실시하되, 제1항에 따른 결과통보를 받아 붕괴 위험성이 없다고 판단하는 급경사지에 대하여는 안전점검을 생략할 수 있다.
- ⑤ 시장·군수·구청장은 제4항에 따른 안전점검의 효율성을 높이기 위하여 필요한 경우 관계 기관 및 전문가와 합동하여 안전점검을 실시할 수 있다.
- ⑥ 시장·군수·구청장은 제4항 및 제5항에 따른 점검결과를 해당 관리기관 및 해당 토지의 소유자·점유자 또는 관리인(이하 “관계인”이라 한다)에게 통보하여 안전에 필요한 조치를 취하도록 하여야 한다.

제6조(붕괴위험지역의 지정 등) ① 관리기관은 소관 급경사지에 대하여 제5조에 따른 안전점검을 실시하여 붕괴위험지역으로 지정할 필요가 있는 때에는 재해위험도평가와 주민의견 수렴절차를 거쳐 그 지역을 관할하고 있는 시장·군수·구청장에게 붕괴위험지역의 지정을 요청하고, 그 요청을 받은 시장·군수·구청장은 특별한 사유가 없는 한 즉시 이를 지정·고시하여야 한다. 이를 변경하는 때에도 또한 같다.

(생략)

출처 : 급경사지 재해예방에 관한 법률. 법률 제19117호. 2022.12.27.. 타법개정

「산림기본법」은 제11조(산림기본계획의 수립·시행)를 통해 산사태 대응 및 복구 등에 관한 사항을 산림기본계획에 포함시키고 시행하도록 명시하고 있다. 또한 제15조(산림재해에 관한 시책)을 통해 산사태 등 산림재해 예방·복구에 관한 시책을 수립하고 시행하도록 명시하고 있다.

산림기본법

제11조(산림기본계획의 수립·시행) ①산림청장은 제10조제1항에 따른 장기전망을 기초로 하여 지속가능한 산림경영이 이루어지도록 전국의 산림을 대상으로 다음 각 호의 사항이 포함된 산림기본계획을 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 수립·시행하여야 한다. 이 경우 산림기본계획을 수립할 때에는 제11조의2제1항에 따른 산림정책협의회(이하 이 조에서 “협의회”라 한다)의 의견을 들어야 한다.

1. ~4. (생략)
 5. 산사태·산불·산림병해충 등 산림재해의 대응 및 복구 등에 관한 사항
- (생략)

출처 : 산림기본법. 법률 제19803호. 2023.10.31.. 일부개정

「산지관리법」에서는 주로 산사태 발생가능 지역을 조사 및 점검하거나, 산사태 발생가능성이 높은 지역에 대한 이용을 제한하고 있다. 「산지관리법」 제37조(재해의 방지 등)에서는 산사태 발생을 방지하기 위해 “토사유출, 산사태 또는 인근 지역의 피해 등 재해 방지나 산지경관 유지 등에 필요한 조사·점검·검사 등”을 할 수 있도록 명시하였다. 또한 제9조(산지전용·일시사용제한지역의 지정) 제1항 제3호를 통해 ‘산사태 등 재해 발생이 특히 우려되는 산지로서 대통령령으로 정하는 산지’는 산지전용 또는 산지 일시사용이 제한되는 지역으로 지정할 수 있도록 하였다.

산지관리법

제37조(재해의 방지 등) ① 산림청장등은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 허가 등에 따라 산지전용, 산지일시사용, 토석채취 또는 복구를 하고 있는 산지에 대하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 토사유출, 산사태 또는 인근지역의 피해 등 재해 방지나 산지경관 유지 등에 필요한 조사·점검·검사 등을 할 수 있다.

출처 : 산지관리법. 법률 제19590호. 2023.8.8.. 타법개정

□ 산사태 대응 관련 법제 현황

산사태 대응과 관련되어있거나, 산사태와 간접적으로 관계가 있는 법률을 살펴보면 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」, 「농업·농촌 및 식품산업 기본법」, 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률」, 「민간인 통제선 이북지역의 산지관리에 관한 특별법」, 「임업·산림 공익기능 증진을 위한 직접지불제도 운영에 관한 법률」, 「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률」, 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」, 「풍수해·지진재해보험법」의 총 8개 법률이 있다. 이 중 주요 관계법으로는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」, 「농업·농촌 및 식품산업 기본법」, 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률」, 「풍수해·지진재해보험법」 등 4개 법률로 압축할 수 있다.

「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에서는 제37조(용도지구의 지정)을 통해 산사태 예방 수단을 제시하고 있다. 제37조제1항제2호에 명시된 “풍수해, 산사태, 지반의 붕괴, 그 밖의 재해를 예방하기 위하여 필요한 지구”인 방재지구를 통해 산사태 발생을 예방하기 위한 수단을 제시한다. 특히, 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행령」 제75조(방재지구안에서의 건축제한)을 통해 산사태 및 관련 재해 예방을 저해하는 건축물을 건축할 수 없도록 지정함으로써 산사태를 예방할 수 있도록 하고 있다.

국토의 계획 및 이용에 관한 법률

제37조(용도지구의 지정) ① 국토교통부장관, 시·도지사 또는 대도시 시장은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 용도지구의 지정 또는 변경을 도시·군관리계획으로 결정한다.

1. ~3. (생략)

4. 방재지구: 풍수해, 산사태, 지반의 붕괴, 그 밖의 재해를 예방하기 위하여 필요한 지구 (생략)

출처 : 국토의 계획 및 이용에 관한 법률. 법률 제19590호. 2023.8.8.. 타법개정

국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행령

제75조(방재지구안에서의 건축제한) 방재지구안에서는 풍수해·산사태·지반붕괴·지진 그 밖에 재해예방에 장애가 된다고 인정하여 도시·군계획조례가 정하는 건축물을 건축할 수 없다. 다만, 특별시장·광역시장·특별자치시장·특별자치도지사·시장 또는 군수가 지구의 지정목적에 위배되지 아니하는 범위안에서 도시·군계획조례가 정하는 기준에 적합하다고 인정하여 당해 지방자치단체에 설치된 도시계획위원회의 심의를 거친 경우에는 그러하지 아니하다.

출처 : 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행령. 대통령령 제34531호. 2024.5.28.. 일부개정

「농업·농촌 및 식품산업 기본법」은 기후변화에 따른 농업 및 농촌 영향과 취약성 평가에 산사태 관련 내용을 일부 포함하고 있다. 제47조의2(기후변화에 따른 농업·농촌 영향 및 취약성 평가)를 통해 농업 및 농촌의 기후변화 영향 및 취약성 평가를 하도록 하며, 「농업·농촌 및 식품산업 기본법 시행규칙」 제5조제1항제2호라목을 통해 산사태와 관련된 내용이 포함되도록 하고 있다.

농업·농촌 및 식품산업 기본법

제47조의2(기후변화에 따른 농업·농촌 영향 및 취약성 평가) ① 농림축산식품부장관은 농업·농촌의 지속가능한 발전을 위하여 지구온난화 등 기후변화가 농업·농촌에 미치는 영향과 기후변화에 따른 취약성을 5년마다 조사·평가(이하 “기후영향평가등”이라 한다)하여 그 결과를 공표하고 정책수립의 기초자료로 활용하여야 한다.

② 농림축산식품부장관은 기후영향평가등에 필요한 기초자료 확보 및 통계의 작성을 위하여 실태조사를 실시할 수 있다.

③ 농림축산식품부장관은 관계 중앙행정기관의 장, 지방자치단체의 장 및 농업·농촌 관련 기관이나 단체의 장에게 기후영향평가등에 필요한 자료의 제공 또는 제2항에 따른 실태조사의 협조를 요청할 수 있다. 이 경우 자료제공 또는 실태조사 협조를 요청받은 관계 중앙행정기관의 장 등은 특별한 사유가 없으면 이에 협조하여야 한다.

④ 기후영향평가등과 실태조사의 구체적인 내용 및 방법 등에 필요한 사항은 농림축산식품부령으로 정한다.

⑤ 농림축산식품부장관은 제1항부터 제3항까지에 따른 정책을 효율적으로 추진하기 위하여 기후영향평가등 관련 사항에 관한 권한 또는 업무를 대통령령으로 정하는 자에게 위임 또는 위탁할 수 있다.

출처 : 농업·농촌 및 식품산업 기본법. 법률 제19750호. 2023.10.24.. 일부개정

농업·농촌 및 식품산업 기본법 시행규칙

제5조(기후변화에 따른 농업·농촌 영향 및 취약성 평가 등의 내용 및 방법 등) ① 법 제47조의2 제1항에 따른 지구온난화 등 기후변화가 농업·농촌에 미치는 영향과 기후변화에 따른 취약성에 대한 조사·평가(이하 “기후영향평가등”이라 한다)는 분야별로 다음 각 호의 내용이 포함되어야 한다.

1. (생략)
2. 임업 분야
가.~다. (생략)
라. 산불, 산사태 및 산림병해충 발생에 관한 사항

출처 : 농업·농촌 및 식품산업 기본법 시행규칙. 농림축산식품부령 제685호. 2024.10.21.. 일부 개정

「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률」은 산사태를 방지하기 위한 “재해방지형 도시숲”에 대한 내용을 다루고 있다. 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률」 제6조(도시숲등 조성·관리계획의 수립 등)에 따른 도시숲등 조성·관리계획에는 동법 시행령에 따른 도시숲등의 기능구분에 관한 사항이 포함되어야 하며, 도시숲등의 기능은 동법 시행규칙 제3조(도시숲등의 기능 구분)에서 정의하고 있다. 재해방지형 도시숲은 시행규칙 제3조에서 정의되어 있다.

도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률

제6조(도시숲등 조성·관리계획의 수립 등) ① 지방자치단체의 장은 기본계획에 따라 10년마다 관할 지역에 대한 도시숲등 조성·관리계획(이하 “조성·관리계획”이라 한다)을 수립·시행하여야 한다. 다만, 지방자치단체의 장 중 도지사, 구청장 및 광역시의 군수의 경우에는 수립·시행하지 아니할 수 있다.

(생략)

출처 : 도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률. 법률 제19879호. 2024.1.2.. 일부개정

도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행령

제4조(도시숲등 조성·관리계획의 수립 등) ① 법 제6조제1항 본문에 따른 도시숲등 조성·관리계획(이하 “도시숲등조성·관리계획”이라 한다)에는 다음 각 호에 관한 사항이 포함되어야 한다.

1. 기본목표 및 추진방향
2. 도시숲등의 기능 구분

출처 : 도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행령. 대통령령 제31739호. 2021.6.8.. 제정

도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙

제3조(도시숲등의 기능 구분) ① 「도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행령」(이하 “령”이라 한다) 제4조제1항제2호에 따른 도시숲등의 기능 구분은 다음 각 호와 같다.

1.~2. (생략)

3. 재해방지형 도시숲등: 홍수·산사태 등 자연재해를 방지하거나 소음·매연 등 공해를 완화하여 국민의 안전을 지키는 기능을 가진 도시숲등
(생략)

출처 : 도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙. 농림축산식품부령 제672호. 2024. 7.24.. 일부개정

「풍수해·지진재해보험법」은 산사태 예방 수단에 대해 명시한 타 관계법과는 달리 산사태 발생 이후 대응방안에 대한 내용을 다루고 있다. 「풍수해·지진재해보험법」은 풍수해 또는 지진재해로 발생하는 재산 피해에 따른 손해를 신속하고 공정하게 보상하는 것을 목표로 하며 제23조(보험가입의 촉진 등)제2항제2호에 따라 산사태취약지역에 대한 풍수해·지진재해보험 가입을 촉진하여야 한다. 즉, 산사태 발생에 따른 빠르고, 공정한 피해복구를 위한 보험가입 촉진을 명시하고 있다.

풍수해·지진재해보험법

제23조(보험가입의 촉진 등) ① 국가나 지방자치단체는 풍수해·지진재해보험의 가입을 촉진하고 자율적인 방재(防災) 의식을 복돋우기 위하여 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자에게 동의를 받아 대통령령으로 정하는 기간에 풍수해·지진재해보험을 가입·유지하게 할 수 있다.

1. 대통령령으로 정하는 자금을 대출받거나 지원받는 자
2. 재난복구사업을 위하여 「재난 및 안전 관리기본법」 제66조에 따른 국고나 지방비의 지원을 받는 자

② 국가나 지방자치단체는 다음 각 호의 지역에 대하여 풍수해·지진재해보험의 가입을 촉진하기 위한 추진계획을 매년 수립·시행하여야 한다.

1. 「급경사지 재해예방에 관한 법률」 제6조에 따라 지정된 붕괴위험지역
2. 「산림보호법」 제45조의8에 따라 지정된 산사태취약지역
3. 「자연재해대책법」 제25조의3 및 제26조의2에 따라 각각 지정된 해일위험지구 및 상습설해지역
4. 그 밖에 「자연재해대책법」 제12조에 따라 지정된 자연재해위험개선지구 등 풍수해·지진재해로 인한 재난피해 발생 위험이 크다고 인정되는 지역

출처 : 풍수해·지진재해보험법. 법률 제20275호. 2024.2.13.. 일부개정

3) 시사점

□ 해외 산사태 대응 사례

우리나라 뿐 아니라 해외 여러 국가들에서도 산사태에 대해 주의를 기울이고 있다. 피해규모나 피해금액이 큰 산사태가 세계적으로도 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 몇몇 산사태 사례는 우리나라에서 찾아보기 힘들 정도의 대규모 피해를 발생시키고 있다. 이에 따른 해외 국가의 산사태 대응방식은 크게 세 가지로 분류할 수 있다.

첫째, 산사태 피해지역 및 피해주민을 지원하는 것이다. 다른 모든 재난·재해와 마찬가지로 산사태 또한 피해지역 복구를 최우선으로 진행하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 화재 및 홍수와 같은 재난·재해와 달리 산사태 발생에 따른 복구작업은 피해지역을 복구하여 다시 이용하는 경우와 이주시키는 경우로 구분된다. 피해지역을 다시 이용하는 경우 주변 산림에 산사태 발생 방지 조치를 하여 향후 피해발생에 대비한다.

둘째, 산사태 발생 자체를 방지하는 것이다. 대부분의 사례는 산사태 발생 이후 해당 지역 산림에 산사태 방지 작업을 추진하고 있다. 옹벽, 테라스 등 시설물을 설치함으로써 산사태의 발생 가능성 자체를 방지하고자 한다. 이는 우리나라에서 나타나는 사방사업과 궤를 같이하는 것이며, 모든 국가들에서 공통적으로 수행하는 작업이다. 또한, 산사태 발생을 미리 예측하거나 파악할 수 있도록 산사태 모니터링 시스템을 구축하는 국가도 다수 발견되고 있다.

셋째, 산사태가 발생하여도 피해를 최소화하는 것이다. 도시계획을 통해 산사태 발생이 예상되는 지역 인근에는 건축물을 건설할 수 없도록 하거나, 산림으로부터 일정거리 이상 이격하도록 하고 있다. 이는 대부분의 사례에서 발견된 점이나, 베네수엘라 바르가스 산사태 대응 사례에서처럼 건물의 건축 시 산사태 피해를 받는 면적을 최소화하는 방안도 제시되고 있다.

□ 국내 산사태 발생 및 관계법 현황

국내에서는 최근 5년간 약 4,600건의 크고 작은 산사태가 발생하고 있으며, 사망자 총 25명, 피해액 약 6,800억 원 수준으로 집계되고 있다. 해외 대규모 산사태 사례와 비교할 때 개별 산사태의 피해규모는 작으나, 산사태 발생 횟수는 적지 않은 것으로 판단된다. 또한, 산사태 발생지역 인근 거주자에게 피해를 미치는 경우도 발생하고 있어, 산사태에 대한 효율적 대응전략 마련이 필요하다.

산사태에 대응하기 위한 국내 관계법은 산사태 발생과 관련하여 7개, 산사태의 대응 및 간접적 관계가 있는 8개 법률을 확인하였다. 산사태 발생과 직접적으로 관계가 있는 법률은 산림과 관련된 법과 재난 및 재해와 관련된 법으로 구분할 수 있다. 산사태 발생과 직접적으로 관계가 있는 법률은 산사태 발생 방지를 위해 산사태 대응계획 수립, 사방사업, 모니터링, 안전점검, 정보체계 구축 등 다양한 대응책을 제시하고 있다.

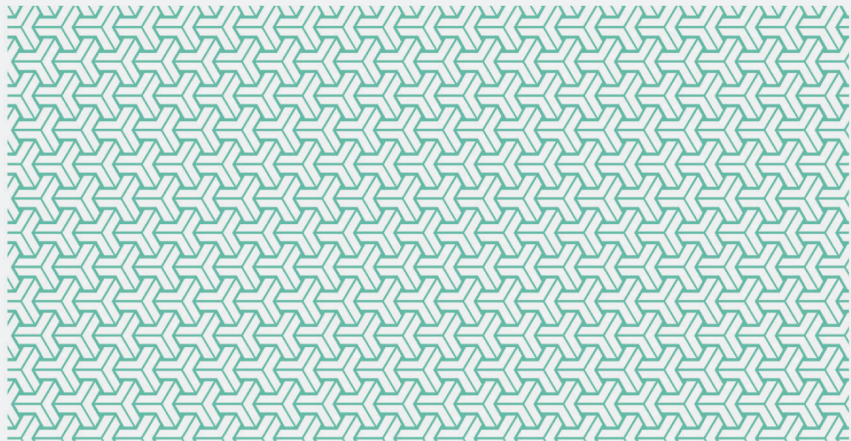
산사태의 대응 및 간접적 관계가 있는 법률은 산사태 피해를 방지하기 위한 수단보다는 산사태 발생을 방지하기 위한 규제가 대부분이다. 산사태 발생 시 피해 최소화를 위한 규정이 있었을 것으로 판단하였던 방재지구지정 제도의 경우에도 산사태와 같은 재해 예방을 위한 특정 건축행위 불가를 명시할 뿐 산사태 발생 시 피해저감을 다루지는 않고 있다. 국내 관계법 또한 해외 사례와 같이 산사태 위험 지역에서의 개발 금지하고, 산사태 발생 가능 지역에서의 건축 가이드라인을 제시할 필요가 있는 것으로 판단된다.

□ 산사태 피해 대응 필요성

우리나라 뿐 아니라 해외 여러 국가들에서도 산사태에 대해 주의를 기울이고 있다. 피해규모나 피해금액이 큰 산사태가 세계적으로도 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 몇몇 산사태 사례는 우리나라에서 찾아보기 힘들 정도의 대규모 피해를 발생시키고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 건축물 산사태 리스크 분석 모델을 개발하여 기존 건축물 홍수 및 화재 리스크 분석 모델과 연계하고자 한다.

제2장 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 방향

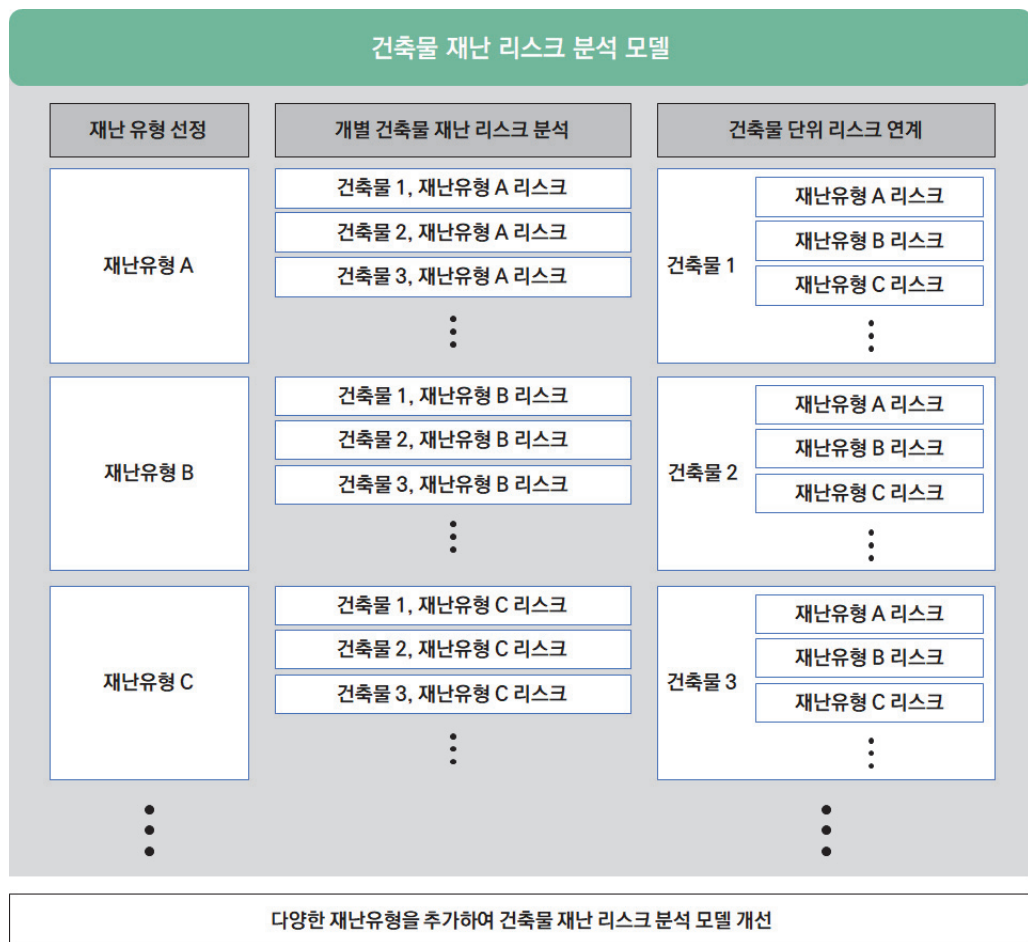


1. 모델 개발 방향 검토
2. 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델
3. 모델 개발 방향

1. 모델 개발 방향 검토

1) 건축물 리스크 분석 모델 개념

건축물 재난 리스크 분석 모델은 다양한 재난 유형에 대응할 수 있도록 하며, 개별 재난 유형에 대하여 리스크 분석을 수행한 후 건축물단위로 연계하고자 한다. 건축물의 리스크는 재난유형별로 다르다. 동일한 건축물이라도 화재에는 안전하나 침수피해에는 취약할 수 있으며, 반대의 경우도 가능하다. 이에 본 연구는 개별 재난유형에 대한 건축물의 리스크를 산정하고, 다양한 리스크를 건축물 단위로 연계하는 형태의 모델을 개발하고자 한다.



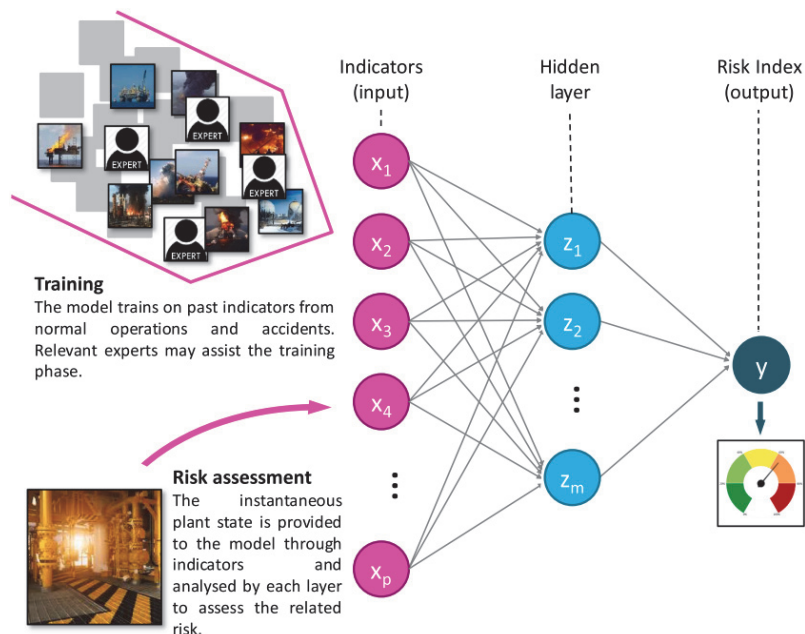
[그림 2-1] 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 개념

출처 : 연구진 작성

재난유형별 리스크분석은 건축물 데이터, 공공데이터, 재난·재해 발생 데이터, 머신러닝 및 딥러닝을 활용하고자 한다. 즉, 재난별 건축물 리스크 분석 모델을 개발하여 건축물 재난 리스크 분석 모델의 세부 모듈로서 사용하고자 한다. 서로 다른 재난유형별 리스크분석 모델은 동일한 모델을 사용하지는 않으며, 재난유형 및 입력 데이터에 따라 리스크 분석 정확도를 높일 수 있는 모델을 선정하여 사용하고자 한다.

머신러닝이나 딥러닝을 이용한 리스크 분석은 일반적으로 모델 학습을 위한 트레이닝 데이터가 필요하다. 트레이닝 데이터로는 재난으로부터 피해가 발생 유무에 대한 데이터가 필요하다. 특히 재난 리스크 분석에서는 피해가 발생 사례가 많지 않거나 필요한 데이터가 부족한 경우가 많아 피해 발생과 관련된 데이터가 필수적이다.

피해가 발생하는데 영향을 미치는 다양한 독립변수들이 모델의 학습 및 리스크 분석에 활용된다. 개별 모델은 또한 정확도 개선을 위해 전문가들이 모델 학습 과정에 참여하여 정확도를 높이고 정확도 검증을 수행한다. 학습된 모델은 충분한 정확도를 확보한 경우 리스크 분석을 위해 사용하며, 모델 학습에 사용하였던 독립변수를 입력하여 최종 리스크를 도출한다.



[그림 2-2] 리스크 분석을 위한 딥러닝 적용 개념도

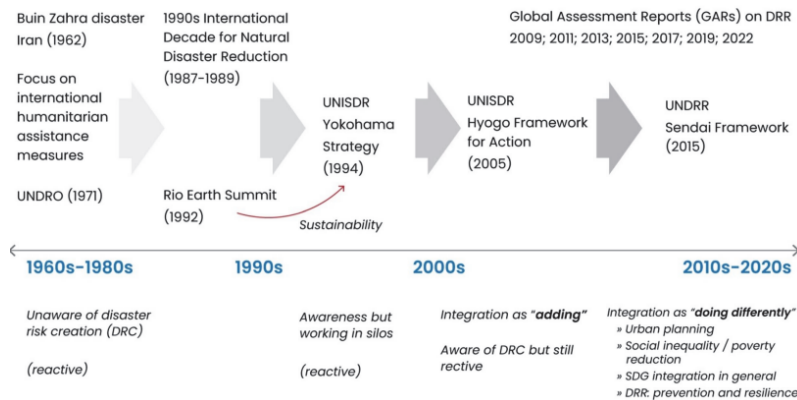
출처 : Paltrinieri *et al.*, 2019. Learning about risk: Machine learning for risk assessment. Safety Science. v.118. p.480

2) 리스크 연계 방안

□ 리스크 연계 사례 조사

- 통합 재난리스크관리²⁴⁾

통합 재난리스크관리(IDRM, Integrated Disaster Risk Management)는 1960 년대에 개발되어 현재까지 개선되고 있는 리스크 관리 개념이다. 통합 재난리스크관리에서 리스크연계 방식은 재난 위험을 종합적으로 이해하고 대처하는 것을 목표로 한다. 통합 재난리스크관리에서 활용하는 리스크 연계 방식의 주요 목표는 리스크요소, 취약성, 그리고 대응 능력을 서로 연결하여 재난 리스크를 체계적으로 평가하고 재난에 대응할 수 있는 통합 모델을 만드는 데 있다.



[그림 2-3] 통합 재난리스크관리 개념의 개발사

출처 : Sandoval *et al.*, 2023. Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance Its Study and Assessment. International Journal of Disaster Risk Science. v14. p.346

통합 재난리스크관리는 리스크요소를 식별하고 정리하는 단계에서 시작된다. 지진, 홍수, 산업 재해와 같은 잠재적 리스크요소를 지도화하고 각 재난 및 재해 특성을 분석하는 단계가 우선적으로 수행된다. 이 과정에서 지리정보시스템(GIS)과 원격탐사 기술을 활용해 위험 지역을 명확히 시각화하고, 과거 데이터를 바탕으로 리스크요소의 빈도, 규모, 그리고 잠재적 영향을 파악한다. 이를 통해 향후 발생 가능한 재난위험을 예측한다.

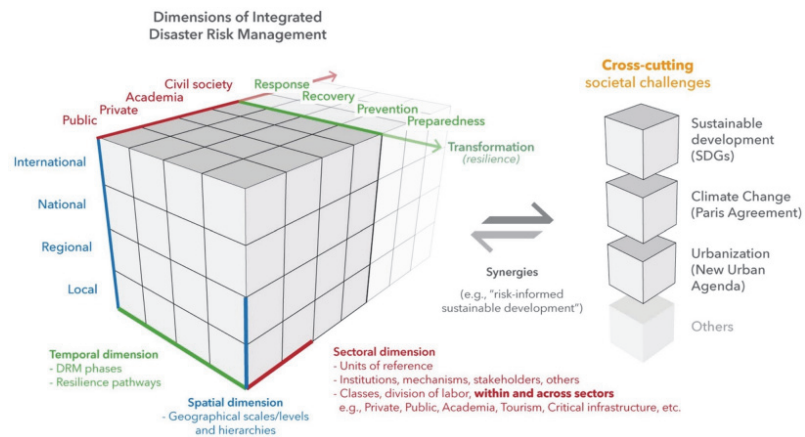
다음으로 취약성 평가를 수행한다. 취약성 평가 단계에서는 지역사회, 인프라,

24) Sandoval *et al.*, 2023. Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance Its Study and Assessment. International Journal of Disaster Risk Science. v.14. pp.343-356

시스템이 해당 지역에 발생할 것으로 예상되는 재난에 얼마나 취약한지를 분석한다. 사회경제적 조건, 인구 통계학적 특성, 주요 인프라의 복원력 등이 주요 분석 대상이며, 이를 통해 취약성의 정도를 평가한다. 사회 취약성 지수(SoVI) 같은 도구를 활용해 취약성을 정량화하고, 즉각적인 주의가 필요한 영역을 강조한다. 이를 통해 위험 완화 전략이 정략적으로 수립되고, 특히 취약 계층의 지원이 필요한 경우 이에 대처할 수 있다.

취약성 평가 다음으로는 대응 능력을 분석한다. 이 단계에서는 가용 자원, 기술, 그리고 관계법·제도가 재난 리스크 감소에 얼마나 기여할 수 있는지 평가한다. 예를 들어, 응급 대응팀의 준비 상태, 공공 교육 프로그램의 효과, 복원력이 높은 인프라의 기능 등을 분석하여 재난 상황에서의 대응력을 진단한다.

리스크요소, 취약성, 대응 능력에 대한 분석이 완료되면, 리스크 연계 접근법을 통해 이 세 요소를 통합하여 하나의 종합적 평가체계를 제시한다. 이를 통해 재난 리스크에 대한 심층적이고 정량적인 이해가 가능해진다. 이 과정에서는 확률적 위험 평가(PRA)나 시나리오 기반 분석 같은 고급 모델링 기술을 활용해 다양한 재난 시나리오를 시뮬레이션한다. 이는 정책 입안자와 계획 수립자가 위험을 우선적으로 해결하고 자원을 효과적으로 배분하도록 돕는다.



[그림 2-4] 통합 재난리스크관리의 리스크 통합 개념

출처 : Sandoval *et al.*, 2023. Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance Its Study and Assessment. *International Journal of Disaster Risk Science*, v14, p.354

위험 연계 접근법의 가장 큰 장점은 재난 위험에 대해 종합적으로 결과물을 제시한다는 점이다. 리스크요소, 취약성, 대응 능력을 통합적으로 분석하여 명확한 로드맵을 제공하며, 자원을 가장 필요한 곳에 효율적으로 배분할 수 있게 한다.

뿐만 아니라, 이 같은 접근법은 재난 관리를 사후 대응 중심에서 예방과 대비 중심으로 전환하는 데 기여한다. 이를 통해 생명을 보호하고 경제적 손실과 복구 비용을 줄일 수 있다.

하지만 이 접근법에는 여러 가지 선결되어야 할 문제들이 있다. 가장 큰 문제 중 하나는 데이터의 가용성과 품질이다. 정확한 위험 평가를 위해서는 신뢰할 수 있는 데이터가 필수적이지만, 특히 개발도상국에서는 데이터와 자원이 부족한 경우가 많다. 또한, 다양한 데이터셋과 방법론을 통합하는 작업은 기술적으로 어렵고 많은 시간이나 인력 자원이 소요된다. 기술, 교육, 역량 강화를 위한 초기 비용도 저소득 국가에서는 큰 부담이 될 수 있다.

그럼에도 불구하고, 리스크 연계 접근법은 효과적인 재난 위험 관리의 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 리스크요소, 취약성, 대응 능력 간의 상호 연계를 강조하는 이 접근법은 위험을 줄이고 복원력을 강화하기 위한 강력한 틀을 제공한다. 재난이 기후 변화와 글로벌 트렌드로 인해 점점 더 빈번하고 복잡해짐에 따라, 이 접근법을 채택하는 것은 지역사회를 보호하고 지속 가능한 발전을 보장하기 위한 하나의 방편으로 제시되고 있다.

- 재난 모델 서비스 체인을 위한 재난 관리 시스템²⁵⁾

Disaster Model Service Chain (DMSC)은 자중 재난에 대한 대응을 위해 서비스체인 개념을 활용한 재난 관리 시스템을 제안하고 있다. 자연재해는 종종 2차 및 파생 재난으로 이어지는 재난 체인을 형성하며, 기존의 단일 재난 분석 모델은 이러한 복잡한 다중 재난 시나리오를 처리하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 제안된 시스템은 재난 모델 간의 상호 연계를 강화하고 다양한 재난 시나리오에 유연하게 대응할 수 있도록 설계되었다.

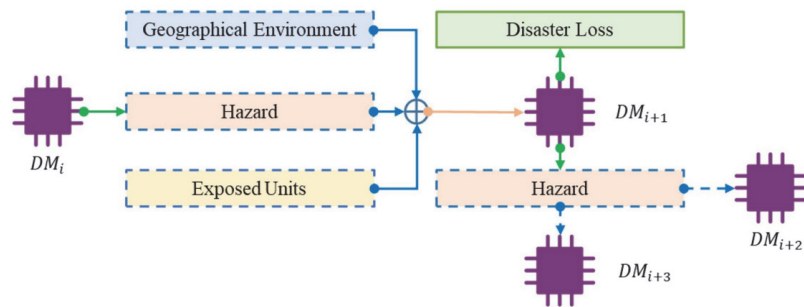
이 시스템은 재난 관리 플랫폼(Disaster Management Platform)을 중심으로 작동하며, 사용자 요청을 받아 모델을 표준화하고, 재난 간 인과 관계를 기반으로 DMSC를 구성하며, 서비스 품질(QoS)을 평가하여 최적의 모델 조합을 제공한다. 개별 재난 모델은 OGC Web Processing Service 표준을 기반으로 정의되며, Disaster Model Markup Language (DMML)를 통해 인터페이스를 표준화하여 모델 간 상호 연계성을 확보한다.

25) Jiang *et al.*, 2022. Toward Interoperable Multi-hazard Modeling: A Disaster Management System for Disaster Model Service Chain. *International Journal of Disaster Risk Science*. v.13. pp.862-877

DMSC의 재난 체인 분석 방법은 논리적 체인 구성, 물리적 체인 구성 및 최적화, 동적 조정의 3단계로 이루어진다. 첫 번째 단계인 논리적 체인 구성에서는 사용자가 제공한 재난 시나리오에서 시간, 위치, 재난 유형 등 중요한 키워드를 추출하고, 이를 바탕으로 데이터 기반 재난 체인 규칙을 활용해 재난 노드 간의 인과 관계를 파악하고 체인을 생성한다. 여러 초기 재난 노드가 있을 경우, 공통 노드를 중심으로 논리적 체인을 병합하여 하나의 체인을 구성한다.

두 번째 단계에서는 논리적 체인을 물리적으로 실행 가능한 체인으로 변환하고 최적화한다. 이 과정에서 각 재난 노드의 후보 모델 중 최적의 모델을 선택하기 위해 QoS (Quality of Service) 평가를 적용한다. QoS 평가는 응답 시간, 처리량, 가용성, 신뢰도, 사용자 평판, 실행 비용 등을 기준으로 모델의 성능을 정량적으로 평가한다. 이를 통해 체인 구조를 최적화하고, 사용자가 실행 가능한 최적의 물리적 체인을 제공한다.

마지막으로, 동적 조정을 통해 체인이 실행 중 실패하거나 재난 조건이 충족되지 않을 경우 이를 자동으로 수정한다. 네트워크 장애나 모델 실행 실패가 발생하면 해당 노드를 제거하고 대체 모델을 선택하여 체인을 재구성한다. 또한, 특정 재난 모델 실행에 필수적인 요소(재난 발생 요인, 지리적 환경, 노출된 단위)가 부족할 경우 해당 노드와 이후 노드를 체인에서 제거하여 실행 가능성을 유지한다.



[그림 2-5] DMSC의 서비스체인 프로세스

출처 : Jiang *et al.*, 2022. Toward Interoperable Multi-hazard Modeling: A Disaster Management System for Disaster Model Service Chain. *International Journal of Disaster Risk Science*. v.13. p.865

이 시스템의 주요 장점은 다양한 재난 시나리오를 처리할 수 있는 유연성, 기존 단일 재난 모델의 재사용 가능성, 그리고 QoS 평가와 동적 조정을 통한 안정성 보장이다. 향후 연구로는 더 많은 재난 유형과 모델을 통합하고, QoS 평가에 모델 정확도와 같은 요소를 추가하는 방안이 제시되었다. 이 시스템은 다중 재해 시 물레이션과 시각화된 결과 제공을 통해 재난 관리와 의사 결정 지원에 중요한 기여를 할 수 있다.

- 다차원 매트릭스 기법

개별적으로 평가된 건축물의 재난유형별 리스크는 최종적으로 건축물 단위에서 연계하고자 한다. 리스크의 연계를 위해 다양한 방법이 고려될 수 있으나, 본 연구에서는 다차원 매트릭스(Multidimensional Matrix)를 활용하고자 한다. 다차원 매트릭스는 여러 차원을 동시에 고려하여 데이터를 정리하고 분석하는 도구이다. 일반적인 2차원 매트릭스가 행과 열로 구성된 표라면, 다차원 매트릭스는 이보다 많은 차원을 사용하여 복잡한 데이터를 체계적으로 정리할 수 있다.

다차원 매트릭스에서 차원이란 데이터를 나누는 기준으로, 1차원은 단순한 리스트, 2차원은 표(테이블), 그리고 3차원 이상이 되면 더욱 복잡한 데이터 구조를 다룰 수 있다. 예를 들어, 3차원 매트릭스에서는 제품, 지역, 시간이라는 세 가지 차원을 동시에 고려할 수 있으며, 특정 제품이 특정 지역에서 특정 시기에 나타내는 매출 데이터를 분석하는 데 유용하다. 이렇게 다차원적으로 데이터를 배열하면 각 차원의 조합에서 나오는 값을 쉽게 파악할 수 있다.

PERSPECTIVE	RISK TYPE	TECHNOLOGY	ENVIRONMENT	ECONOMY	SOCIETY
MICRO LEVEL Business Risks	Operational risks	SDG#9	SDG#13	SDG#8	SDG#12
	Occupational risk				SDG#3
	Int. Financial Risks			SDG#8	
	Marketing Risks			SDG#8	SDG#17
	Strategic Risks	SDG#9		SDG#8	SDG#12
MESO LEVEL Competitive Risks	Reputational Risks		SDG#13	SDG#8	SDG#17
	Ext. Financial Risks			SDG#8	
	Economic Risks			SDG#8	
	Social Risks				SDG#17
	Technological Risks	SDG#9		SDG#8	
MACRO LEVEL Systemic Risks	Supply Chain Risks	SDG#9	SDG#13	SDG#8	SDG#17
	Cyber Risks	SDG#9		SDG#8	SDG#17
	Geopolitical Risks			SDG#8	SDG#16
	Compliance Risks	SDG#9	SDG#13	SDG#8	SDG#16
	Macroeconomic Risk			SDG#8	
	Social Instability Risk				SDG#17
	Environmental Risks	SDG#7	SDG#13	SDG#8	SDG#17
	Pandemic Risks	SDG#9	SDG#13	SDG#8	SDG#3

[그림 2-6] 다차원 리스크 매트릭스 활용 사례

출처 : Blundo *et al.*, 2021. Flexibility and Resilience in Corporate Decision Making: A New Sustainability-Based Risk Management System in Uncertain Times. *Global Journal of Flexible Systems Management*. v.22, i2 suppl. 10.1007/s40171-021-00277-7. p.S119

다차원 매트릭스를 리스크 연계에 사용할 경우 여러 장점들이 있다. 다차원 매트릭스는 여러 리스크가 상호작용할 때 그 복합적인 영향을 분석할 수 있다는 점에서 강력한 연계 도구이다. 리스크들이 독립적으로 발생할 때와 다르게 다차원 매트릭스를 사용하면 여러 리스크를 동시에 고려할 경우 어떻게 대응해야하는지 판단하기 쉽다. 이를 통해 건축물의 리스크 전반에 대한 종합적인 이해를 도울 수 있으며, 다양한 리스크 조합에 따른 시나리오 설정에 유용하다. 또한, 리스크 간의 상관관계를 고려하여 리스크 대응 우선순위를 설정하고 전략적인 결정을 내릴 수 있다. 무엇보다도 다차원 매트릭스는 분석 대상이 복잡할수록 더 정교하게 데이터를 다룰 수 있고, 여러 변수를 동시다발적으로 고려할 수 있다는 유연성과 확장성이 있다는 특징이 있다.

그러나 다차원 매트릭스는 차원이 많아질수록 복잡성이 급격히 증가한다는 단점이 있다. 리스크가 많아지면 그 조합의 수가 기하급수적으로 늘어나 해석이 어려워질 수 있으며, 이를 분석하기 위한 데이터 양도 많아져야 한다. 데이터가 충분하지 않으면 분석의 신뢰도가 떨어질 수 있고, 복잡한 구조를 해석하는 데 시간이 오래 걸릴 수 있다. 리스크의 정량화가 어려운 경우도 있어, 정확한 데이터를 얻기 힘들다면 분석 자체가 제한적일 수 있다. 또한 다차원 매트릭스를 구축하고 유지하는 데 많은 리소스와 시간이 소모되기 때문에, 작은 조직에서는 이러한 분석 방식을 도입하기에 부담이 될 수 있다.

□ 리스크 연계 방안 선정

본 연구에서는 다차원 매트릭스를 활용하여 다양한 재난 리스크를 연계하고자 한다. 통합 재난리스크관리나 재난 모델 서비스 체인을 위한 재난 관리 시스템과 같은 선행연구에서 보여주는 리스크 연계 방식은 건축물 단위의 리스크 연계가 아니라는 점에서 본 연구에서 목표로하는 바와 다르다. 또한 해당 사례에서 사용하는 개별 리스크 평가 방식이나, 개별 리스크 분석 및 연계를 위한 기초데이터가 본 연구에서 적용하기 어려운 측면이 있다. 반면 다차원 매트릭스 방식은 건축물 단위에서 리스크를 연계하는데 제약이 없어 본 연구에 적용하기에 적합한 방식으로 판단하였다.

본 연구에서 사용하는 다차원 매트릭스는 여러 가지 재난유형을 포함할 예정이다. 예를 들어 건축물에 대한 재난유형 A, 재난유형 B, 재난유형 C 리스크를 다차원 매트릭스를 이용해 분석하면, 각 재난이 개별적으로 또는 동시에 발생할 때 건축물에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있다. 이를 통해 특정 상황에서의 건축물별 위험도를 파악하고, 리스크에 대비하는 전략을 세울 수 있다.

이 같은 세 가지 재난유형에 대해 분석한다면 재난유형 A, 재난유형 B, 재난유형 C 각각의 리스크를 평가한다. 다차원 매트릭스를 구성해 이 세 가지 재난유형이 동시에 발생하거나 각각 발생할 때 건축물에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 각 재난유형을 위험 또는 미위험으로 구분할 수 있으며, 재난유형 A, 재난유형 B, 재난유형 C가 각각 위험 상태일 때 또는 그 조합에 따라 건축물에 미치는 위험도를 평가할 수 있다. 재난유형 A, 재난유형 B, 재난유형 C가 모두 위험 상태인 경우, 해당 건축물은 재난 피해가 발생할 가능성이 매우 높다. 반면, 재난유형 A만 위험하고 나머지 재난유형은 미위험인 경우에는 상대적으로 위험도가 낮다고 판단할 수 있을 것이다.

[표 2-1] 다차원 리스크 매트릭스의 분석 결과 예시

재난유형 A	재난유형 B	재난유형 C	종합 분석
위험	위험	위험	매우 위험
위험	위험	미위험	중간 위험
위험	미위험	위험	중간 위험
위험	미위험	미위험	낮은 위험
미위험	위험	위험	중간 위험
미위험	위험	미위험	낮은 위험
미위험	미위험	위험	낮은 위험
미위험	미위험	미위험	미위험

출처 : 연구진 작성

즉, 다차원 매트릭스를 통해 각 재난유형의 조합에 따른 위험도를 분석할 수 있으며, 이를 통해 건축물에 대한 복합적인 재난 위험을 파악하고, 적절한 대응을 위한 우선순위를 설정할 수 있다.

2. 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델²⁶⁾

1) 화재 및 홍수 리스크 분석 관련 동향

건축물 화재 및 홍수 리스크 분석을 위해 화재 및 홍수 리스크 분석에 관한 선행 연구와 분석 모델을 조사 및 분석하였다. 선행연구에서는 발생확률과 손상합수를 이용하여 리스크를 분석하는 것으로 나타났으며, 최종 리스크는 피해금액을 단위로 산정하는 경우가 가장 보편적이었다. 이는 리스크 분석이 실제 피해 규모를 평가하기 위해 피해액 단위의 결과를 도출하고 있는 것으로 판단된다.



[그림 2-7] 리스크 산정 개념

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p. iii

화재 예측 모델의 경우 주로 통계적 방법론에 기반하여 연구가 진행되어 왔으며, 발생 강도와 피해액의 분석은 가능하지만 화재발생 자체를 예측하기는 어려운 것으로 판단된다. 이는 화재의 특성상 자연 발화 가능성이 낮고 대부분 인간의 실수나 방화에 의해 발생하는 경우가 많아 환경적 특성이나 입지가 화재 발생에 미치는 영향이 낮기 때문이다. 리스크 분석 연구는 통계적 화재 발생 모델을 기반으로 손상합수와 연계하여 최종적으로 피해액을 도출하는 방식으로 리스크를 산출한다. 건축물의 리스크 분석도 이와 유사한 방법을 따르는 것으로 판단된다. 이 같은 분석방식은 지역단위 분석 뿐 아니라 건축물단위 분석에서도 동일하게 적용된다.

홍수와 관련된 연구와 분석모델은 수리·수문학적 모델을 기반으로 홍수 발생 가능성과 발생 강도 예측을 주로 수행하고 있다. SWMM과 SWAT같은 모델들이 대표적이며, 해당 모델은 지역별 홍수 대책 수립에 널리 적용되고 있다. 홍수 분석 모델은 강수량의 변화와 지형적 특성을 고려하여 다양한 상황에 따른 홍수 발생을 시뮬레이션 할 수 있으며, 이를 통해 발생 확률과 강도를 예측할 수 있다. 또한, 발생강도에 따른 피해액을 계산하는 손상합수와 결합하여 홍수 발생에 따른 리스크 분석을 수행하는 모델이 개발되었다. Hazus-MH, HEC-FIA 등이 대표적인 피해액 기반의 홍수 리스크 분석 모델로 사용되고 있다.

26) 본사업 2차연도 연구보고서(조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구) 내용 요약

선행연구 및 모델 분석을 통해 본 연구에서 개발하고자 하는 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석모델의 틀을 정립하였다. 건축물의 화재 및 홍수 리스크는 모두 피해 금액 단위로 도출되도록 설정하였으며, 리스크 분석 기준은 예상되는 피해금액이 낮은 건축물과 높은 건축물을 기준으로 하였다. 발생확률과 손상함수는 통계적 모델에 기반을 두고 있는 머신러닝(딥러닝) 알고리즘을 사용하였다. 또한, 선행연구 및 모델 분석 결과를 바탕으로 건축물 화재와 홍수 리스크 분석을 위한 변수를 선정하였다.

[표 2-2] 재난·재해 분석 변수 정리

구분	입력변수
화재	도시 환경특성 관련 변수, 사회환경 특성 관련 변수, 기상 특성 관련 변수, 건축물 관련 변수
홍수	지형관련 변수, 배수 관련 변수, 토지이용 및 토지피복 관련 변수, 토성 관련 변수, 기상 관련 변수, 건축물 관련 변수

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p. iv

2) 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발

건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발을 1) 데이터 구축 단계와 2) 모델 개발 및 검증 단계로 구분하여 수행하였다. 데이터 구축 과정은 ① 건축물 화재와 홍수 피해 발생 및 피해비용 데이터를 각각 건축물대장 데이터와 연계하는 과정과, ② 추가적인 독립변수를 생산 및 연계하는 과정으로 구성된다. 모델 개발 및 검증 과정은 ① 구축한 분석 데이터셋을 학습시킬 알고리즘을 선정하고, 선정된 알고리즘을 바탕으로 모델을 학습시킨 후, ② 검증 및 테스트 과정을 수행하는 피드백 과정을 거쳐 모델을 개발하는 과정이다. 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델은 각각 독립적으로 개발하였다.

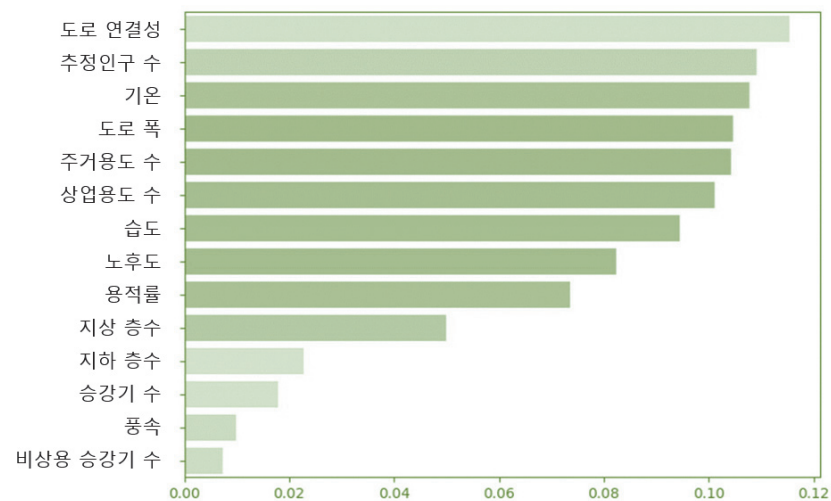
데이터 구축		모델 개발 및 검증	
화재 및 홍수 발생 데이터와 건축물 대장 연계	분석을 위한 입력변수 생산 및 건축물 대장과 연계	머신러닝(딥러닝) 알고리즘 선정 및 구축된 데이터 기반 모델 학습	검증 및 테스트를 수행하며 모델 피드백 및 최종 리스크 분석 모델 선정

[그림 2-8] 모델 개발 과정 요약

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p. v

건축물 화재 리스크 분석 모델 개발에는 2017년부터 2021년까지의 총 28,266건의 서울시 건축물 화재피해 데이터를 사용하였다. 피해금액이 20만 원 이상인 건축물의 경우 화재 리스크가 높은 건축물로, 20만 원 미만인 경우 화재 리스크가 낮은 건축물로 분류하여 분석을 진행하였다. 랜덤포레스트, 로지스틱 회귀 분석, LightGBM, XGBoost 등 다양한 머신러닝 알고리즘을 적용해 보았으며, 가장 높은 정확도를 나타낸 랜덤포레스트를 선정하여 모델을 도출하였다.

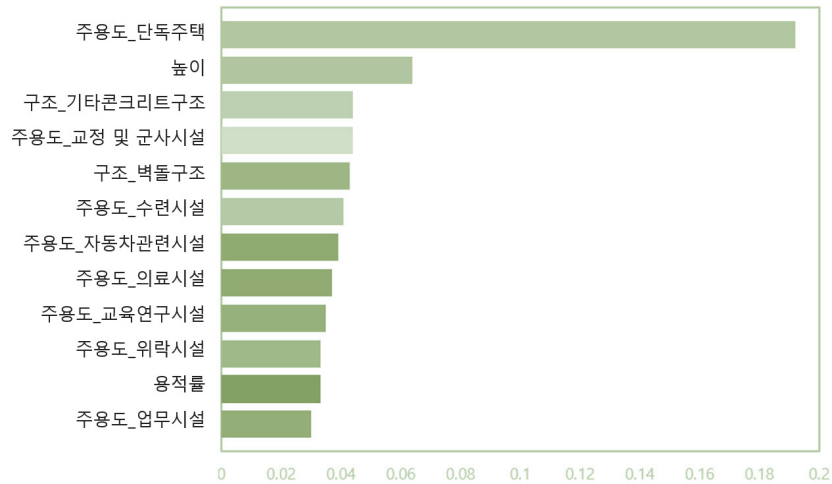
건축물 화재 리스크 분석의 주 영향 요인으로는 도로 연결성, 추정인구 수, 기온, 도로 폭, 주거용도 수, 상업용도 수 등으로 도출되었다. 또한, 건축물 화재 리스크 분석 모델의 최종 정확도는 78% 수준으로 나타났고, F1스코어는 0.75, ROC곡선의 아래 부분의 면적을 나타내는 AUC값은 0.89로 나타나 준수한 수준의 리스크 분석 모델을 개발하였다.



[그림 2-9] 화재 리스크 분석 모델 변수 중요도

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p.78

건축물 홍수 리스크 분석 모델 개발에는 2016년부터 2022년까지 총 27,438건의 서울시 건축물 홍수피해 데이터를 활용하였다. 300만 원 이하와 초과의 총 2개 클래스를 홍수 리스크가 낮은 건축물과 높은 건축물로 구분하여 분석을 수행하였다. 건축물 홍수 리스크 분석 모델은 TabNet classifier를 사용하였다. 홍수 리스크 분석에 영향력이 높은 것으로 도출된 변수는 건축물의 용도와 구조, 그리고 건축물의 높이와 용적률 등으로 나타났다. 최종 건축물 홍수 리스크 분석 모델의 정확도는 88%로 매우 높은 수준의 정확도를 갖는 것으로 도출되었다.



[그림 2-10] 홍수 리스크 분석 모델 변수 중요도

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p.91

3) 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 적용

서울시 관악구를 대상으로 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델을 적용하였다. 모델 개발에는 화재 및 홍수 피해가 발생한 건물을 이용하였으며, 모델 적용에는 서울시 관악구에 있는 모든 건축물에 대해 화재 및 홍수 리스크 분석을 수행하였다. 서울시 관악구에는 총 32,079동의 건축물이 존재하며, 분석을 위해 입력변수를 구축하고 모든 건축물 포인트에 데이터를 연계하였다.



[화재 리스크 지도] 빨간색: 화재 리스크 높음



[홍수 리스크 지도] 파란색: 홍수 리스크 높음

[그림 2-11] 건축물 홍수 및 화재 리스크 지도(개별 분석 결과)

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p.104



0 50 100 m

범례

● 홍수·화재위험건축물 ● 화재위험건축물
● 홍수위험건축물 ● 건축물

노란색: 화재 및 홍수 리스크 모두 낮음, 빨간색: 화재 리스크 높음,
파란색: 홍수 리스크 높음, 별표: 화재 및 홍수 리스크 모두 높음

[그림 2-12] 건축물 홍수 및 화재 리스크 지도(연계 분석 결과)

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p.105

구축된 데이터를 모델에 입력하여 건축물 화재 리스크 지도와 홍수 리스크 지도를 도출할 수 있다. 분석 결과 화재 피해가 클 것으로 예측되는 건축물은 총 8,405동(약 31%), 홍수 피해가 클 것으로 예측되는 건축물은 446동(약 1.5%)로 나타났다.

건축물 화재 및 홍수 리스크를 종합적으로 확인하기 위해 개별 예측 결과물을 중첩분석 하였다. 화재 및 홍수 리스크가 높고 낮음에 따라 총 4가지 유형의 건축물을 도출할 수 있다. 관악구 내 건축물 32,079동 중 화재 또는 홍수 리스크가 모두 낮은 건축물은 23,276동, 화재 리스크만 높은 건축물은 8,357동, 홍수 리스크만 높은 건축물은 398동, 화재 및 홍수 리스크가 모두 높은 건축물은 총 48동으로 도출되었다.

[표 2-3] 건축물 화재 및 홍수 리스크 유형

	화재 리스크 낮음	화재 리스크 높음
홍수 리스크 낮음	23,276동 (72.56%)	8,357동 (26.05%)
홍수 리스크 높음	398동 (1.24%)	48동 (0.15%)

출처 : 조영진 외. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. p.103

3. 모델 개발 방향

□ 다차원 매트릭스 기반 리스크 연계

건축물 재난 유형별 리스크 분석 모델 연계는 다차원 매트릭스 기반으로 수행하고자 한다. 특히 본 연구의 건축물 화재 리스크 분석 모델과 홍수 리스크 분석 모델은 리스크가 높고 낮음의 이항분류를 하였다. 때문에 세 개의 리스크 분석 모델이 연계되어도 다차원 매트릭스의 단점 중 하나인 결과물의 복잡성이 크게 증가하지 않는다.

다차원 매트릭스 기반으로 연계함으로써 정책결정자는 건축물의 종합적인 재난 리스크를 이해하기 쉬운 형태로 확인할 수 있고, 개별 재난유형의 리스크 또한 확인할 수 있다는 장점이 있다.

□ 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발 절차

본 연구에서 개발하는 건축물 재난 리스크 분석 모델은 3년에 걸쳐 개발하고 있다. 연차별로 건축물에 피해를 입히는 하나의 재난 리스크 분석 모델을 추가하고 있으며, 모델 연계방법과 분석 정확도를 고도화하고자 한다.



[그림 2-13] 연차별 모델 개발 현황

출처 : 연구진 작성

1차연도 연구에서는 건축물 화재 분석 모델을 개발하였다. 해당 과정을 통해 건축행정정보와 건축물 화재피해 여부 데이터의 결합과 딥러닝 모형 적용으로 건축물의 화재발생 가능성을 분석할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 건축물의 재난 안전 확보를 위해 피해발생 데이터와 건축 행정정보 등 다양한 데이터 연계의 중요성을 확인하였고 머신러닝 및 딥러닝 모형을 활용한 건축물 재난 분석 방법의 발전 가능성을 확인하였다.

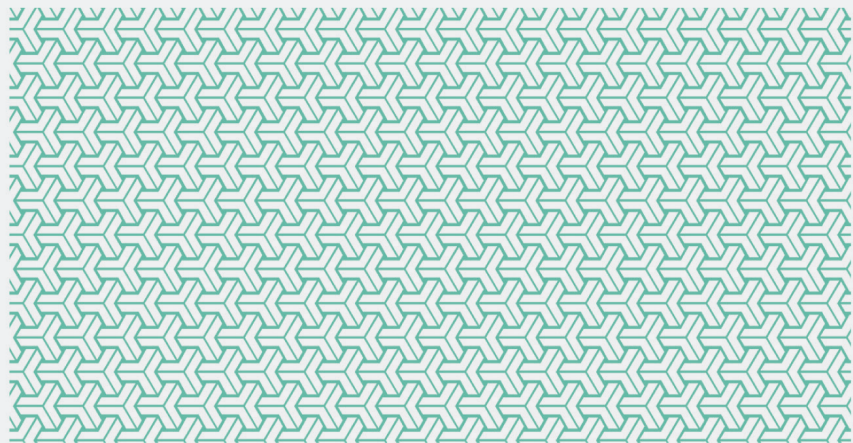
2차연도 연구에서는 건축물 홍수 리스크 분석 모델을 개발하는 한편 1차연도에 개발한 건축물 화재 분석 모델의 정확도를 개선하고 리스크 분석 모델로 변환하였다. 또한 2차연도 부터는 두 개 이상의 재난유형이 포함됨으로써 개별 리스크 분석 결과의 연계가 필요하였다. 이에 건축물 단위의 데이터 연계 방안을 적용하여 건축물 재난 리스크 분석 모델을 개선하였다.

3차연도에는 추가적인 재난유형에 대한 리스크 분석 모델을 개발하고, 기존 2차연도까지의 화재, 홍수 리스크 분석모델과 연계하고자 한다. 3차연도에는 기존의 단순 연계를 넘어 다차원 매트릭스 기반의 연계를 시도함으로써 리스크 분석 결과의 연계 방법을 고도화하고, 건축물 재난 리스크 분석 결과를 더 체계적으로 해석하고자 한다.

제3장 건축물 산사태 리스크 분석

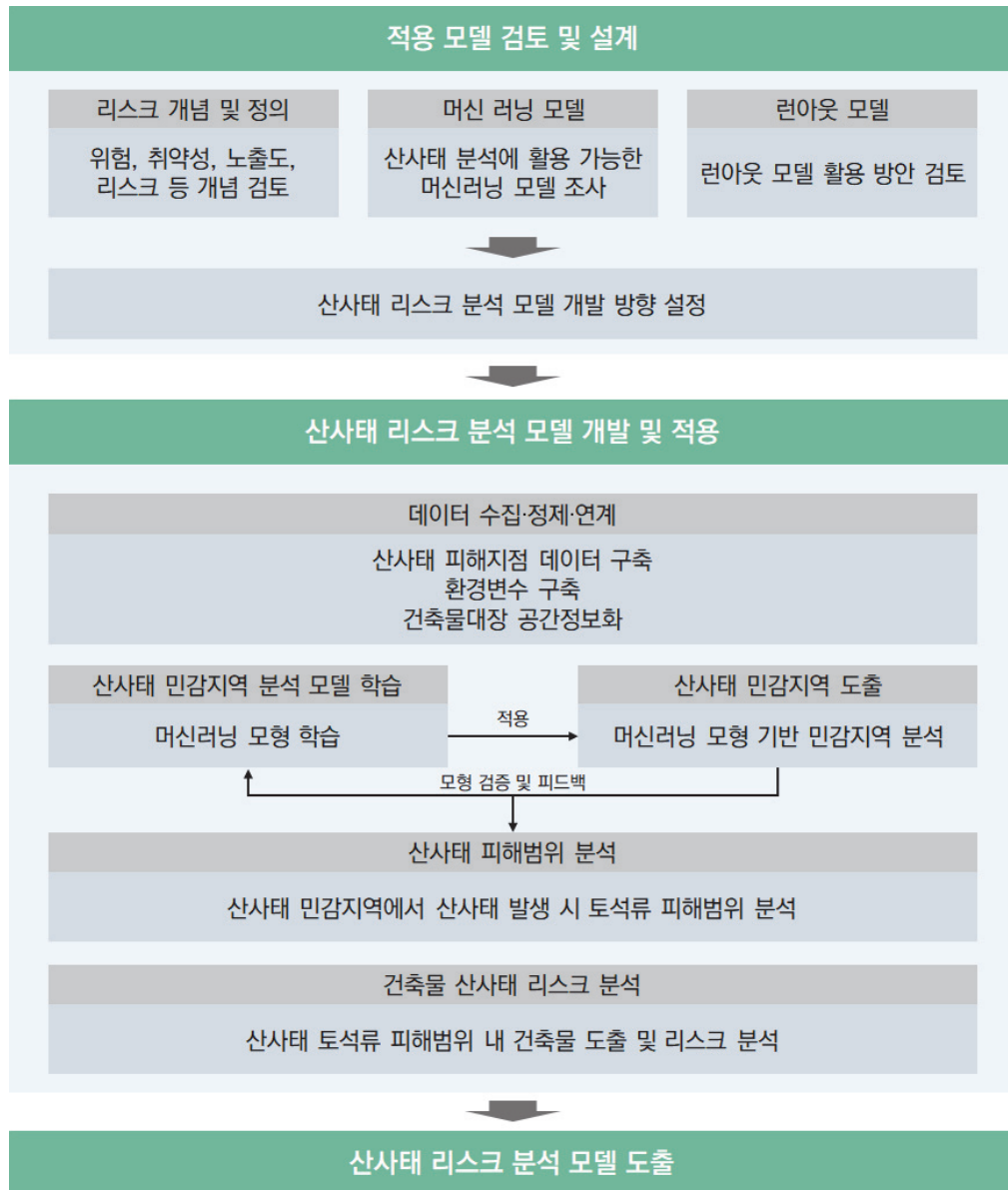
모델 설계

Chapter.3



1. 모델 개발의 틀
2. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계
3. 산사태 민감지역 분석 모델 개발
4. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발

1. 모델 개발의 틀



[그림 3-1] 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발의 틀

출처 : 연구진 작성

2. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계

1) 적용 모델 검토

□ 리스크 개념 및 정의

본 연구의 목표는 특정 사건이나 상황이 발생할 확률과 그로 인한 피해 규모를 정량적으로 평가할 수 있는 리스크 모델을 개발하는 것이다. 이 모델은 건축물이 위치한 지역에서 산사태가 발생할 가능성과 그로 인해 건축물이 입을 수 있는 잠재적 피해를 분석하는 도구로, 산사태로 인한 재산 피해, 인명 손실 및 사회적 영향을 최소화하기 위한 예방 및 대비책을 마련하는 데 목적이 있다. 리스크 모델은 다음과 같은 구성 요소를 포함한다.

- 위험 요소(Hazard): 산사태 발생 가능성을 평가하기 위해 지형, 강수량, 토양 특성, 식생 상태 등을 고려한다.
- 취약성(Vulnerability): 건축물이 산사태에 얼마나 취약한지를 나타내는 요소로, 건축물의 구조적 특성, 사용 재료 및 위치 등을 포함한다.
- 노출도(Exposure): 산사태 발생 시 영향을 받을 수 있는 건축물, 인구, 인프라 등을 의미한다.
- 리스크(Risk): 위험 요소, 취약성, 노출도를 종합적으로 고려하여 산출한 잠재적 피해의 정도를 나타낸다.

이러한 요소들을 종합적으로 분석함으로써, 본 연구의 리스크 모델은 서울시의 산사태 위험 수준을 평가한다.

□ 머신러닝 모델

산사태 리스크 모델에 머신 러닝 기법을 적용한 사례는 국내외에서 다양하게 연구되고 있다. 머신러닝 모델은 대규모 데이터셋을 바탕으로 패턴을 학습하고 예측 모델을 개발하는 데 강점을 가지고 있다. 주요 모델로는 ANN (Artificial Neural Network), CTA (Classification Tree Analysis), FDA (Flexible Discriminant Analysis), GAM (Generalized Additive Model), GBM (Generalized Boosted Regression Model), GLM (Generalized Linear Model), MARS (Multiple Adaptive Regression Splines), Maxent (Maximum Entropy Model), SRE (Species Range Envelope), XGBoost 등이 있다.

GLM과 GAM은 통계적 접근법으로, 지형 및 환경 변수와 산사태 간의 상관관계를 분석하여 민감성을 평가한다. Mazandaran 지역에서 수행된 연구에서는 GLM과 GAM을 포함한 여러 모델을 비교하여 산사태 민감성을 평가하였다 (Goetz *et al.* 2015). GBM과 XGBoost는 높은 예측 정확도를 자랑하는 머신러닝 모델이다. 특히, XGBoost는 변수 간의 상호작용을 효과적으로 모델링하여 뛰어난 성능을 발휘하였다. 연구에 따르면, XGBoost는 다른 모델들에 비해 높은 AUC 값을 나타내며, 산사태 민감성 평가에 매우 유용하였다 (Merghadi *et al.* 2020).

FDA는 지도 학습 알고리즘으로, 다양한 데이터 소스를 기반으로 산사태 민감성을 모델링하는 데 효과적이다. 연구 결과, FDA는 GLM과 유사한 성능을 보였으나, GBM 및 XGBoost에 비해서는 다소 낮은 성능을 보였다 (Kalantar *et al.* 2020). MARS는 비선형 관계를 효과적으로 모델링하는 통계 모델로, 지형 및 환경 변수의 비선형 효과를 반영하는 데 유용하였다. 이 모델은 특히 복잡한 데이터셋에서 높은 예측 정확도를 보여주었다 (Chen *et al.* 2018). Maxent는 최대 엔트로피 이론을 기반으로 한 모델로, 주로 환경 데이터와 관련된 변수들을 활용하여 산사태 발생 가능성을 예측하였다. 이 모델은 산사태 민감성 평가에 자주 사용되며, 높은 예측 성능을 보여주었다 (Pham *et al.* 2016).

ANN은 대규모 데이터셋에서 패턴을 학습하고 예측하는 데 강점을 가지고 있으며, 다른 전통적인 통계 모델에 비해 더 높은 예측 정확도를 보여주었다 (Nguyen *et al.* 2019). 단일 모델의 사용보다 여러 모델을 통합하여 예측 정확도를 향상시키는 접근법이 권장된다. 예를 들어, FDA, GLM, GBM, XGBoost 등을 결합한 앙상블 모델은 개별 모델보다 높은 예측 성능을 나타냈다 (Kalantar *et al.* 2020).

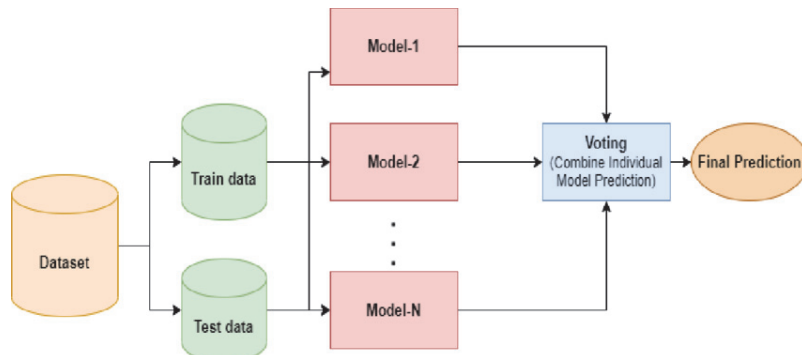
다양한 머신러닝 및 통계 모델을 활용한 산사태 민감성 평가는 재해 예측 및 관리에 있어 중요한 도구로 사용되고 있다. 앙상블 모델과 같이 각 모델의 강점을 결합한 통합 접근법은 예측 정확도를 크게 향상시키며, 이는 재해로 인한 피해를 최소화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

[표 3-1] 산사태 민감성 평가에 사용된 모델

모델명	분류
Generalized Linear Model	Statistical Model
Generalized Additive Model	Statistical Model
Rectilinear Envelope Similar to BIOCLIM	Statistical Model
Flexible Discriminant Analysis	Statistical Model
Multiple Adaptive Regression Splines	Statistical Model
Maximum Entropy Model	Statistical Model
Generalized Boosted Regression Mode	Machine Learning Model
Artificial Neural Network	Machine Learning Model
Classification Tree Analysis	Machine Learning Model
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting Training

출처: 연구진 작성

앙상블 모형은 다양한 모델들의 강점을 활용하기 위한 방법이다. 리스크 분석을 위한 앙상블 모형의 장점은 예측 정확성과 안정성의 향상에 있다. 앙상블 모형은 여러 개의 개별 모형을 결합하여 각 모형의 단점을 보완하고, 더 견고하고 신뢰할 수 있는 예측을 제공한다. 특히, 다양한 모형이 상호 보완적으로 작용하여 단일 모형의 과적합 문제를 완화하고, 데이터의 변동성이나 이상치에 대해 더욱 유연하게 대응할 수 있다. 또한, 다양한 알고리즘을 조합하기 때문에 복잡한 리스크 요인들을 각각도로 분석할 수 있어, 리스크 예측의 정확성을 높이는 동시에 예측의 불확실성을 줄이는 효과를 발휘한다. 이러한 이유로 앙상블 모형은 금융, 보험, 공학 등 다양한 분야에서 리스크 분석 도구로 널리 활용되고 있다.

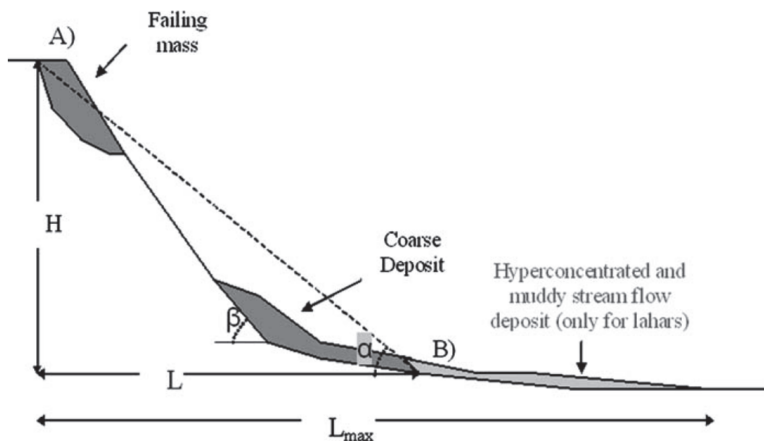


[그림 3-2] 앙상블 모형의 구조 개념

출처 : Hossain *et al.*, 2022. Explainable Artificial Intelligence to Improve Human Decision Support in Heart Disease. A Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Bachelor of Science in Computer Science and Engineering. p.30

□ 런아웃 모델

재해 분야에서 런아웃 모델(Run-out model)은 자연 재해나 인공 재해로 인한 물질의 이동 및 확산 경로를 예측하기 위해 사용된다. 이러한 모델은 재해 발생 시 위험 요소가 어디까지 확산될지를 예측하여 대피 계획을 수립하고 피해를 최소화하는 데 중요한 역할을 한다. 런아웃 모델은 산사태, 화산성 이류, 토석류 등 다양한 재해 상황에서 적용될 수 있으며, 이를 통해 재해 관리와 예방에 중요한 기초 자료를 제공한다.



[그림 3-3] 산사태 런아웃 분석의 기본 개념

출처 : Devoli *et al.*, 2008. Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run-out Distance. *Geotechnical and Geological Engineering*, v.27, p.32

산사태 분야의 주요 런아웃 모델은 다음과 같다. FLO-2D는 점성 흐름인 토석류를 2차원으로 모델링하여 침식 및 퇴적 과정을 정밀하게 시뮬레이션하는 도구이다. Ding *et al.* (2023)의 연구에 따르면, FLO-2D는 산사태로 발생한 토석류의 이동 범위를 신뢰성 있게 예측하며, 실제 사건과 비교해도 높은 일치도를 보여준다. 이 모델은 디지털 고도 모델(DEM, Digital Elevation Model), 강우량 데이터, 유량, 토양 특성 등의 데이터를 사용하여 토석류의 이동 경로와 범위를 예측한다. 디지털 고도 모델(DEM)은 지형의 고도 차이를 포함하여 흐름 경로를 계산하는 데 필수적이며, 강우량 및 유량 데이터는 토석류의 발생 조건과 범위를 분석하는 데 중요하다. 그러나 복잡한 지형 변화를 완전히 반영하는 데에는 한계가 있을 수 있다.

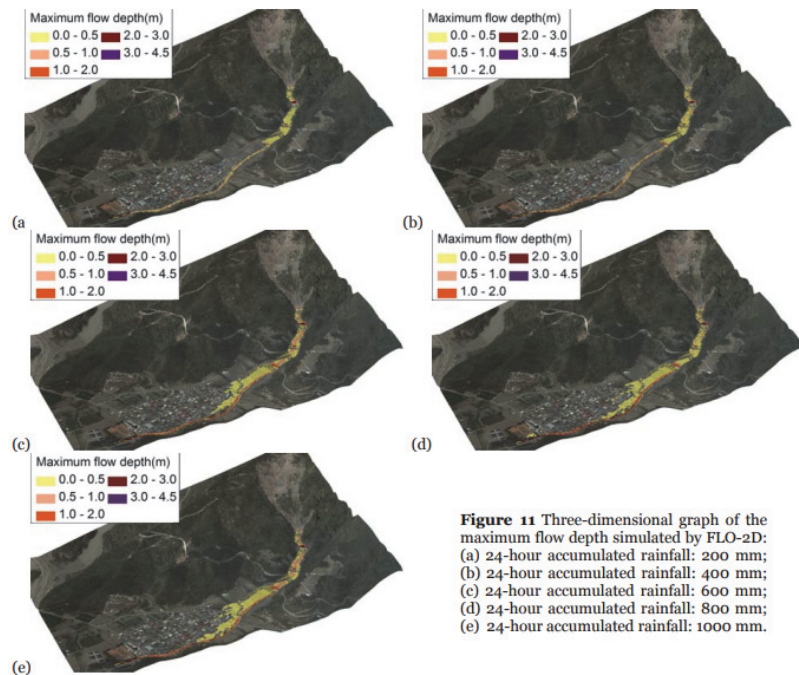
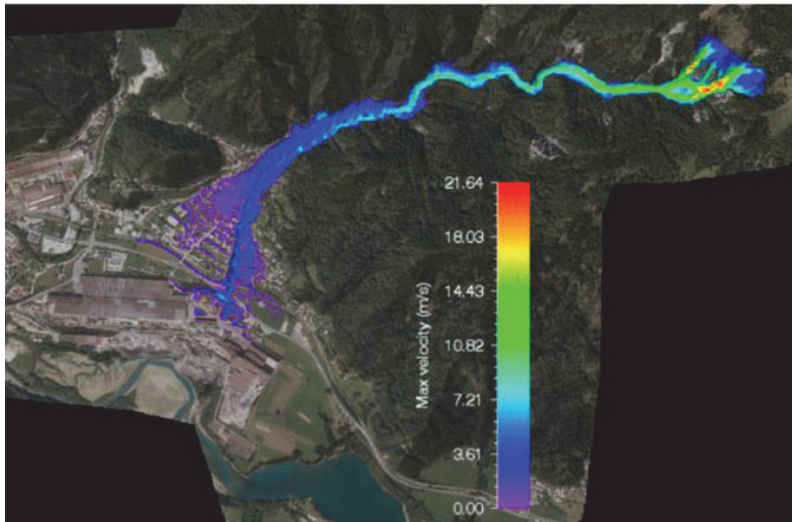


Figure 11 Three-dimensional graph of the maximum flow depth simulated by FLO-2D: (a) 24-hour accumulated rainfall: 200 mm; (b) 24-hour accumulated rainfall: 400 mm; (c) 24-hour accumulated rainfall: 600 mm; (d) 24-hour accumulated rainfall: 800 mm; (e) 24-hour accumulated rainfall: 1000 mm.

[그림 3-4] FLO 2D모델을 사용한 토석류 흐름 분석 예시

출처 : Peng & Lu, 2013. FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in southeastern Taiwan during Typhoon Morakot. *Journal of Mountain Science*. v.10. i2. p.216

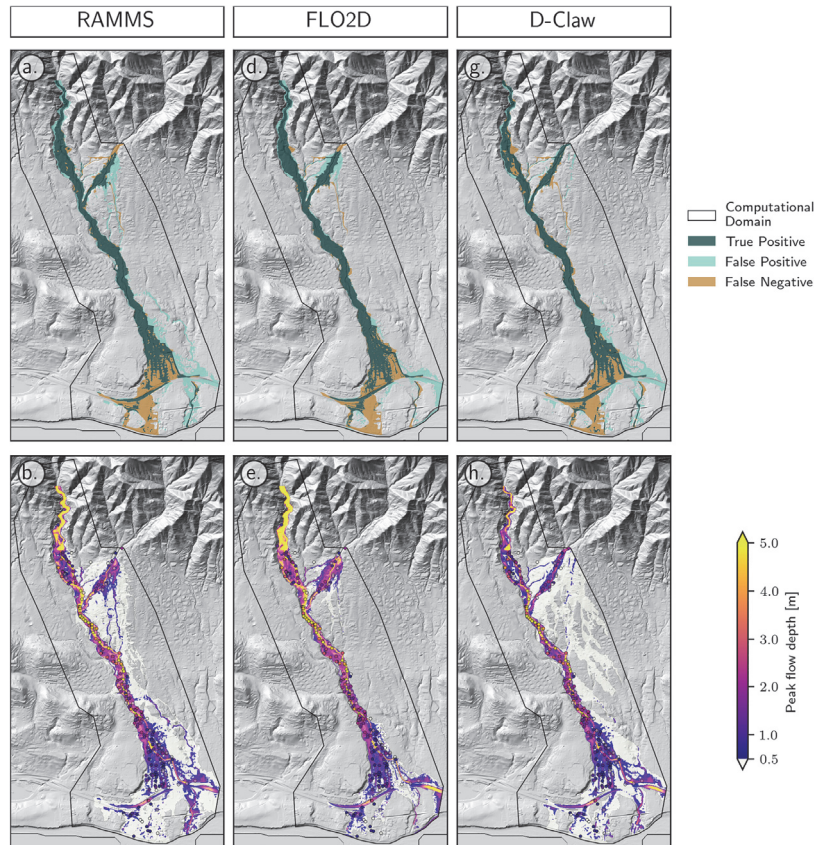
RAMMS는 토석류, 눈사태와 같이 빠르게 이동하는 질량 현상의 모델링에 최적화된 도구로, 경사면을 따라 이동하는 토석류의 동적 거동을 정교하게 예측한다. Cesca and D'Agostino (2008)의 연구에서는 RAMMS가 다양한 지형적 요인을 통합하여 보다 현실적인 시뮬레이션 결과를 제공했으며, 디지털 고도 모델 (DEM), 지형 경사, 유동학적 매개변수, 유량, 토양 농도 등의 데이터를 사용하여 토석류의 물리적 특성을 정밀하게 분석했다. DEM은 지형 복잡성을 반영하며, 유동학적 매개변수는 점성 및 유동성을 정의하여 토석류의 흐름 특성을 정확히 시뮬레이션한다. 하지만 초기 조건 설정의 복잡성과 높은 연산 자원 요구로 인해 실행 속도가 다소 느려질 수 있다.



[그림 3-5] RAMMS 모델을 사용한 토석류 흐름 분석 예시

출처 : Mikoš & Bezak, 2021, Debris Flow Modelling Using RAMMS Model in the Alpine Environment With Focus on the Model Parameters and Main Characteristics, *Frontiers in Earth Science*, v.8, p.9

D-Claw 모델은 유체와 고체 간의 상호작용을 세밀하게 반영하여 토석류 및 흐름형 산사태를 시뮬레이션하는 데 특화된 도구이다. George and Iverson (2014)의 연구에 따르면, D-Claw는 디지털 고도 모델(DEM), 유속, 기저 유체 압력, 고체 부피 비율, 마찰력 등의 데이터를 사용하여 토석류의 이동 경로와 속도를 예측한다. DEM은 지형 분석을 위한 필수 요소로, 유속 및 기저 유체 압력은 토석류의 이동 특성에 중요한 영향을 미친다. 이 모델은 실험 데이터와 비교했을 때 높은 예측 정확도를 보였으나, 복잡한 계산 요구로 인해 실시간 응용에는 제한이 있을 수 있다.



[그림 3-6] D-Claw과 FLO 2D, RAMMS, 모델들을 비교

출처 : Barnhart *et al.*, 2021. Multi-Model Comparison of Computed Debris Flow Runout for the 9 January 2018 Montecito, California Post-Wildfire Event. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. v.126. i.12. p.21

LAHARZ는 미국 지질조사국(USGS)에서 개발된 소프트웨어로, 화산성 이류(lahar) 및 토석류(debris flow)와 같은 지형 변형 현상의 이동 범위와 영향을 예측하는 데 사용된다. 이 모델은 디지털 고도 모델(DEM), 경사도, 고도, 역사적 화산성 이류 사건 데이터 등의 정보를 기반으로, 화산성 이류와 토석류의 흐름 경로를 분석하고 최종 피해 범위를 정밀하게 예측한다. DEM은 지형의 세밀한 분석을 가능하게 하며, 경사도와 고도 데이터는 이류의 이동 경로와 속도를 예측하는 데 중요한 역할을 한다.

[표 3-2] 토석류 런아웃 모델의 특징

모델	주요 사용 용도	주요 강점	약점	필요한 데이터
FLO-2D	2차원에서의 물 흐름 및 토석류	침식 및 퇴적 분석에 효과적	복잡한 흐름 역학을 처리하는 데 한계	DEM, 강우량 데이터, 유량, 토양 특성
RAMMS	빠른 질량 이동 (토석류, 눈사태 등)	복잡한 지형 및 빠른 질량 이동에서 매우 정확	높은 연산 요구 사항으로 실행 속도가 느림	DEM, 유동학적 매개 변수, 유량, 지형 경사, 토양 농도
D-Claw	고체-유체 상호작용을 고려한 토석류 역학	고체-유체 상호작용을 정밀하게 시뮬레이션	복잡성과 높은 계산 요구	DEM, 고체 부피 비율, 기저 유체 압력, 마찰력, 유속, 토양 특성
LAHARZ	화산성 이류(라하르) 및 토석류	GIS 통합으로 빠르고 정확한 위험 지도 작성	다른 모델들에 비해 흐름 역학의 세부사항이 적음	DEM, 유량, 지형, 경사, 과거 사건

출처 : 연구진 작성

LAHARZ는 산사태 및 토석류 피해 범위 예측 연구에서 널리 활용되고 있다. Bessette-Kirtona *et al.* (2019)은 미국 캘리포니아 몬테시토에서 발생한 토석류를 대상으로 LAHARZ 모델을 사용하여 정확성과 복잡성을 평가했다. Witt (2017)는 버지니아 남서부의 애플래치아 석탄광산 지역에서 토석류 위험을 예측하여, 광산 재해 위험 관리에 유용한 데이터를 제공했다. 또한, Youberg *et al.* (2014)은 애리조나주 산타 카탈리나 산맥에서의 토석류 활동을 분석하고, 기후 변화에 따른 위험성을 평가했다. 이외에도 Witt *et al.* (2012)는 노스캐롤라이나주 매기 밸리에서 발생한 토석류를 대상으로 LAHARZ를 활용하여 비상 대응 시나리오를 수립했으며, Magirl *et al.* (2010)은 애리조나 남동부 지역에서 경험적 모델을 통해 토석류의 런아웃 거리를 예측했다. Dorta *et al.* (2007)은 이탈리아 사르노에서 발생한 소규모 토석류를 LAHARZ로 모델링하여 유럽 지역에서도 그 효용성을 입증했다.

LAHARZ는 물질의 이동 범위와 영향을 빠르게 예측할 수 있는 성능을 갖추고 있다. 특히 화산성 이류나 토석류와 같은 현상의 이동 경로를 신속하게 분석할 수 있으며, GIS 기반의 시뮬레이션 결과를 시각화하여 직관적인 분석이 가능하다. 또한, 경험적 데이터를 기반으로 한 통계적 보정을 통해 다양한 지형과 환경 조건에서 유연하게 적용할 수 있다.

이러한 이유로 LAHARZ는 산사태 런아웃 모델 중 최적의 선택으로 평가되며, 빠르고 신뢰성 높은 예측과 광범위한 적용 가능성 측면에서 다른 모델보다 우수한

성능을 발휘한다. 다양한 연구들은 LAHARZ가 토석류와 산사태 피해 예측에서 매우 강력한 도구임을 입증하고 있으며, 다양한 지형적 및 환경적 조건에서도 적용 가능하다는 점을 확인해 준다. LAHARZ는 재해 발생 시 피해 범위를 정확히 예측하고, 신속하고 효과적인 대응 계획 수립에 중요한 역할을 하고 있다.

□ 주요 변수

산사태 리스크 모델에서 주로 활용되는 주요 변수는 기상 조건, 지형 및 지질 정보, 토양 특성, 그리고 식생 등으로 요약할 수 있다. 이러한 변수들은 각 지역의 산사태 발생 가능성을 예측하는 데 중요한 역할을 한다. 데이터를 수집하고 분석하여 이러한 변수들을 포함하는 정밀한 지리 정보와 통계 자료를 확보하는 것이 이상적이다.

먼저, 기상 조건은 산사태 발생의 주요 요인으로 작용하였다. 강수량, 강수 강도, 온도, 습도 등의 기상 데이터는 일정 기간 동안의 누적 강수량이나 집중 호우가 지반의 포화 상태를 유발하여 산사태 위험을 증가시킬 수 있다. 이 같은 데이터는 기상 관측소나 위성 데이터를 통해 수집된다.

지형 정보는 산사태의 발생 가능성과 이동 경로를 결정짓는 중요한 요소이다. 경사도, 고도, 지형 경계, 경사 방향 등의 지형 데이터는 고해상도 디지털 고도 모델(DEM)을 통해 제공되며, LiDAR 데이터와 같은 정밀 지형 측량 자료도 활용될 수 있다.

지질 정보는 지반의 안정성에 영향을 미친다. 암석 종류, 지질 구조, 단층 분포 등의 지질 데이터는 특정 지질 구조나 단층선 근처에서 산사태 발생 위험이 높아질 수 있음을 나타낸다. 이러한 데이터는 지질 조사 보고서나 지질 지도에서 얻을 수 있다.

토양 특성은 지반의 안정성과 직접적으로 관련된다. 토양의 물리적, 화학적 특성(토양의 입도 분포, 투수성, 점착력 등)은 지반의 포화 상태나 강우에 따른 침투 특성에 영향을 미쳐 산사태 발생 가능성을 높이는 요소가 된다. 이러한 데이터는 토양 조사를 통해 확보된다.

식생은 지반을 안정화시키는 데 중요한 역할을 한다. 식생 피복도, 식생 종류, 뿌리 깊이 등의 식생 데이터는 지반을 보호하고 지표면의 침식을 방지하며, 뿌리 시스템은 토양을 고정시켜 산사태 위험을 줄인다. 이러한 데이터는 위성 영상 분석이나 현장 조사에서 얻을 수 있다. 이러한 변수들은 GIS(지리 정보 시스템)를 통해 통합적으로 관리되고 분석된다.

□ 적용 모델 종합

건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발을 위한 사례조사를 통해 크게 두 가지 결론을 도출하였다.

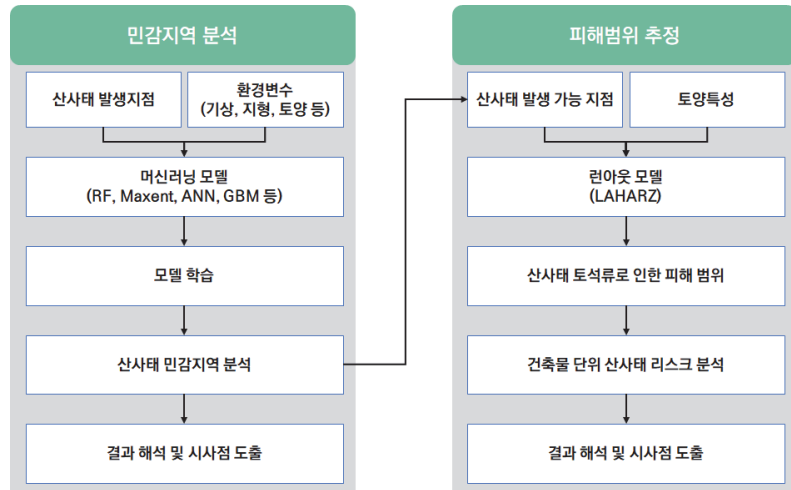
첫째, 머신러닝 모델과 런아웃 모델의 복합적 사용이 필요하다. 두 모델을 함께 사용함으로써 두 모델이 각각 갖는 강점을 공유할 수 있다. 머신러닝 모델은 대규모 데이터셋을 분석하고 패턴을 학습하여 분석하는 데 뛰어난 능력을 가지고 있어 산사태 발생에 민감한 지역을 높은 정확도로 분석할 수 있다. 반면, 런아웃 모델은 산사태 발생 시 물질의 이동 경로와 확산 범위를 예측하는 데 강점을 가지고 있어 산사태 발생 시의 구체적인 영향범위를 분석하고 이에 대한 대응방안을 마련하는데 도움을 준다. 이러한 통합 접근법은 각 모델의 강점을 결합하여 보다 종합적이고 활용가능성 높은 정보를 제공해 준다.

둘째, 다양한 변수를 사용함으로써 분석의 정확도를 개선할 필요가 있다. 머신러닝 모델은 기존의 분석 대비 다양한 데이터를 연계 및 활용함으로써 분석의 정확도를 높일 수 있다. 다양한 기상 조건, 지형 및 지질 정보, 토양 특성, 식생 등의 변수를 활용하여 산사태 발생 가능성을 분석할 수 있다. 이를 통해 산사태 발생가능성이 높은 산사태 민감지역을 정확하게 분석한 이후 런아웃 모델을 적용함으로써 건축물의 산사태 리스크 분석이 더 정확해질 수 있다.

2) 건축물 산사태 리스크 분석 모델 설계

□ 모델 개요

건축물 산사태 리스크 분석 모델의 구성은 크게 세 단계에 걸쳐 진행된다. 첫 번째 단계는 산사태 민감지역 분석이다. 이를 통해 서울시 내 산림 중 산사태 발생가능성이 높은 지역을 도출한다. 두 번째 단계는 산사태 피해범위 분석이다. 이는 첫 번째 단계에서 도출한 산사태 민감지역에서 산사태가 발생하는 경우 토석류가 미치는 피해범위를 도출한다. 마지막으로 세 번째 단계에서 산사태 피해범위에 포함되는 건축물을 도출하는 과정을 수행한다.



[그림 3-7] 산사태 민감지역 및 피해 범위 기반 리스크 분석 모델 흐름

출처 : 연구진 작성

□ 산사태 민감지역 분석

민감성 분석 단계는 분석 행정구역 단위 건축물 리스크 분석을 위한 산사태 발생 지점을 도출하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 민감지역 분석은 대상지 내 산사태 발생 가능성을 평가하고 발생 가능성이 높은 지역을 식별하는 것을 목표로 한다. 즉, 민감지역 분석은 산사태 발생 가능성을 평가하고, 건축물에 미치는 영향을 종합적으로 분석하는 과정이다.

이를 위해 우선 과거 산사태 발생 데이터를 바탕으로 산사태가 발생할 가능성이 높은 지점을 식별한다. 이 과정에서 기상, 지형, 토양, 식생 등 다양한 환경 변수를 고려하여 산사태 발생에 영향을 미치는 요소들을 분석하고, 여러 머신러닝 모델을 활용하여 발생 가능성을 예측한다. 머신러닝 분석 시에는 결과의 정확도를 높이고, 불확실성을 고려하기 위해 앙상블 모형을 활용한다.

□ 산사태 피해 범위 추정

산사태 민감지역 분석 이후 건축물 단위 리스크 분석을 위한 피해 범위 추정을 수행한다. 피해분석에는 런아웃 모델 중 하나인 LAHARZ 모델을 사용하고자 한다. 피해 범위 추정은 산사태로 인한 피해 범위를 예측하고, 건축물별 리스크를 평가하는 과정이다. 산사태 민감지역 분석을 통해 산사태가 발생할 가능성이 높은 지점을 식별하고, 해당 지점을 기준으로 런아웃 모델을 구동하고자 한다. 런아웃 모델 구동을 위해, 토양의 물리적 특성 및 지형적 특성을 고려하여 토석류의 이동 경로와 물량을 산정하고, 최종적으로 산사태 피해 범위를 도출하고자 한다.

□ 건축물 산사태 리스크 분석

산사태 피해 범위를 도출한 이후 피해범위에 포함된 건축물 중 피해를 입을 것으로 예상되는 건축물을 도출하는 작업을 수행한다. 산사태로 인한 피해가 예상되는 건축물은 산사태 발생지점으로부터 시작된 토석류가 가장 먼저 충돌하는 건축물로 한정한다. 이러한 과정을 통해 건축물 산사태 리스크에 영향을 미치는 주요 원인을 도출하고, 건축물 관리 및 이용 측면에서 산사태에 대응할 수 있는 방안을 모색한다.

3) 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발 방향

본 장에서는 국내외 산사태 리스크 모델 연구 사례를 다각도로 분석하였다. 특히, 머신러닝 기법을 적용한 모델과 런아웃 모델의 활용 사례를 집중적으로 살펴 보았다. 머신러닝 모델은 대규모 데이터셋을 바탕으로 패턴을 학습하고 예측하는 데 강점을 가지며, 최대 엔트로피(Maxent), 부스티드 회귀 트리(GBM), 인공 신경망(ANN) 등이 주요 모델로 활용되었다. 런아웃 모델은 자연 재해나 인공 재해로 인한 물질의 이동 및 확산 경로를 예측하는 데 사용되며, 재해 발생 시 위험 요소가 어디까지 확산될지를 예측하는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 사례 분석을 통해 머신러닝과 런아웃 모델을 결합하여 사용하는 것이 예측의 정확도를 높이는 데 효과적임을 확인할 수 있었다.

건축물 산사태 리스크 분석 모델은 위험 요소(Hazard), 취약성(Vulnerability), 노출도(Exposure)를 종합적으로 고려하여 산출한 리스크를 정량적으로 평가하는 것을 목표로 설계되었다. 첫 번째 단계는 산사태 민감성 분석으로, 다양한 환경 변수를 고려하여 산사태 발생 가능성이 높은 지점을 식별하고, 이를 행정구역 단위로 분석하여 민감지역을 선정하는 것이다. 두 번째 단계는 피해 범위 추정으로, 토양의 물리적 특성을 고려하여 산사태로 인한 피해 범위를 예측하고, 개별 건축물 단위로 리스크를 분석한다. 이러한 과정에서 기상 조건, 지형 및 지질 정보, 토양 특성, 식생 등의 변수를 활용하였으며, 다양한 도시 및 지역에 적용 가능한 범용적인 모델을 개발하고자 한다.

3. 산사태 민감지역 분석 모델 개발

1) 대상지 선정 및 특성

본 연구에서 다루는 건축물 산사태 리스크 분석 모델은 다양한 도시 및 지역에 적용이 가능해야 한다. 따라서 연구 대상지는 다양한 국내 도시 특성을 포함하는 지역으로 선정하고자 한다. 범용성 확보를 위해 다양한 인문·사회적 특성 및 물리·환경 적 특성을 고려할 필요가 있다. 즉, 거주인구 규모가 충분히 크고, 다양한 유형의 가구로 구성될 필요가 있다. 또한, 다양한 용도, 규모, 형태, 구조, 노후도의 건축물이 있고, 주거·상업·공업지역이 다양하게 분포하는 등 복합적 특성을 모두 포함할 필요가 있다.

본 연구에서는 이와 같은 특성을 나타내고, 분석을 위한 가용 데이터가 풍부하며, 분석 결과의 범용적 적용이 가능할 것으로 판단되는 서울시를 대상으로 연구를 수행하였다. 서울시는 약 1,000만 명의 인구가 거주하고 약 60만 동의 건축물이 있는 우리나라의 수도로, 본 연구를 수행하기 적합한 대상지로 선정하였다.

2) 입력데이터 선정 및 구축

□ 전국 산사태 발생지점 구축

모델 학습을 위해 산사태 발생지점 데이터를 구축하였다. 데이터는 2008년부터 2022년 까지 15년간 발생한 산사태를 기준으로 구축하였다. 데이터 구축은 두 가지 방법으로 진행하였다. 첫째, 과거 산림청과 소방청에서 제공한 데이터를 활용하였다. 해당 2008년부터 2010년까지 발생한 산사태 데이터로, 산사태 발생 지점에 대한 좌표정보가 있어 추가적인 데이터 변화작업을 수행할 필요가 없다. 둘째, 2011년부터 2022년까지 발생한 산사태로, 행정안전부 생활안전지도에서 제공하고 있다. 해당 데이터는 좌표정보가 없어 연구진이 직접 지오코딩을 통해 공간정보화를 진행하였다. 이를 통해 구축된 전체 산사태 발생지점 데이터는 총 8,293건이다.

[표 3-3] 산사태 리스크 모델의 종속변수

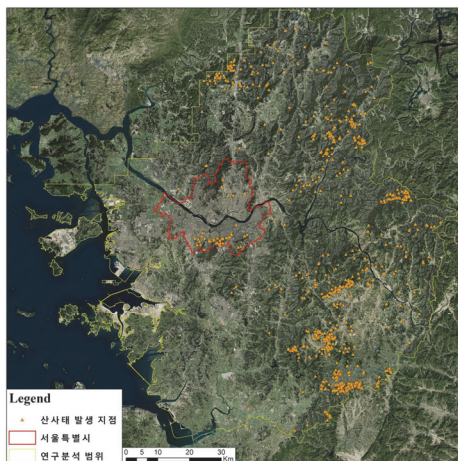
연도	발생지점 수	연도	발생지점 수
2008	57	2016	138
2009	243	2017	404
2010	372	2018	356
2011	609	2019	1,229
2012	373	2020	4,091
2013	165	2021	187
2014	65	2022	2
2015	2	합계	8,293

출처: 연구진 작성

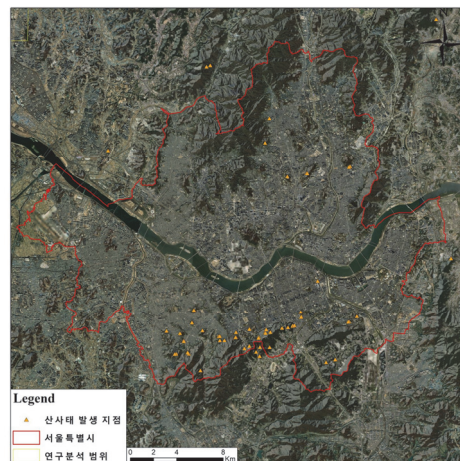
□ 서울시 산사태 발생지점 선정 및 보완

서울시의 산사태 민감성 분석을 위해 2008년부터 2022년 사이에 발생한 90건의 산사태 데이터를 확보하였다. 서울시 내 산사태 발생 데이터가 충분하지 않아, 모델의 신뢰성을 보완하기 위해 민감성 분석 대상 영역을 서울을 둘러싸고 있는 경기도 지역까지 확대하였다. 경기도는 서울시와 인접해 있으며, 유사한 지리적·환경적 특성을 지니고 있어, 서울시의 산사태 민감성 분석에 적합한 참조 데이터로 활용 가능하였다.

경기도의 산사태 발생 데이터는 각각 2011년 263건, 2013년 188건, 2020년 552건으로 서울시 내 발생 데이터보다 많은 정보가 존재하였다. 경기도 지역의 산사태 발생 데이터를 산사태 민감성 분석에 추가함으로써, 서울시의 데이터 부족 문제를 해결하고, 분석 결과의 신뢰성을 높였다.



서울시와 경기도의 산사태 발생지점



서울시의 산사태 발생지점

[그림 3-8] 서울시와 경기도의 산사태 발생지점

출처: 연구진 작성

[표 3-4] 산사태 리스크 모델의 독립변수

분류	독립 변수	출처
지형	경사	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	향	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	고도	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	평면 곡률	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	측면 곡률	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	하천강도지수	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	지형습윤지수	브이월드오픈마켓_DEM(2023)
	모암, 모재	흙도람 토양도(1:25,000)
토양	유효토심	흙도람 토양도(1:25,000)
	배수등급	흙도람 토양도(1:25,000)
	토양 유형	산림공간정보서비스(2020)
식생	경급	산림공간정보서비스(2020)
	영급	산림공간정보서비스(2020)
	산림유형	산림공간정보서비스(2020)
기후	연평균강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	여름철(6~10월) 평균강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	1일 최대 강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	5일 최대 강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	일강우량이80mm 이상인 날	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	일강우량이120mm 이상인 날	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	일강우량이150mm 이상인 날	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	3일주기 누적 강우 150mm이상 횟수	기상자료개방포털(ASOS, AWS)

출처: 연구진 작성

□ 환경변수

산사태 분석을 위한 환경변수는 크게 네 가지 카테고리로 구분할 수 있다. 지형과 관련된 변수, 토양과 관련된 변수, 식생과 관련된 변수, 기후 및 기상과 관련된 변수이다. 지형 변수는 DEM 데이터를 기반으로, 토양 변수는 지질 및 토양 데이터를 활용하여, 식생 변수는 산림 조사 데이터를 통해, 기후 변수는 기후 데이터를 분석하여 구축된다.

산사태 민감지역 모델링에서 사용되는 변수들은 지형, 토양, 식생, 기후 등의 다양한 환경 요인을 포함한다. 각 변수는 산사태 발생 가능성과 민감지역을 예측하는 데 중요한 역할을 하며, 이를 정확하게 수집하고 분석하는 것이 모델의 신뢰성과 정확성을 높이는 데 필수적이다. 이러한 변수들은 산사태 리스크 평가와 예방 조치에 중요한 기초 자료로 활용된다.

지형 변수는 산사태 리스크 모델에서 핵심적인 역할을 한다. 경사(Slope)는 지형의 경사도를 나타내며, 경사가 급할수록 산사태 발생 가능성이 높다. 이 변수는

디지털 고도 모델(DEM)을 사용하여 계산된다. 향(Aspect)은 경사면의 방향을 나타내며, 태양광 입사각과 강우 집중 방향에 영향을 준다. DEM 데이터를 기반으로 경사면의 방향을 계산한다. 고도(Altitude)는 지형의 높이를 나타내며, 고도 변화는 물의 흐름과 토양의 침식에 영향을 미친다. DEM 데이터로부터 고도를 추출하여 사용한다. 평면 곡률(Planform curvature)과 측면 곡률(Profile curvature)은 지형의 수평적 및 수직적 곡률을 나타내며, 물의 흐름 경로와 속도를 결정한다. 하천강도지수(SPI, Stream Power Index)는 물의 흐름이 지형에 미치는 힘을 나타내며, 침식과 퇴적 과정을 반영한다. 지형습윤지수(TWI, Topographic Wetness Index)는 지형의 수분 함량을 나타내며, 산사태 발생 가능성에 영향을 준다. 이들 변수는 모두 브이월드 오픈마켓에서 제공하는 DEM 데이터를 기반으로 제작하였다.

토양 변수는 지질과 토양 특성을 통해 산사태 발생 가능성을 평가한다. 모암, 모재(Basement Rocks)는 지질 유형을 나타내며, 암석의 특성이 산사태 발생에 중요한 영향을 미친다. 이 변수는 토양도(1:25,000) 데이터를 사용하여 구축된다. 유효토심(Soil Depth)은 토양의 깊이를 나타내며, 깊은 토양은 물을 더 많이 저장할 수 있다. 배수등급(Drainage Grade)은 토양의 배수 능력을 나타내며, 배수가 잘되지 않는 토양은 산사태 위험을 증가시킨다. 토양유형(Soil Type)은 토양의 물리적 특성을 나타내며, 산사태 발생 가능성에 중요한 영향을 미친다. 이들 변수는 흙토람 산림공간정보서비스 데이터를 통해 수집하였다.

식생 변수는 식생의 특성과 분포를 통해 산사태 위험을 평가한다. 경급(Diameter Class)은 식생의 직경 분포를 나타내며, 뿌리 시스템이 토양 안정성에 영향을 준다. 연령(Age Class)은 식생의 나이를 나타내며, 나이가 많은 식생은 더 강한 뿌리 시스템을 형성한다. 산림 유형(Forest Type)은 산림의 유형을 나타내며, 다양한 식생 유형이 산사태 위험에 미치는 영향을 평가한다. 이들 변수는 모두 산림공간정보서비스(2020) 데이터를 기반으로 구축하였다.

기후 변수는 강우 패턴과 극한 기후 조건을 통해 산사태 위험을 평가한다. 연평균 강우량(Annual Rainfall)은 연간 총 강우량을 나타내며, 많은 강우는 토양 포화를 유발하여 산사태 위험을 증가시킨다. 여름철(6-10월) 평균강우량(Summer Rainfall)은 여름철 동안의 평균 강우량을 나타내며, 집중 호우 기간을 반영한다. 1일 최대 강우량(Maximum Daily Rainfall)과 5일 최대 강우량(Maximum 5-Day Rainfall)은 각각 하루 및 5일 동안의 최대 강우량을 나타내며, 집중 호우의 영향을 반영한다. 일강우량 80mm 이상인 날(Days with Rainfall $\geq$ 80mm), 120mm 이상인 날(Days with Rainfall $\geq$ 120mm), 150mm 이상인 날(Days

with Rainfall $\geq 150\text{mm}$)은 각각 특정 강우량 이상을 기록한 일수를 나타내며, 집중 호우 빈도를 평가한다. 3일간 누적 강우 150mm 이상 횟수(Events with 3-Day Cumulative Rainfall $\geq 150\text{mm}$)는 연속된 3일 동안의 누적 강우량이 150mm 이상인 사건의 횟수를 나타내며, 장기간 강우의 영향을 평가한다. 이들 변수는 모두 기상정보포털 ASOS (Automated Synoptic Observing System), AWS (Automatic Weather System)데이터를 통해 수집하였다.

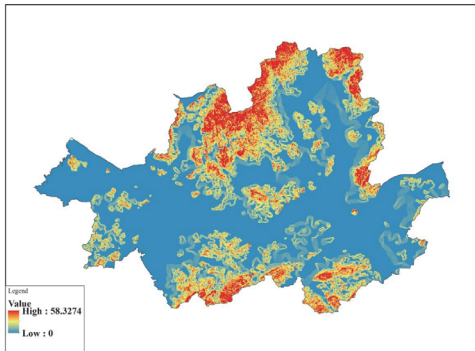
□ 환경변수 상관관계 분석

산사태 리스크 모델링에서 변수 간의 다중공선성을 평가하기 위해 피어슨 상관 계수(Pearson Correlation)를 사용하여 환경변수 간 상관관계 분석을 실시하였다. 피어슨 상관계수는 두 변수 간의 선형 관계를 측정하는 지표로, 상관 강도를 -1에서 1 사이의 값으로 나타낸다. 상관계수 값이 1에 가까울수록 두 변수는 강한 양의 상관관계를, -1에 가까울수록 강한 음의 상관관계를 가진다. 값이 0에 가까울수록 두 변수 간에는 거의 상관관계가 없음을 의미한다.

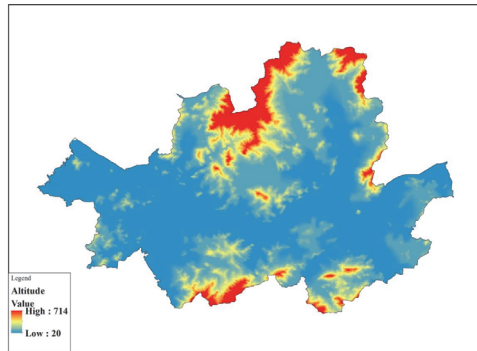
상관 분석의 목적은 모델에 포함된 변수들 간의 중복성을 파악하고, 다중공선성(multicollinearity)을 줄이는 데 있다. 다중공선성이 존재하면 모델의 예측력이 떨어지고, 해석 가능성이 낮아질 수 있기 때문에 이를 제거하는 것이 필수적이다. 특히 피어슨 상관계수 값이 -0.7 이하 또는 0.7 이상인 경우, 두 변수는 서로 유사한 정보를 제공할 가능성이 높다고 판단되어 중복된 변수로 간주된다. 이러한 변수를 모두 모델에 포함할 경우, 모델이 불필요하게 복잡해지고 과적합(overfitting) 문제를 야기할 수 있어 최종 모델에서 제외하였다.

상관 분석 결과, 모암 및 모재, 토양유형, 산림유형, 연평균강우량, 5일 최대 강우량, 일강우량 80mm 이상인 날, 일강우량 120mm 이상인 날 변수들은 서로 높은 상관성을 보여 최종 분석 모델에서 제외되었다. 예를 들어, 연평균강우량과 5일 최대 강우량은 모두 강우와 관련된 변수를 나타내며, 이 둘은 산사태 발생에 미치는 영향을 거의 동일하게 설명할 수 있다. 따라서 두 변수를 모두 모델에 포함할 경우, 정보의 중복성이 높아지고, 모델의 정확도보다 복잡성만 증가할 수 있기 때문에 하나의 변수만을 선택하거나 모두 제외하는 방식으로 처리하였다.

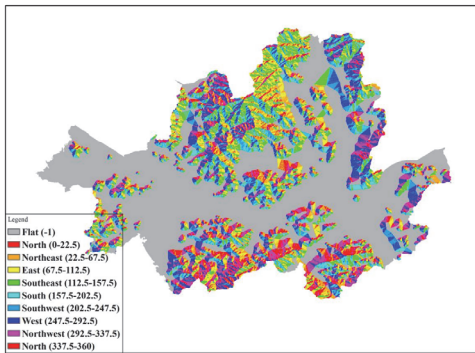
이러한 상관성 높은 변수를 제거함으로써 모델의 복잡성은 크게 줄어들었으며, 불필요한 중복성을 해소하였다. 이는 결과적으로 모델의 해석 가능성을 높였을 뿐만 아니라, 데이터 내 과적합을 방지하여 모델이 새로운 데이터를 분석할 때도 안정적인 예측을 할 수 있도록 도와주었다. 또한, 변수들이 제공하는 정보의 독립성을 확보함으로써 예측 결과의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있었다.



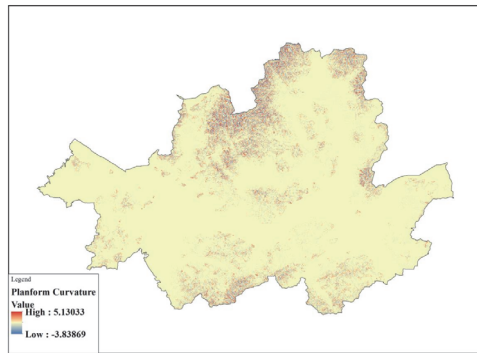
경사



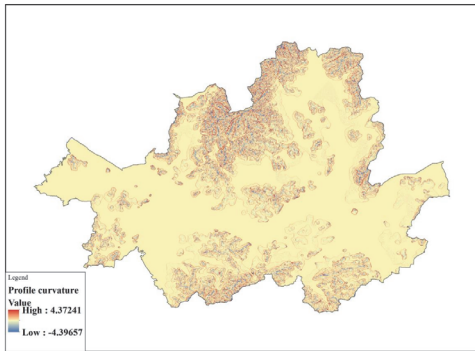
고도



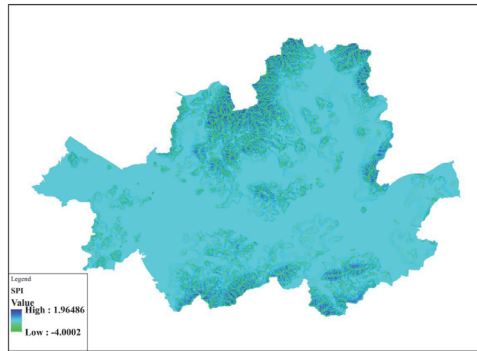
향



평면곡률



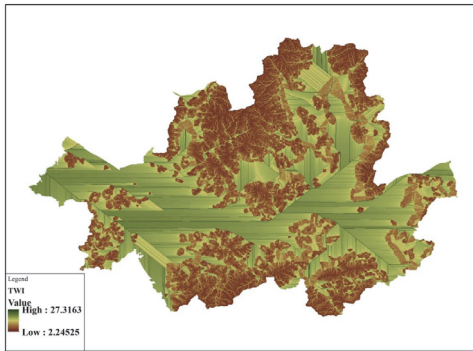
측면곡률



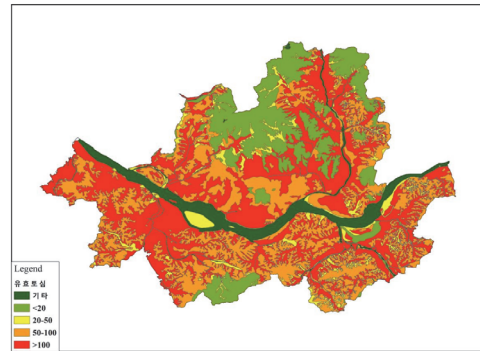
하천강도지수

[그림 3-9] 산사태 민감성 분석을 위한 환경변수 구축 결과

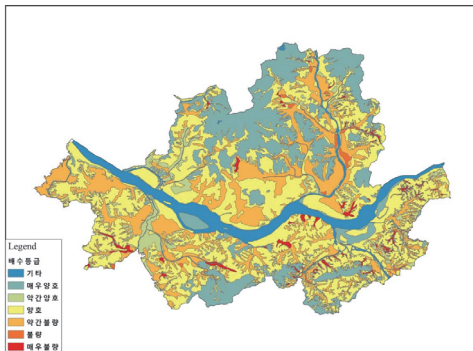
출처 : 연구진 작성



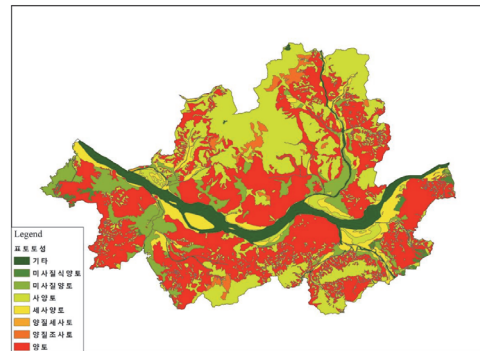
토양습윤지수



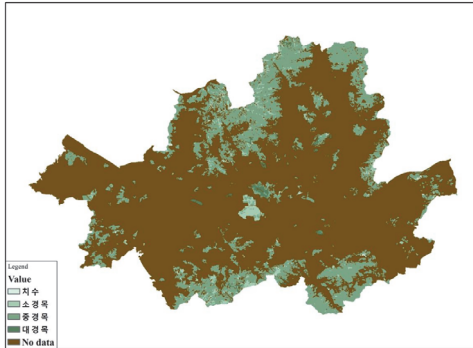
유효토심



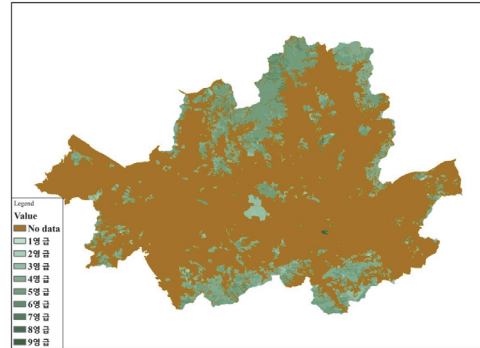
배수등급



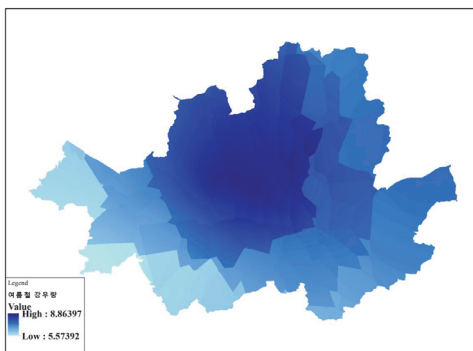
토양 유형



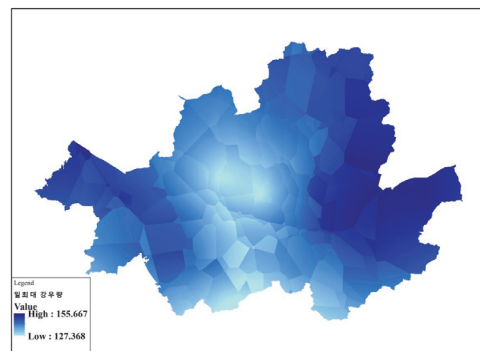
경급



영급



여름철(6~10월) 평균강수량



1일 최대 강수량

3) 앙상블 모형 구동

□ 앙상블 모형 구동 과정

산사태 민감지역 분석을 위해 앙상블 모형을 사용하였으며, 총 10개의 개별 모형(ANN, CTA, FDA, GAM, GBM, GLM, MARS, Maxent, SRE, XGBoost)으로 구성하였다. 산사태 민감지역 도출을 위한 앙상블 모형 구동 과정은 총 세 단계로 구분할 수 있다.

첫 번째 단계는 개별 모형 구축 및 평가이다. 각 예측 모형을 구축하여 산사태 민감지역을 예측하며, 비출현지점을 3회 생성하여 모형의 정확성을 높였다. 비출현지점은 산사태가 발생하지 않은 지역의 데이터를 기반으로 생성되며, 출현지점과 대비되는 데이터를 제공하여 예측 성능을 향상시킨다. 또한, 각 모형은 k-fold 교차검증 방식을 사용해 5회씩 구동되었다. k-fold 방식은 데이터를 여러 개의 폴드로 나누어 학습과 테스트를 반복하여, 과적합을 방지하고 모형의 안정적인 성능을 확보하는 방법이다. 각 모형의 성능은 정확도와 AUC (Area Under the Curve) 지표를 통해 평가되며, 개별 모형이 산사태 민감지역을 얼마나 정확하게 예측하는지 비교 분석을 진행한다.

두 번째 단계는 앙상블 모형 구축이다. 개별 모형의 예측 결과를 통합하여 하나의 앙상블 모형을 구성하였으며, 이 과정에서 가중 합산 방식을 이용하였다. 가중 합산 방식은 개별 모형의 성능에 따라 가중치를 부여하여, 보다 신뢰성 있는 예측 결과를 도출할 수 있도록 한다. 앙상블 모형은 단일 모델보다 예측 성능이 우수하며, 여러 모형의 결과를 결합함으로써 예측의 불확실성을 줄이고 신뢰성을 높이는 효과를 가져왔다.

세 번째 단계는 산사태 민감지역 도출이다. 최종적으로 선택된 가중 합산 방식 앙상블 모형을 통해 산사태 민감지역을 도출하였으며, 도출된 민감지역은 실제 산사태 발생 이력과 비교하여 검증되었다. 이 과정에서 정확도와 AUC 등의 성능 지표를 사용하여 모형의 성능을 평가하고, 예측력이 신뢰할 만한지 확인하였다.

□ 산사태 발생 데이터의 시간적 특성을 고려한 앙상블 모형 구동

산사태 민감지역을 정교하게 분석하기 위해 연도별 산사태 발생 데이터 기반의 민감지역 분석결과를 중첩하는 방식과 전체 연구 시기의 산사태 발생 데이터를 중첩하여 민감지역을 분석하는 방식을 모두 수행하고, 보다 적합한 결과를 연구에 최종적으로 활용하였다.

이는 서로 다른 시기에 발생한 산사태 정보를 바탕으로 모형을 구축할 때 분석결과의 신뢰성을 높이기 위해 적용되는 방식이다(Kim *et al.* 2023).

첫 번째 방법인 연도별 산사태 발생 데이터 기반의 민감지역 분석결과를 중첩하는 방식은 각 연도의 산사태 민감 지역을 이항지도(binary map)로 도출한 뒤, 이 지도들을 중첩하여 민감지역을 분석하는 방식이다. 중첩 횟수에 따라 산사태 민감성을 등급별로 구분하여, 해당 지역의 위험도를 평가한다. 중첩된 횟수가 많을수록 해당 지역은 산사태 위험이 지속적으로 높은 지역으로 간주되며, 이를 통해 시간이 지나도 위험도가 변하지 않는 고위험 지역을 식별할 수 있다. 이러한 방식은 다양한 연도에 대해서 지속적으로 산사태에 민감한 지역을 한눈에 파악하는데 도움을 주는 장점이 있다. 하지만, 특정 연도의 기상 조건이나 환경 변화에 민감하여, 일부 연도의 이상치 데이터가 전체 시기의 민감지역 분석 결과를 왜곡할 가능성이 있다는 단점이 있다. 주로 대상지가 국가규모 수준으로 방대하고, 사용 가능한 산사태 발생 데이터가 10년 이상의 장기간에 걸쳐 존재할 때 거시적 관점에서 민감지역을 분석할 때 적합한 방식이다.

두 번째 방법인 전체 연구 시기의 산사태 발생 데이터를 종합하여 민감지역을 분석하는 방식은 연구 시기 내 모든 산사태 발생지점과 다양한 환경변수를 통합하여 진행된다. 이 분석에서는 연도별로 구축된 환경 데이터를 평균하여 반영함으로써, 연구 대상지의 일반적인 산사태 특성을 반영한 민감지역의 도출이 가능하다. 또한, 확률지도(probability map)를 활용해 산사태 민감성을 시각적으로 표현하여, 산사태 발생 가능성이 높은 고위험 지역을 명확히 파악할 수 있다. 이 방법은 환경변수의 평균으로 인해서 값이 평준화되는 과정을 거치므로, 특정한 사건과 시기에 초점을 맞춘 분석과 결과의 해석에는 부적합하다는 한계점이 있다. 반면, 여러 산사태 발생 사건과 다양한 시기에 적용할 경우, 여러 해의 데이터를 기반으로 평균값을 사용하여 단일 연도의 이상치 데이터에 덜 민감하다는 장점이 있다. 이를 통해 더욱 신뢰성 있는 산사태 발생 가능성을 추정할 수 있다는 장점이 있다.

연구 대상지의 규모, 활용 가능한 산사태 발생 데이터의 시간적 규모 등에 따라서 두 가지 방법 중에 더욱 적합한 방법론은 달라질 수 있다. 본 연구에서는 서울시의 산사태 민감지역 결과의 신뢰성을 높이는데 중점을 둔 결과, 최종적으로 두 번째 방법인, 전체 연구 시기의 산사태 발생 데이터를 종합하여 분석하는 방식이 더 적합한 것으로 나타났다.

4. 건축물 산사태 리스크 분석 모델 개발

1) 입력데이터 구축

□ 지형정보 구축

LAHAHRZ를 이용한 산사태 피해범위 분석을 위해 관련 지형정보 구축이 필요하다. 구축이 필요한 정보는 크게 지형관련 정보와 토양 관련 정보로 나누어 볼 수 있다.

첫째로 지형관련 정보를 구축할 필요가 있다. 지형의 높낮이를 나타내는 디지털 표고 모델(DEM)은 LAHAHRZ 분석을 위해 필수적이다. 또한, DEM 데이터를 이용하여 경사도 및 지형 특성 데이터를 구축할 수 있다. 사면의 방향, 경사도 등 데이터를 구축함으로써 토석류의 흐름을 분석할 수 있다. 다음으로는 지질 및 토양 데이터 구축이 필요하다. 지역의 지질 구조, 암석 유형, 토양 유형 등의 데이터를 구축할 필요가 있다. 본 연구는 흙토람²⁷⁾에서 제공하는 토양도 등 데이터를 이용하여 데이터를 구축하였다.

□ 건축물대장 지오코딩

건축물대장 데이터의 지오코딩 또한 biz-gis의 지오코딩툴을 이용하였다. 건축물대장에는 지번주소와 도로명주소가 모두 포함되어있다. 지오코딩을 위한 건축물대장 자료는 2022년 4분기 시점의 자료를 사용하였다.

건축물대장의 주소정보는 지번주소를 사용하였다. 건축물대장은 도로명주소가 도입되기 이전 사용승인된 건축물의 경우 도로명주소가 없거나 부정확한 경우가 많아 지번주소를 사용하였다. 건축물대장의 주소정보는 시도, 시군구, 법정동, 본번, 부번의 형태로 저장되어있으며, 추가적으로 건축물 동 명칭 정보가 있다. 지오코딩을 위해 주소정보를 하나로 구성하고 biz-gis의 지오코딩툴에 입력하였다.

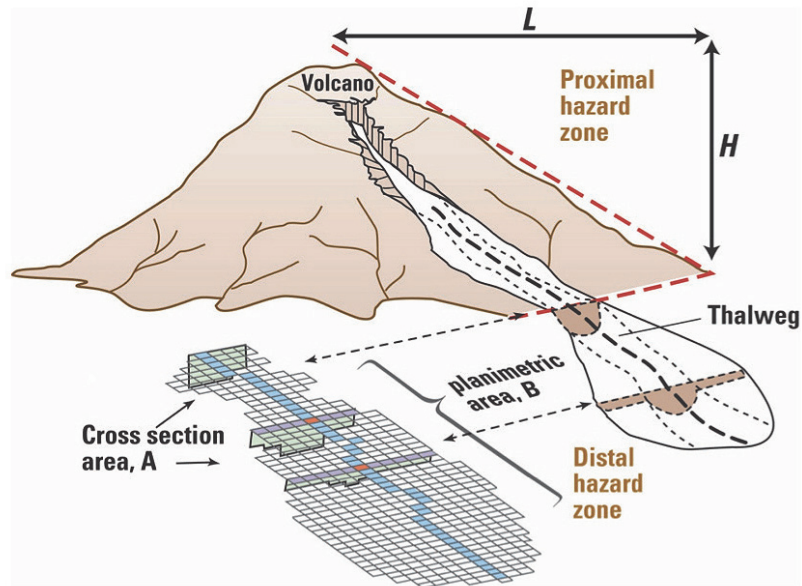
2022년 4분기 기준 건축물대장의 서울시 전체 건축물은 596,244동이며, 지오코딩에 따른 매칭성공률은 약 94%로 나타났다. 결과적으로 정좌표 559,307동, 인근좌표 69동, 도로중심좌표 99동, 정제실패 36,769동으로 나타났다.

27) 흙토람. 토양도 신청. <https://soil.rda.go.kr/community/application.do>. 2024.05.15. 접속

2) 피해범위 분석

□ LAHARZ를 활용한 산사태 피해 범위 추정 방법

LAHARZ는 GIS 도구로 화산성 이류(lahar), 토석류(debris flow), 암석사태(rock avalanche)등의 위험 지역을 자동으로 계산하여 지도에 나타내는 도구이다. 이 도구는 DEM 데이터를 기반으로 지형 분석을 수행하여 자연재해 발생 시 물질의 확산 경로를 모델링한다. LAHARZ의 토석류(debris Flow) 기능은 산사태나 토석류의 흐름에 의한 잠재적 범람 지역을 계산한다.



[그림 3-10] LAHARZ 모델을 사용한 화산성 이류 및 토석류 위험 구역

출처 : Schilling, Steve P.. 2014. Laharz_py: GIS Tools for Automated Mapping of Lahar inundation Hazard Zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073. USGS. p.5. <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1073/>. 2024.06.03. 접속

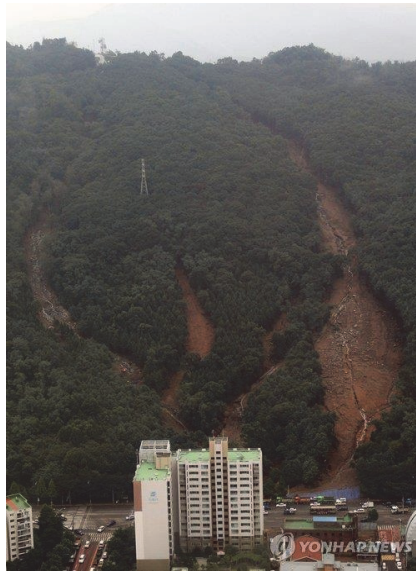
LAHARZ의 토석류 기능은 토석류의 부피를 입력 값으로 받아 이동 경로와 범위를 예측하며, 이류의 부피가 증가함에 따라 횡단면적(A)과 평면 면적(B)이 어떻게 변화하는지를 모델링한다. 횡단면적과 평면 면적은 각각 토석류의 부피(V)와 관계가 있다.

토석류의 횡단면적은 부피와 비례하여 증가하며, 예측된 횡단면적은 토석류가 특정 지점에서 얼마나 넓게 퍼질지를 나타낸다. 이 관계는 $A = 0.01 \times V^{2/3}$ 공식을 사용하여 계산되며, 그래프에서 횡단면적은 부피가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 모습을 보여준다. 평면 면적도 부피와 비례하여 증가하며, 평면 면적은 토석류가 지형을 따라 퍼져나가는 범위를 예측하는 데 사용된다. 이 관계는 $B = 20 \times V^{2/3}$ 공식을 사용하여 계산되며, 평면 면적 그래프는 부피가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 모습을 보여준다.

□ LAHARZ 구동을 통한 산사태 피해 범위 분석

본 연구에서는 건축물 단위의 산사태 리스크 분석을 위해 서울특별시 중에서도 산지에 인접한 건축물이 많은 관악구를 대상으로 LAHARZ 모델을 구동하였다. 모델 구동을 위해서 국토지리정보원이 제공하는 1:5,000 수치지형도를 사용하여 10m 해상도의 DEM (Digital Elevation Model) 데이터를 구축하였다. 이 고 해상도 지형 데이터는 산사태의 이동 경로와 확산 범위를 예측하는 데 필수적인 정보를 제공하였으며, ArcGIS를 통해 데이터를 처리하여 LAHARZ 모델의 입력 데이터 세트를 구성하였다. 산사태 민감성 모델을 사용하여 식별된 산사태 발생 가능성이 높은 지점에 대해 LAHARZ 모델을 구동하여 산사태로 인한 토석류의 이동 경로와 피해 범위를 예측하였다. 이를 통해 관악구 내에서 산사태 발생 시 피해를 입을 가능성이 높은 지역을 구체적으로 평가하고 분석하였다.

Bernard *et al.* (2021)는 LAHARZ 모델을 사용하여 산사태 이후 발생한 토석류 매몰 지역을 예측하고, 과거 데이터에 기반한 부피 값을 적용하여 매몰 범위를 평가한 연구를 진행하였다. 이 연구는 토석류 부피 값 설정과 매몰 범위 예측의 중요성을 강조하며, 과거 사례 데이터를 활용한 분석이 모델의 신뢰성을 높이는 데 기여하였음을 보여주었다. 선행연구의 이러한 방식을 참조하여, 본 연구는 2011년 우면산 산사태 사례를 참고하였다. 우면산은 관악구와 마찬가지로 유효토심이 50~100cm인 지형적 특성을 가지고 있으며, 이는 두 지역의 토양 특성이 유사함을 나타낸다. 우면산 산사태 민감성이 높은 지점에 10,000m³의 부피 값을 적용한 결과, 과거 2011년 우면산 산사태 피해 범위와 유사한 결과가 도출되었다. 이를 통해 10,000m³의 부피 값이 관악구 산사태 위험 지역 예측에 있어 합리적인 기준이 될 수 있음을 입증하였다. 이러한 검증 과정을 통해 LAHARZ 모델의 신뢰성과 예측 정확도가 더욱 향상되었다.



우면산의 실제 산사태 피해 범위



우면산 산사태 지역 LAHARZ 테스트 구동 결과

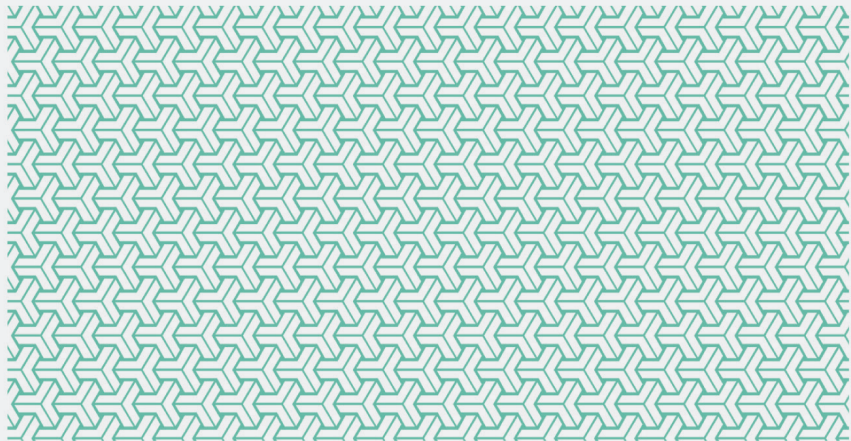
[그림 3-11] 우면산의 실제 산사태 피해 범위와 적정 부피값 설정을 위한 LAHARZ 테스트 구동 결과

출처 : (좌상) 이정현. 2014. 2년반 보고서에도 '못끝내는' 우면산 산사태 공방(종합). 연합뉴스. 3월 13일 기사. 2024.07.01. 접속; (우상) 문성규. 2012. 서울시 "우면산 산사태 피해지 96% 복구". 연합뉴스. 5월 30일 기사. 2024.07.01. 접속; (하) 연구진 작성

3) 건축물 단위 리스크 분석

건축물 단위 리스크 분석은 산사태 및 토석류와 같은 자연 재해 발생 시 건축물에 미칠 피해를 예측하는 과정이다. 본 연구에서는 LAHARZ 모델을 활용하여 토석류의 이동 경로와 확산 범위를 시뮬레이션하였다. 이를 통해 건축물의 위치와 주변 지형적 특성을 분석하고, 토석류가 특정 건축물에 먼저 도달할 경우에 산사태 리스크가 있다고 평가한다. DEM 데이터는 지형의 높낮이와 경사도 정보를 제공하며, 토석류의 이동 경로를 예측하는 데 사용된다. 건축물대장은 건축물의 위치와 구조적 특성을 포함하고 있어, 분석에 필요한 기본 데이터를 제공한다.

제4장 건축물 산사태·홍수·화재 리스크 연계 분석



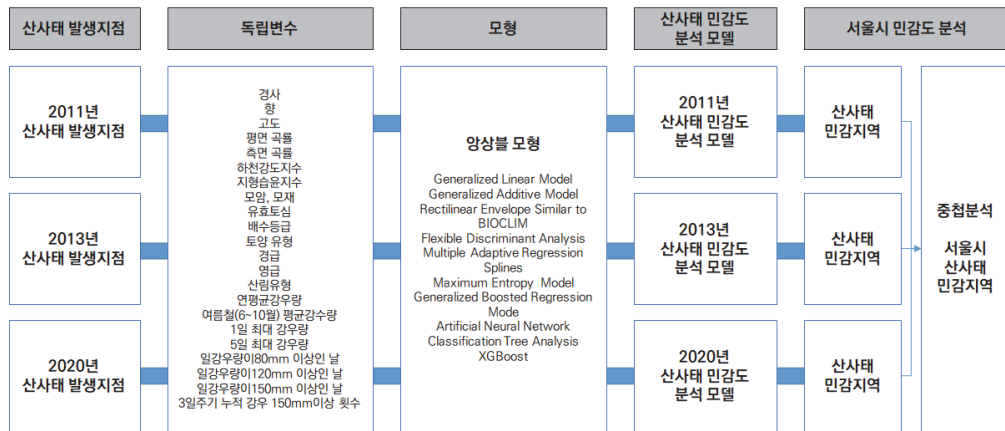
1. 건축물 산사태 리스크 분석
2. 건축물 재난 리스크 연계 분석
3. 소결

1. 건축물 산사태 리스크 분석

1) 산사태 민감지역 분석 결과

□ 산사태 민감성 연도별 중첩 분석

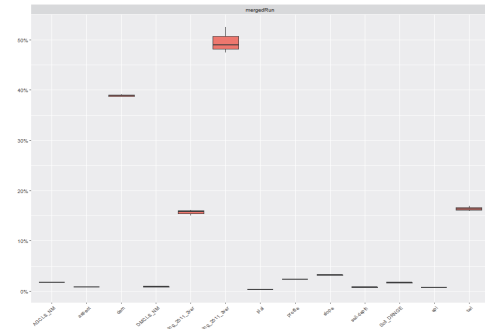
서울시 산사태 민감지역 분석을 위해 연도별 산사태 분석 모델을 구축하고, 개별 모형의 서울시 산사태 민감지역을 도출한 후 중첩분석을 하는 방식으로 서울시 산사태 민감지역을 도출하였다.



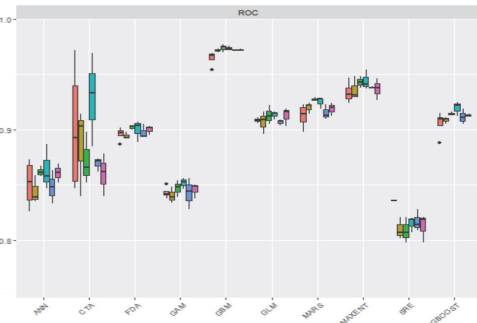
[그림 4-1] 연도별 산사태 민감지역 분석

출처 : 연구진 작성

연도별 산사태 민감성 분석에서는 기후 변수들과 DEM이 중요한 변수로 높은 중요도를 보였다. 이 변수들은 산사태 발생 가능성에 큰 영향을 미치며, 모형의 예측 성능에 핵심적인 역할을 했다. 연도별 분석 결과에 따르면, 2011년, 2013년, 2020년의 AUC (Area Under the Curve) 값은 각각 0.945, 0.984, 0.958로 나타났다. 이는 모형의 예측 성능이 매우 높음을 보여준다. AUC 값은 예측 성능을 평가하는 대표적인 지표로, 1에 가까울수록 예측력이 뛰어나다는 것을 의미한다. 연도별 AUC 값이 0.9 이상이라는 것은, 해당 연도에서 산사태 민감성 모형이 고위험 지역을 효과적으로 식별하고 평가할 수 있었음을 나타낸다. 또한, 개별 모형에서도 AUC 값이 모두 0.7 이상으로 나타나, 이는 각각의 모형이 독립적으로도 양호한 예측 성능을 보였음을 시사한다. 또한, 연도별 분석에서 산사태 민감 지역에 위치한 산사태 발생지점의 비율은 2011년 88.2% (232지점), 2013년 96.8% (182지점) 2020년 91.1% (488지점)로 나타났다.



2011년 변수 중요도



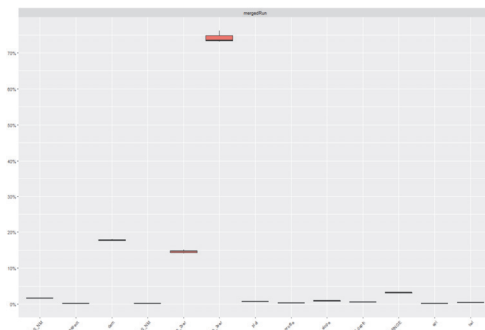
2011년 개별 모형 AUC



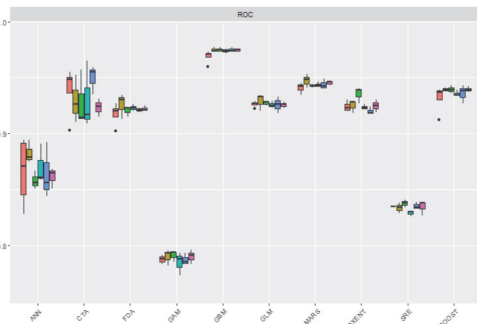
2013년 변수 중요도



2013년 개별 모형 AUC



2020년 변수 중요도



2020년 개별 모형 AUC

[그림 4-2] 연도별 산사태 민감지역 변수 중요도 및 개별 모형 AUC값

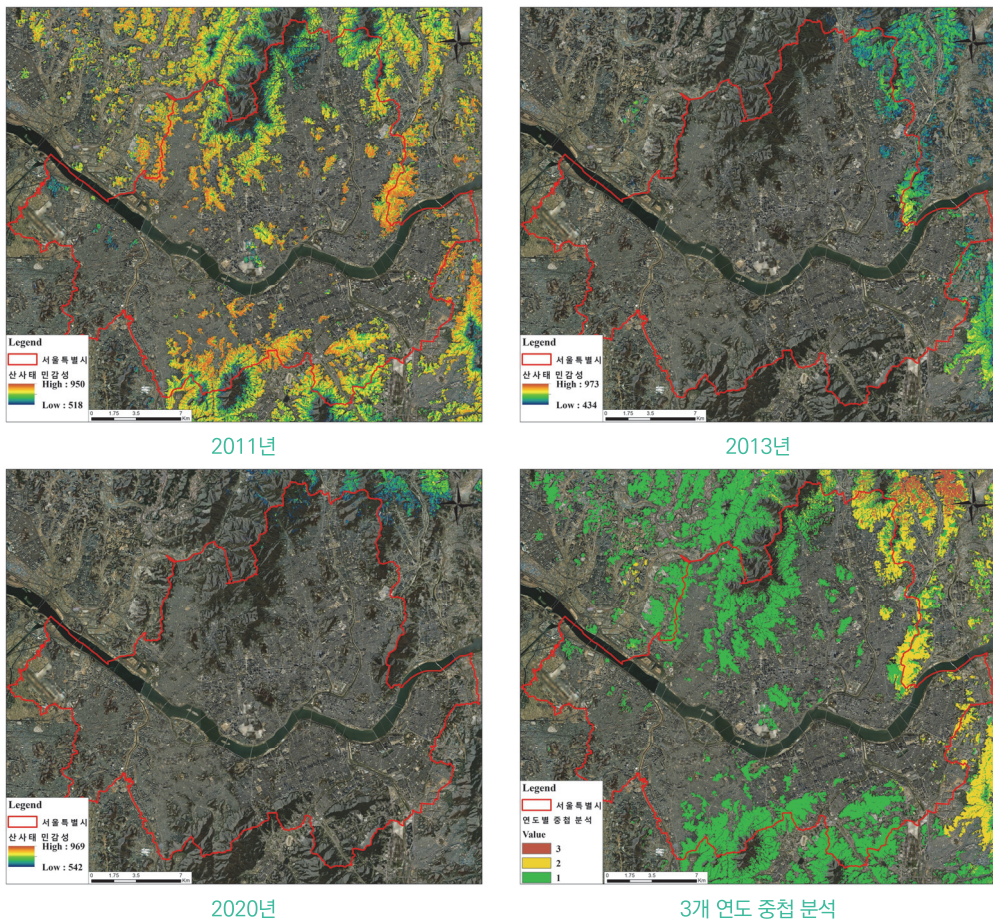
출처 : 연구진 작성

연도별 분석은 각 연도의 기상 조건, 토양 상태, 지형 변화를 정확하게 반영하여 높은 신뢰성을 보였다. 그러나 중첩 결과에서는 몇 가지 단점이 나타났다.

먼저, 연도별 기상 조건과 지형적 특성이 달라지기 때문에 민감지역의 범위에 큰 차이가 발생한다. 이러한 차이로 인해, 폭우와 같은 특정 연도의 극단적인 기상 조건이 과도하게 반영되어 해당 해의 산사태 위험이 과대 평가되거나 왜곡된 예측 결과가 나타났다. 이는 종합적으로 산사태 민감지역을 도출하기 위해서 각 연

도의 데이터를 중첩할 때, 분석결과와 일관성을 해치고, 실제 위험 지역을 정확하게 파악하는 데 어려움을 초래하였다. 도출된 결과를 살펴보았을 때, 연도별 중첩 분석을 통한 산사태 민감지역 분석은 단기적인 데이터에 크게 의존하는 경향이 있어 장기적인 산사태 위험을 충분히 설명하지 못하였다.

결론적으로, 연도별 분석은 각 연도의 산사태 민감지역을 정확히 평가하고 예측하는데 있어서는 신뢰성 높은 결과를 제공했다. 그러나, 연도별 결과의 중첩 시에는 단기적 데이터의 한계와 기상 조건의 과도한 반영 등으로 인해 활용성과 해석의 용이성 면에서 한계점이 나타났다. 연도별 데이터를 중첩하여 민감지역을 도출하는 방식은 중첩된 결과가 복잡하고 해석이 어려워 실질적인 재해 예방 및 대응 전략 수립에 제한이 될 것으로 판단되었다.



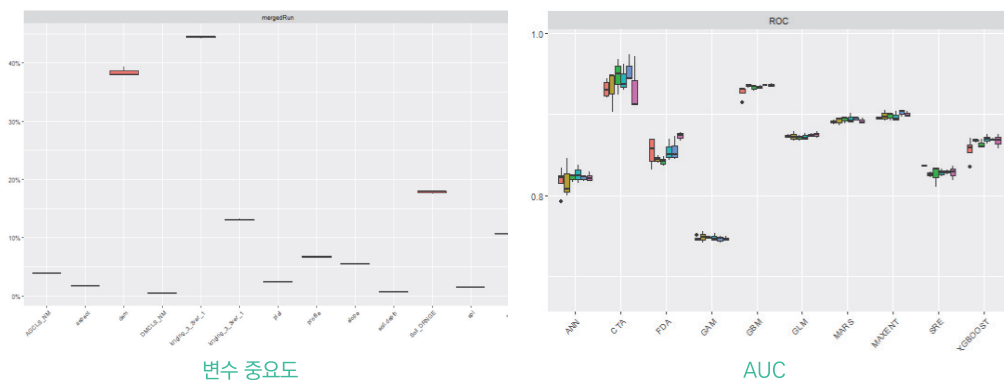
[그림 4-3] 연도별 산사태 민감지역 및 중첩분석 지도

출처 : 연구진 작성

□ 산사태 민감성 종합 분석

산사태 발생지점과 다양한 환경 변수를 통합하여 진행한 종합 분석에서 AUC 값은 0.934로 나타났다. 이는 연도별 분석 결과와 유사하게 높은 수준의 예측력을 보여주며, 여러 변수를 종합적으로 고려한 결과, 산사태 발생 가능성을 정확히 평가할 수 있음을 입증한다. 이 분석 방식으로 여러 데이터셋을 통합하여 고위험 지역을 정확하게 식별할 수 있고, 모델 성능의 신뢰성을 확인하였다.

종합 분석에서 중요한 변수로는 여름철 강우량, DEM, 배수등급 등이 선정되었다. 특히, 여름철 강우량과 DEM은 산사태 발생에 매우 중요한 영향을 미치는 변수로 확인되었으며, 이들 변수는 산사태 발생 가능성을 크게 좌우한다. 또한, 배수등급과 기타 강우 관련 변수들도 예측 정확도 향상에 중요한 역할을 했다. 이러한 결과는 기후와 지형 변화를 종합적으로 고려하여 산사태 위험 지역을 더욱 효과적으로 평가할 수 있음을 보여준다. 또한, 중첩 분석에서 산사태 민감 지역에 위치한 산사태 발생지점의 비율은 88.4% (861지점)로 나타났다.



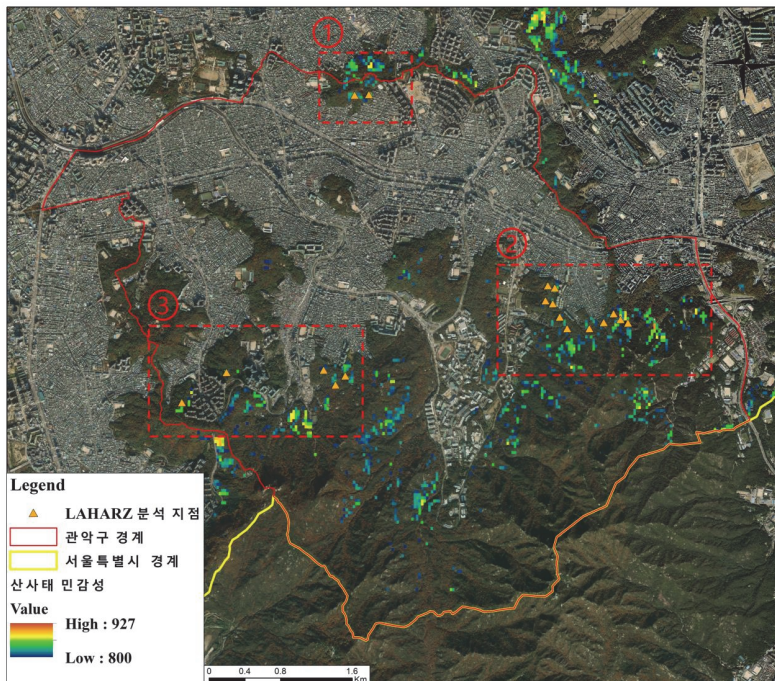
[그림 4-4] 산사태 민감지역 종합 분석 변수 중요도 및 개별 모형 AUC값

출처 : 연구진 작성

산사태 민감성 종합 분석의 주요 강점은 지형, 토양, 기후, 식생 등 다양한 환경 변수를 통합적으로 분석함으로써 포괄적인 산사태 위험 평가가 가능하다는 점이다. 산사태 발생 확률지도를 통해 산사태 발생 가능성이 높은 지역을 명확하게 시각적으로 나타낼 수 있다. 확률지도는 각 지점의 위험도를 직관적으로 표현함으로써 고위험 지역을 쉽게 식별할 수 있게 해주며, 특히 건축물과 인접한 지역에서의 산사태 위험 평가에 중요한 자료로 활용된다. 확률지도를 통한 시각화는 산사태 발생 가능성을 쉽게 파악할 수 있도록 하였으며, 민감성이 높은 지역을 명확하게 선정하는데 도움을 주었다. 민감성이 높은 지점들을 LAHARZ 모델 분석에 활용하여 토석류의 이동 경로와 피해 범위를 더욱 구체적으로 예측할 수 있었다.

2) 산사태 민감지역 분석 기반 산사태 발생 시작지점 추정 결과

산사태 민감성 종합 분석 결과를 바탕으로, 확률지도를 통해 산사태 민감성이 80% 이상인 지역을 도출하였다. 이 중에서 건축물과 인접한 지역을 우선적으로 선정하여 LAHARZ 모델을 적용하였다. LAHARZ 모델은 산사태 발생 시 토석류의 흐름과 피해 범위를 예측하는 도구로, 건축물에 미치는 영향을 평가하는 데 사용된다. LAHARZ 모델의 구동 지점으로는 관악구의 19개 지점이 선정되었다. 이 지점들은 산사태 민감성이 높아 건축물이 직접적인 피해를 받을 수 있는 고위험 지역으로 판단되어 선정되었다. 모델을 통해 각 지점에서의 토석류 흐름 경로를 예측하고, 건축물에 대한 피해 범위와 위험 수준을 상세히 분석하였다.



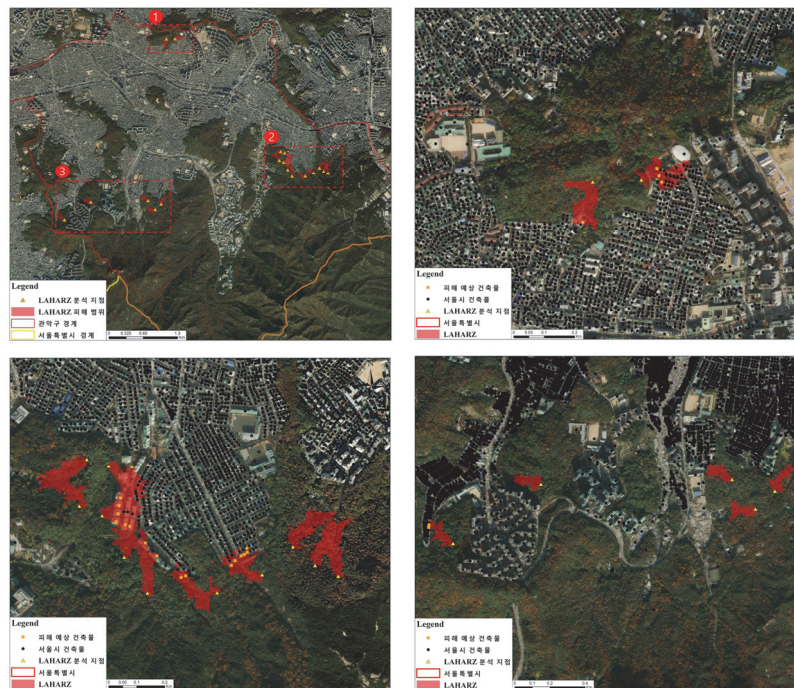
[그림 4-5] 관악구 LAHARZ 구동 지점

출처 : 연구진 작성

3) 산사태 피해범위 추정 결과

□ 피해 건축물 산정

본 연구에서는 LAHARZ 모델을 활용하여 관악구 내 산사태 위험 지역을 분석하고 건축물 피해 가능성을 평가하였다. 산사태 민감성 80% 이상으로 식별된 19개의 지점을 대상으로, 산사태 발생 시 고위험 지역을 선정한 후 토석류의 이동 경로와 범위를 분석하였다. 이 과정에서 10개의 지점에서 산사태 피해 범위 내에 건축물이 존재하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 건축물의 산사태 피해 가능성을 평가하였다.



[그림 4-6] 관악구에 대한 LAHARZ 구동 결과

출처 : 연구진 작성

피해범위 내에 건축물이 존재하는 10개의 지점에서 67개의 건축물이 산사태 피해 범위 내에 위치하는 것으로 확인되었다. 다만, 건축물의 산사태 피해는 토석류에 의해 발생하며, 건축물이 토석류의 흐름을 방해하는 댐의 역할을 하기 때문에 산림에서 멀리 있는 건축물은 산사태의 직접 영향을 받지 않을 가능성이 높다. 이에 따라 직접적인 산사태 피해 건축물 산정은 토석류에 1차적으로 접하는 건축물로 재산정 할 필요가 있다.



0 25 50 m

- 산사태위험건축물_기존
- 건축물
- 산사태 범위_기존

기존 건축물 산사태 리스크 산정 방식



0 25 50 m

- 산사태위험건축물_기존
- 건축물
- 산사태 범위_개선

개선된 건축물 산사태 리스크 산정 방식

[그림 4-7] 건축물 산사태 리스크 산정 방식 개선 개념

출처 : 연구진 작성

□ 피해 건축물 재산정

건축물의 지형적 특성을 고려하여 토석류 이동경로 상의 첫 번째 건축물을 파악한 결과, 총 27개의 건축물이 산사태 피해가 예상되는 건축물로 선정되었다. 건축물 유형별로는 아파트 14동, 다가구 및 다세대 주택 6동, 단독 주택 6동, 아파트 상가 1동이 포함되었다. 런아웃 모델 기반의 산사태 피해 범위 분석을 통해 산사태 발생으로 인한 토석류로 인한 피해가 예상되는 건축물을 구체적으로 도출할 수 있었다.

[표 4-1] 산사태 피해 예상 건축물의 용도 및 구조

번호	용도	구조	번호	용도	구조
1	다세대주택	콘크리트위 칼라 아스팔트 싱글	15	아파트	평슬라브
2	공동주택	(철근)콘크리트	16	아파트	평슬라브
3	단독주택	스라브	17	아파트	평슬라브
4	주택	세멘와즙	18	다세대주택	평슬라브
5	주택	세멘와즙	19	아파트	(철근)콘크리트
6	주택	스라브	20	아파트	(철근)콘크리트
7	아파트	평슬라브	21	연립주택	평슬라브
8	아파트	평슬라브	22	단독주택	경사지붕
9	아파트	평슬라브	23	주택	스라브위기와
10	아파트	평슬라브	24	다세대주택	평슬라브
11	아파트	평슬라브	25	아파트	평슬라브
12	아파트	평슬라브	26	다세대주택	평슬라브
13	생활편의시설외 1	평슬라브	27	단독주택	(철근)콘크리트
14	아파트	평슬라브			

출처: 연구진 작성

LAHARZ 모델을 통해 토석류의 이동 경로 내에 위치한 건축물을 구체적으로 파악함으로써, 산사태로 인한 건축물 피해 가능성을 예측할 수 있었다. 특히, 아파트와 다세대 주택과 같은 대규모 건축물은 산사태 발생 시 대규모 인명 및 재산 피해를 입을 가능성이 높다고 판단된다. 상대적으로 규모가 작은 단독 주택과 상가 역시 건축물의 위치와 토석류의 흐름에 따라 산사태 피해를 입을 수 있는 것으로 나타났다. 분석 결과는 산사태 발생 가능성이 높은 지역에서 토석류로 인한 건축물 피해를 구체적으로 예측할 수 있는 중요한 자료를 제공하였다. 이를 통해 산사태 피해 범위 내의 건축물을 명확하게 파악함으로써, 대책 수립이 필요한 건축물을 도출하는데 기여하였다.

□ 결과 요약

건축물 산사태 리스크 분석 모델을 통한 건축물의 산사태 리스크 분석은 두 단계로 구성된다. 첫째, 다양한 환경 변수, 지형, 토양, 기후 등을 통합하여 산사태 발생 가능성이 높은 지역을 도출하고, 건축물에 미치는 영향을 평가하였다. 둘째, LAHARZ 모델을 활용하여 산사태 민감성이 높은 지점에 대해 토석류의 이동 경로와 피해 범위를 예측하였다.

분석 과정에서는 DEM과 LAHARZ 시뮬레이션을 통해 산사태 발생 시 토석류의 이동 경로를 파악하고, 건축물에 미치는 영향을 구체적으로 평가하였다. 특히, 산사태 민감성 80% 이상으로 분류된 19개 고위험 지점 중 10개 지점에서 건축물이 피해 범위 내에 포함되는 것을 확인하였다.

산사태 피해 범위에 속하는 67개의 건축물 중 토석류 흐름의 특성을 고려할 때 실제 피해를 입을 것으로 예상되는 건축물은 27개로 도출되었다. 아파트 14동, 다세대 및 다가구 주택 6동, 단독 주택 2동, 아파트 상가 1동이었다. 피해 범위 분석을 통해 산사태 발생 시 피해가 예상되는 건축물을 명확히 도출할 수 있었다.

2. 건축물 재난 리스크 연계 분석

1) 개별모형 분석 결과

서울시 전체 중 일부 지역인 관악구를 건축물 재난 리스크 연계 분석을 위한 시범 대상지로 설정하였다. 개별모형 분석 결과 서울시 내에서 관악구는 상대적으로 건축물 화재, 홍수, 산사태 리스크가 모두 높은 지역에 해당하여 관악구를 시범 대상지로 선정하였다.

[표 4-2] 건축물 재난 유형별 리스크

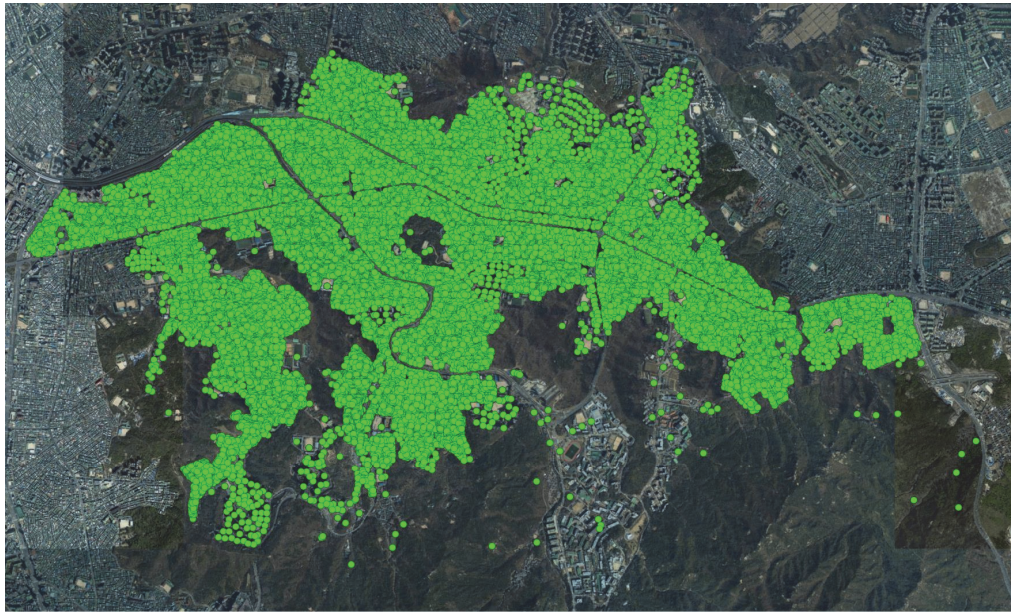
유형	화재	홍수	산사태
리스크 낮음	23,674동 (73.80%)	31,633동 (98.61%)	32,012동 (99.85%)
리스크 높음	8,405동 (26.20%)	446동 (1.39%)	67동 (0.15%)
전체	32,079동	32,079동	32,079동

출처: 연구진 작성

관악구의 전체 건축물은 32,079동이며 이 중 화재 리스크가 높은 건축물은 총 8,405동으로 약 26.2% 수준으로 나타났다. 화재 리스크가 높은 건축물은 전체 재난유형 중 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 이는 화재가 건축물에 피해를 입히는 재난 중 가장 시급히 대응해야할 유형임을 말한다. 이같은 결과는 실제 건축물 피해 이력에서도 화재 관련 피해 사례가 가장 많았던 것을 반증하는 것이다. 또한, 화재 리스크가 높은 건축물은 관악구 대부분의 지역에 상대적으로 고르게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

홍수리스크가 높은 건축물은 전체 32,079동 중 446동으로 약 1.39%를 차지하며 화재리스크가 높은 건축물에 비해 매우 낮은 비율을 차지하고 있다. 홍수 리스크가 높은 건축물은 대체로 하천 주변 및 큰 도로 주변에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 하천 범람으로 인한 건축물의 침수피해 비중이 높기 때문인 것으로 판단된다.

산사태 리스크가 높은 건축물은 전체 건축물 중 67동으로 가장 적은 수가 있으며, 약 0.15%를 차지하고 있다. 홍수 및 화재 리스크가 높은 건축물의 분포와 달리 산사태 리스크가 높은 건축물은 매우 일부 지역에 분포하고 있다. 이는 실제 산사태 민감도가 높은 지점이 관악구 내에 18지점으로 매우 적고, 산사태 발생 시 토석류에 의한 피해를 입을 것으로 예상되는 지점은 더욱 적기 때문이다. 뿐만 아니라, 토석류의 이동 경로까지 고려한다면 더욱 적은 27개 수준으로 상대적으로 산사태 리스크는 다른 리스크에 비해 낮다고 볼 수 있다.

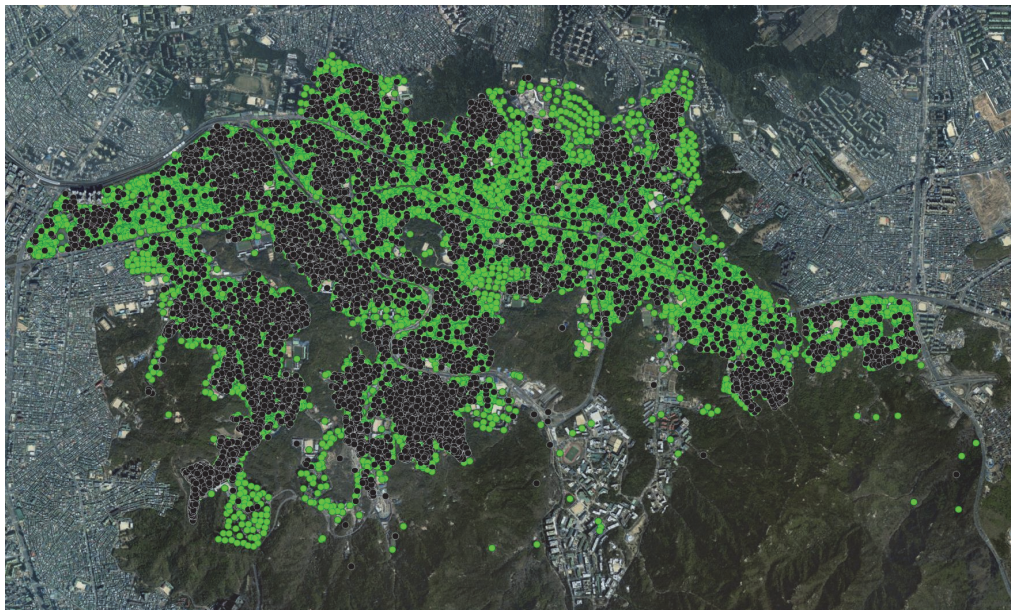


0 1,000 2,000 m

범례

● 건축물

관악구 건축물 분포



0 1,000 2,000 m

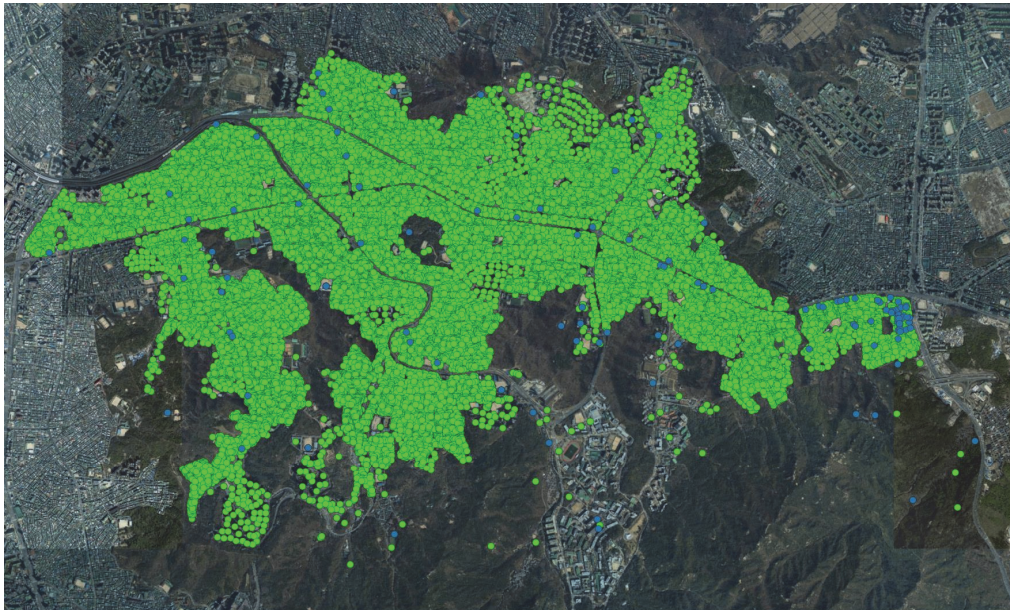
범례

● 화재위험 ● 건축물

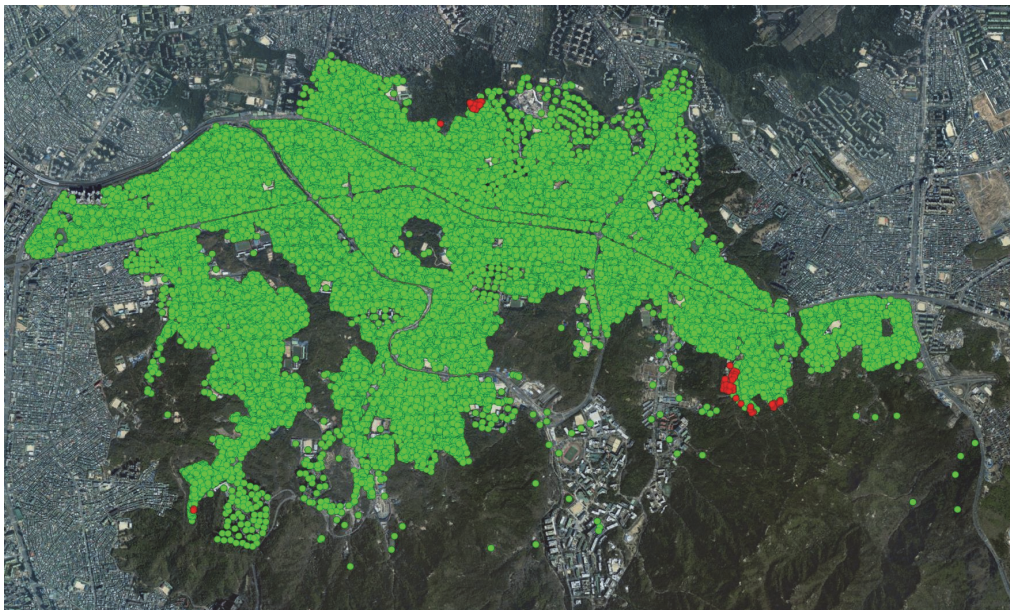
관악구 건축물 중 화재위험 건축물

[그림 4-8] 재난 유형별 건축물 리스크 지도

출처 : 연구진 작성



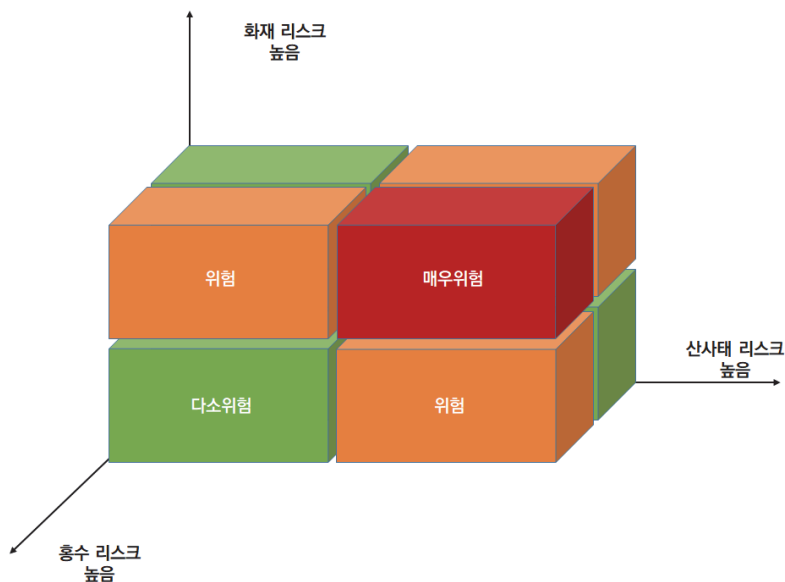
관악구 건축물 중 홍수위험 건축물



관악구 건축물 중 산사태위험 건축물

2) 모형 연계 결과

건축물 화재 리스크 분석모형, 건축물 홍수 리스크 분석모형, 건축물 산사태 리스크 분석모형의 분석 결과를 다차원 매트릭스로 연계하면 총 8가지 결과를 얻을 수 있다. 화재, 홍수, 산사태 리스크가 모두 높게 나온 건축물은 매우 위험한 건축물로 분류할 수 있을 것이며, 세 가지 재난유형 중 두 가지 재난유형의 리스크가 높게 도출된 건축물은 위험, 한 가지 재난유형의 리스크만 높게 도출된 건축물은 다소위험, 세 가지 재난유형의 리스크가 모두 낮게 도출된 건축물은 안전으로 분류할 수 있다. 즉, 관악구 32,079동의 건축물을 총 8가지 카테고리에 맞게 분류하여 결과를 해석할 수 있다.



[그림 4-9] 다차원 매트릭스기반 건축물 재난 리스크 연계

출처 : 연구진 작성

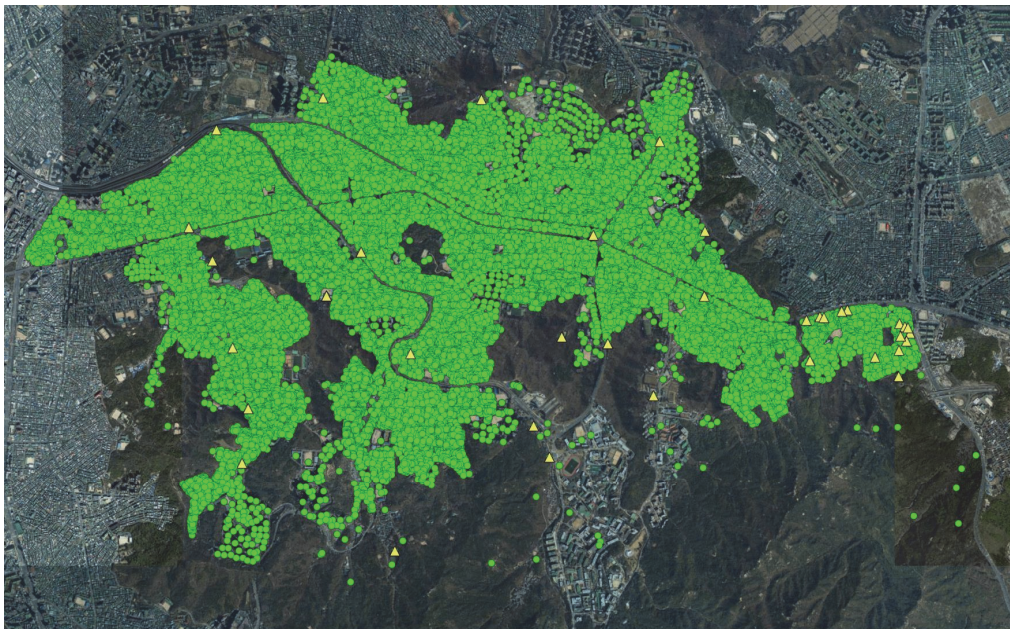
개별 재해유형을 연계하여 나타나는 복합 유형은 총 네 가지이다. 화재와 홍수, 화재와 산사태, 홍수와 산사태, 그리고 세 가지 모두 중첩된 상황이 있을 수 있다. 본 연구에서 관악구를 대상으로 분석한 결과 홍수와 산사태 리스크가 모두 높은 건축물은 없는 것으로 도출되었다. 이는 저지대 및 하천 주변에서 주로 발생하는 홍수의 특성과 산립 주변부에서 발생하는 산사태의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 이에 따라, 세 유형의 재난 리스크가 모두 높은 건축물도 없는 것으로 나타났다.

[표 4-3] 건축물 재난 유형별 리스크

유형	화재 및 홍수	화재 및 산사태	홍수 및 산사태	두 개 이상
리스크 낮음	32,031동 (99.85%)	32,032동 (99.85%)	32,079동 (100%)	31,984동 (99.70%)
리스크 높음	48동 (0.15%)	47동 (0.15%)	0동 (0%)	95동 (0.30%)
전체	32,079동	32,079동	32,079동	32,079

출처: 연구진 작성

첫 번째로, 건축물 화재 및 홍수 리스크가 모두 높은 건축물을 확인할 수 있다. 즉, 화재 리스크가 높으면서 동시에 홍수 리스크가 높은 건축물은 전체 32,079동 중 48동(0.15%)에 해당한다. 해당 유형의 건축물은 대부분 하천변 및 대로변에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 화재리스크가 높은 건축물은 관악구 전 지역에 균등하게 분포하는 편이나, 홍수 리스크가 높은 건축물의 분포가 하천주변 및 대로변에 위치하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.



0 1,000 2,000 m

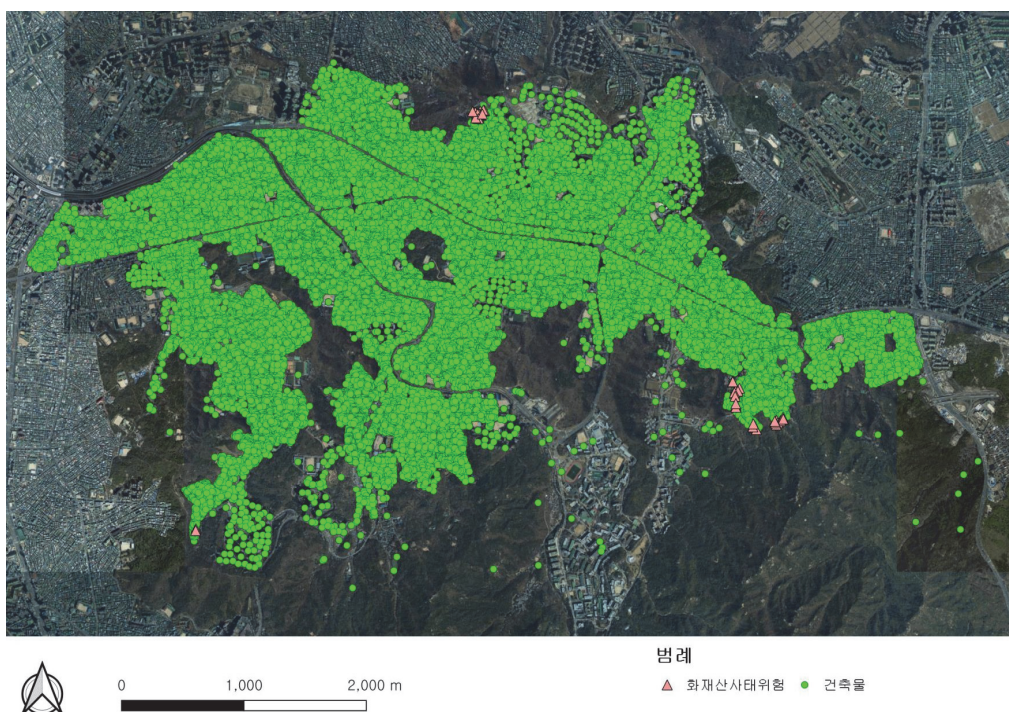
범례

▲ 화재홍수위험 ● 건축물

[그림 4-10] 건축물 화재 및 홍수 리스크 지도

출처: 연구진 작성

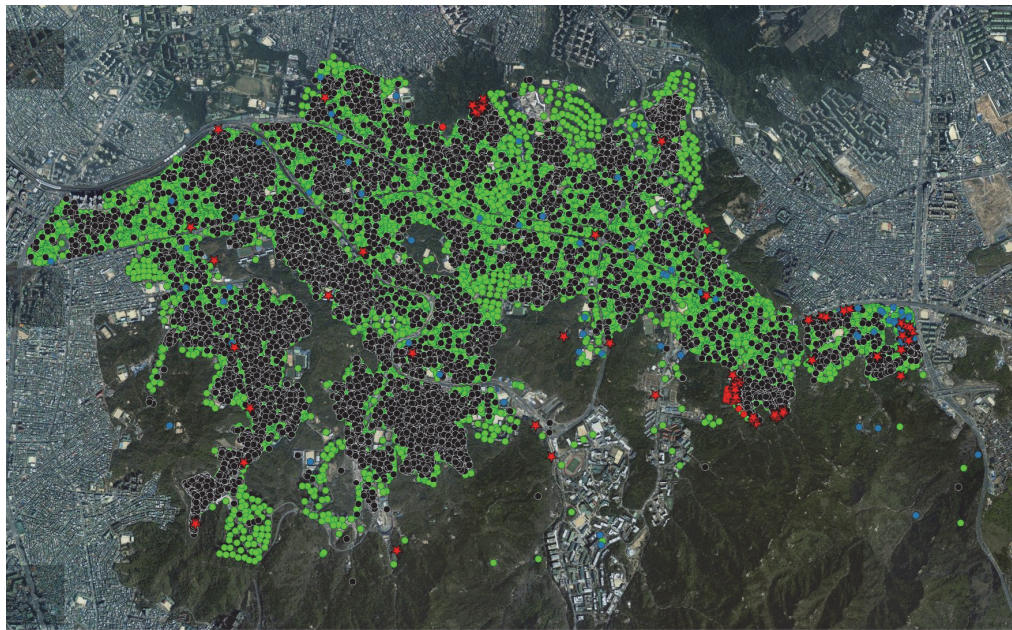
두 번째로, 건축물 화재 및 산사태 리스크가 모두 높은 건축물 수를 계산할 수 있다. 화재 및 산사태 리스크가 모두 높은 건축물은 관악구 내 전체 32,079동의 건축물 중 약 0.15%에 해당하는 47동으로 나타났다. 화재 및 홍수 리스크가 모두 높은 건축물과 거의 비슷한 숫자이나 분포 위치는 상이하게 나타난다. 화재 및 산사태 리스크가 모두 높은 건축물의 분포는 산림 주변 주로 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 화재리스크가 높은 건축물의 경우 전체 지역에 고르게 분포하는 편이나, 산사태 리스크가 높은 건축물이 산림 주변에만 있을 수 있는 점에 기인하는 것으로 판단된다.



[그림 4-11] 건축물 화재 및 산사태 리스크 지도

출처 : 연구진 작성

화재, 홍수, 산사태 중 두 개 이상의 재난 유형 리스크가 모두 높은 건축물은 총 95동으로 나타났다. 95동은 관악구 전체 건축물 중 약 0.3%수준으로, 화재 및 홍수 리스크가 모두 높은 건축물 수와 화재 및 산사태 리스크가 모두 높은 건축물 수의 합계와 같다. 홍수 및 산사태 리스크가 모두 높은 건축물은 관악구 내에는 없는 것으로 나타났기 때문에 세 가지 재난유형의 리스크가 모두 높은 건축물은 없는 것으로 도출되었다.



[그림 4-12] 건축물 재난 리스크 지도

출처 : 연구진 작성

3. 소결

본 장에서는 새로 개발한 건축물 산사태 리스크 분석 모델을 적용하여 서울시 관악구의 건축물 산사태 리스크를 분석하고, 기존의 건축물 화재, 홍수 리스크와 연계해 종합적으로 분석하였다. 즉, 관악구 내 건축물들에 대한 개별 재난 리스크를 분석하여 각 재난 유형에 따른 위험 지역 및 위험 건축물을 식별한 후, 관악구 내 건축물에 대한 재난 리스크를 연계 분석하고 이를 시각화하여 종합적인 재난 관리 대책을 마련할 수 있는 기초 자료를 제공하는 데 목적을 두었다.

건축물 산사태 리스크 분석의 경우 기존의 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석과는 달리 건축물의 속성정보가 리스크 분석에 활용되지 않는다. 예를 들어 건축물 화재 리스크는 건축물의 연면적이 클 수록 리스크 또한 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 건축물의 산사태 리스크는 건축물의 속성이 아닌 건축물의 입지만이 리스크에 영향을 미치는 요인으로 활용된다. 즉, 본 연구에서 개발한 건축물 산사태 리스크 분석모델의 분석 결과는 특정 입지에 있는 건축물의 관리 방안을 제시하는데 활용될 수 있지만, 특정 건축물 유형에 대해 관리방안을 제시하기는 어렵다.

산사태 리스크 분석 모델과 건축물 재난 리스크 연계 분석 모델의 분석결과는 다음과 같다. 산사태 리스크 분석에서는 주요 기후 변수(강우량)와 지형 데이터(DEM, 배수 등급 등)가 산사태 민감지역 도출에 큰 영향을 미쳤으며, 연도별 분석 결과 2011년, 2013년, 2020년의 AUC 값이 0.9 이상으로, 매우 높은 예측 성능을 보였다. 이러한 예측 성능은 연도별 산사태 발생 가능 지역을 정확하게 도출하는 데 기여하였다. 그러나 중첩 분석에서 극단적인 폭우와 같은 일부 연도의 특성에 의해 산사태 위험이 과대 평가되는 경우도 발견되었다. 즉, 장기적인 위험 평가에 있어 단기 데이터에 대한 의존성이 문제점으로 지적될 수 있을 수 있다.

종합적인 산사태 민감성 분석에서는 AUC 값이 0.934로 나타났으며, 이는 단일 연도 분석보다 높은 신뢰도를 보여주었다. 여러 변수(여름철 강우량, DEM, 배수 등급 등)를 통합하여 산사태 발생 위험 지역을 효과적으로 평가할 수 있었으며, 특히 고위험 지역을 정확하게 식별할 수 있음을 확인하였다.

다음으로, 건축물 재난 리스크 연계 분석에서는 화재, 홍수, 산사태와 같은 다양한 재난 유형 간의 상호 연관성을 평가하였다. 관악구의 전체 건축물 32,079동 중 26.2%인 8,405동이 화재 리스크가 높은 것으로 나타났으며, 홍수 리스크가 높은 건축물은 전체 건축물 중 1.39%인 446동으로 상대적으로 낮은 비율을 차지하고 있다. 마지막으로 산사태 리스크가 높은 건축물은 전체 건축물 중 67동

(0.15%)에 불과하며, 이는 주로 산림 주변에 위치하고 있다. 화재 리스크가 높은 건축물은 공간적으로 균일하게 분포하나, 홍수 리스크가 높은 건축물은 주로 하천 주변 및 저지대에 위치하며, 산사태 리스크가 높은 건축물은 산림 주변에 위치하고 있는 것으로 나타났다.

화재, 홍수, 산사태 리스크를 다차원 매트릭스를 통해 연계 분석한 결과, 세 가지 재난 유형이 모두 높은 건축물은 없는 것으로 나타났다. 이는 각 재난 유형의 특성에 따라 리스크가 높은 건축물의 분포가 상이하게 나타나기 때문으로 해석된다. 화재와 홍수 리스크가 동시에 높은 건축물은 48동(0.15%), 화재와 산사태 리스크가 동시에 높은 건축물은 47동(0.15%)으로 도출되었으며, 이들 건축물은 각각 하천변과 산림 주변에 주로 분포하고 있다. 이러한 복합 리스크 건축물은 재난 발생 시 복합적인 위험에 노출될 가능성이 높으므로, 각별한 관리와 예방 대책이 필요하다.

본 연구의 결과는 서울시 관악구의 건축물을 사례로 재난 리스크를 종합적으로 분석하여, 지역별 재난 유형에 따른 차별화된 관리 방안을 제시할 수 있다는 것을 확인했다는 점에서 의미를 갖는다. 특히, 다차원 매트릭스를 통한 복합 리스크 평가 방식은 단일 재난에 의한 위험뿐만 아니라 복합적인 재난 상황에 대비한 종합적인 관리 대책 수립에 기여할 수 있을 것이다.

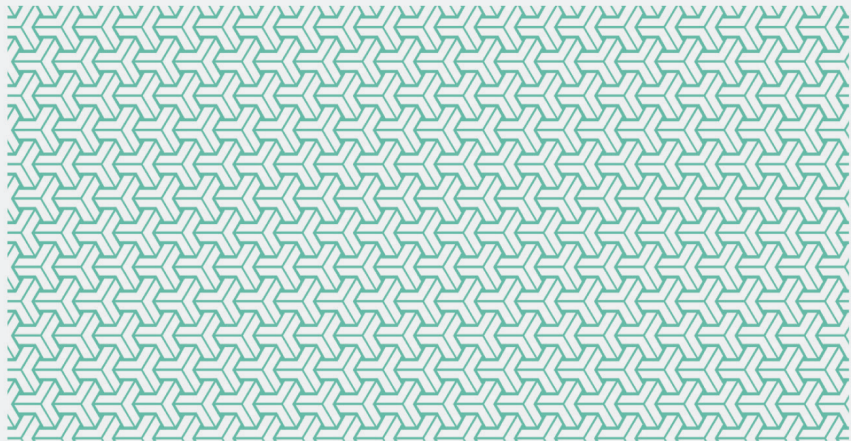
건축물 화재, 홍수, 산사태 리스크 분석을 위해 다양한 국가 및 공공기관의 데이터가 활용되었다. 데이터는 국토지리정보원, 행정안전부, 서울시, 기상청, 산림청 등 다양한 기관에서 생산하고 있으며, 생산기관 및 관리기관별 데이터 유통 채널을 확보하고 있다. 다만, 데이터 별 구득 경로가 다르고, 구득을 위한 절차가 복잡한 경우가 있어, 건축물 및 국민 안전 확보를 위한 데이터 유통 채널의 확보가 필요한 것으로 판단된다.

[표 4-4] 건축물 재난 유형별 활용 데이터 목록

화재 리스크 관련 변수	홍수 리스크 관련 변수	산사태 리스크 관련 변수
건축물 화재 피해 데이터	홍수 피해금액	경사
도로 연결성	연면적	향
도로 폭	건축면적	고도
주거용도 수	대지면적	평면 곡률
상업용도 수	건폐율	측면 곡률
노후도	용적률	하천강도지수
지상 층 수	용적률 산정용 연면적	지형습윤지수
지하 층 수	건물높이	모암, 모재
용적률	지상층수	유효토심
승강기 수	지하층수	배수등급
비상용 승강기 수	건물수	토양 유형
기온	구조	경급
습도	주용도	영급
풍속	향	산림유형
추정인구 수	경사도	연평균강수량
-	지형습윤지수	여름철(6~10월) 평균강수량
	하천으로부터의 거리	1일 최대 강수량
	고도	5일 최대 강수량
	고도차이	일강수량이80mm 이상인 날
	소유역	일강수량이120mm 이상인 날
	평균고도(소유역)	일강수량이150mm 이상인 날
	홍수 민감 지도	3일주기 누적 강우 150mm 이상 횟수
	그린인프라 면적	-
	불투수포장율	
	오픈스페이스	
	토지이용	
	구면적 대비 빗물 저류조 용량	
	구면적 대비 빗물 펌프장 용량	
	시가화 면적 대비 하수관거 연장	
	구면적 대비 유수지 면적	

출처: 연구진 작성

제5장 결론



1. 연구요약
2. 정책화 방안
3. 연구의 한계 및 향후과제

1. 연구요약

본 연구는 건축행정정보 등 공공데이터와 머신러닝, 딥러닝 등 기술을 활용하여 건축물의 화재, 홍수, 산사태 등 재난 리스크를 분석하자 하였다. 최근 몇 년간 이천 쿠팡 물류센터 화재, 강남역과 관악구 반지하 침수 사태, 예천 산사태와 같은 대규모 재난이 지속적으로 발생하면서 국민들의 건축물 재난안전에 대한 우려가 커지고 있다. 이러한 상황에서 건축물에 피해를 입히는 재난에 대한 사전 예방적 대응이 요구되고 있으며, 본 연구는 이를 해결하기 위한 하나의 대응방법으로 건축물 재난 리스크 연계하는 방안을 검토하였다.

건축물 재난 리스크 분석 모델은 건축물의 재난 유형별로 화재, 홍수, 산사태와 같은 각기 다른 유형을 재난을 평가한 후, 이를 연계하여 종합적으로 분석할 수 있는 방식을 고려하였다. 개별 재난에 대한 리스크 분석 결과는 각각 다를 수 있으며, 동일한 건축물이라도 화재에는 강하지만 홍수에는 취약할 수 있다. 이를 고려하여 다양한 재난 유형별 리스크를 종합적으로 분석할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히, 재난별 리스크를 분석할 수 있도록 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘을 활용하였으며, 이로 인해 높은 정확도의 리스크 분석 모델을 개발하였다.

건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델은 기존 연구결과를 활용하였으며, 본 연구에서는 산사태 리스크 분석 모델을 추가적으로 개발하였다. 산사태 리스크 분석 모델 개발 과정은 크게 세 가지 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 산사태 민감 지역 분석이다. 이 과정에서는 과거 산사태 발생 데이터를 바탕으로 산사태가 발생할 가능성이 높은 지역을 도출하며, 지형, 토양, 식생, 기후와 같은 다양한 환경 변수를 고려하여 산사태 발생 가능성을 평가한다. 이를 위해 여러 머신러닝 모델이 사용되며, 분석의 정확도를 높이기 위해 앙상블 모형을 활용하였다. 두 번째 단계는 산사태 피해 범위 추정이다. 이 단계에서는 LAHARZ 모델을 사용하여 산사태로 인해 발생하는 토석류의 이동 경로와 피해 범위를 예측한다. LAHARZ 모델은 토양의 물리적 특성과 지형적 특성을 고려하여 토석류의 이동 경로를 계산하고, 이를 바탕으로 피해 범위를 도출하는 데 활용된다. 세 번째 단계는 피해범위에 포함되는 건축물에 대한 리스크 분석이다. 이 단계에서는 산사태 피해 범위 내에 포함된 건축물을 식별한다.

건축물 재난 리스크 연계 모델은 서울시 관악구를 대상으로 시범적용해 보았다. 개별모델의 적용 결과 화재 리스크가 높은 건축물은 전체 건축물의 26.2%인 8,405동으로 분석되었으며, 관악구 전역에 걸쳐 비교적 고르게 분포하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 홍수 리스크가 높은 건축물은 1.39%인 446동으로, 주로 하천 주변과 저지대에 위치한 건축물들로 나타났다. 마지막으로, 산사태 리스크가 높은 건축물은 67동(0.15%)으로 산림 주변에 주로 분포하며, 상대적으로 리스크가 낮았다.

산사태 리스크 분석 모델의 결과는 건축물의 속성에 따른 산사태 리스크가 아닌 건축물의 입지에 따른 산사태 리스크를 나타내 준다. 건축물의 화재 리스크는 건축물의 속성정보가 주요 영향요인이며, 건축물의 홍수 리스크가 건축물의 속성 및 입지 정보의 영향을 받는 것과는 다른 양상이다. 입지 요인의 영향을 받는 건축물의 산사태 리스크는 건축물의 인허가 단계에서 미리 예방하거나 대응방안을 마련할 수 있다. 즉, 산사태 리스크가 높은 지역에서 건축행위가 일어날 경우 건축물의 인허가 단계에서 담당기관 및 담당자가 주의를 기울일 필요가 있다.

화재, 홍수, 산사태 리스크를 연계 분석한 결과, 화재와 홍수 리스크가 동시에 높은 건축물은 48동, 화재와 산사태 리스크가 동시에 높은 건축물은 47동으로 나타났다. 세 가지 재난 유형이 모두 높은 건축물은 없는 것으로 분석되었다. 이는 각 재난 유형의 특성이 다르게 나타나기 때문인 것으로 보인다. 이 분석 결과는 건축물의 구조적 특성, 입지 조건, 기상 데이터 등 다양한 요소를 고려한 결과로, 각 건축물에 대한 재난 리스크를 상세히 평가할 수 있었다.

본 연구에서 건축물 재난 리스크 분석 모델 개발의 목적은 기존의 재난안전 분석 및 예측모델을 고도화하는 것이 아닌 1) 건축물 단위로 재난 리스크를 분석하는 것, 2) 다양한 재난 리스크를 연계하여 제시하는 것에 중점을 두었다. 이를 통해 건축물 단위의 재난 리스크 분석이 필요함을 확인할 수 있었으며, 이 과정에서 관계 데이터의 구축 및 관리 중요성을 재확인할 수 있었다. 결과적으로 연구를 통해 건축물의 재난 리스크를 사전에 평가하고, 이를 기반으로 한 효율적인 건축물 관리가 필요함을 제시하였다. 특히, 건축물의 화재, 홍수, 산사태와 같은 자연 재난에 대한 종합적이고 통합적인 대응 체계를 구축하는 것이 필요함을 확인하였다. 빅데이터 기반의 분석 방법을 통해 재난 리스크를 높은 정확도로 예측할 수 있었다. 즉, 국민 안전 확보를 위한 데이터 연계 및 활용 필요성을 확인하였다.

2. 정책화 방안

□ 건축물 단위 데이터 연계 강화 필요

건축물 안전과 관련된 정보가 통합 유통될 필요가 있다. 건축물 재난 리스크와 관련한 1차연도부터 3차연도까지 연구를 보면 건축물 화재 발생 데이터, 건축물 홍수피해 데이터, 건축행정정보, 기상정보, 지형정보, 산사태 발생지점 데이터 등 다양한 데이터를 활용하여 건축물의 재난 리스크를 분석하였다. 분석 과정에서 사용한 모든 데이터는 국가 및 공공기관에서 구축한 데이터이나, 데이터 구득을 위해 개별 시스템에 접속하거나 기관 연락을 취하는 등 비효율적 과정을 거치게 된다. 이에 건축물 및 국민 안전을 위해 재난안전을 도모하기 위한 데이터 연계가 이루어질 필요가 있다.

본 연구는 건축물 생애이력 시스템을 통한 건축물 안전 관련 데이터 유통 방안을 제안하고자 한다. 건축물에서 일어나는 화재, 침수, 산사태 등의 사건사고 정보와 피해발생 정보를 구축하고, 건축물 생애이력 시스템을 통해 유통될 수 있도록 하여 재난안전 관련 통계분석, 경보발령, 건축물 긴급점검 등 활동이 원활하게 일어날 수 있는 제도 개선 방안을 검토하였다.

[표 5-1] 「건축물관리법」 제7조 개정안

개정 전	개정 후
제7조(건축물 생애이력 정보체계 구축 등) ③ 국토교통부장관은 다음 각 호의 자료 또는 정보를 보유 또는 관리하는 자에게 건축물 생애이력 정보체계의 구축·운영에 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다. 이 경우 자료 또는 정보의 제공을 요청받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 따라야 한다. 1. 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제55조에 따른 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 정보 2. 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」 제22조에 따른 소방시설등의 자체점검 등에 관한 정보 3. 「수도법」 제33조에 따른 위생상의 조치에 관한 정보 4. 「승강기 안전관리법」 제28조 및 제32조에 따른 승강기 설치검사 및 안전검사에 관한 정보	제7조(건축물 생애이력 정보체계 구축 등) ③ 국토교통부장관은 다음 각 호의 자료 또는 정보를 보유 또는 관리하는 자에게 건축물 생애이력 정보체계의 구축·운영에 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다. 이 경우 자료 또는 정보의 제공을 요청받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 따라야 한다. 1. 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제55조에 따른 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 정보 2. 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」 제22조에 따른 소방시설등의 자체점검 등에 관한 정보 3. 「수도법」 제33조에 따른 위생상의 조치에 관한 정보 4. 「승강기 안전관리법」 제28조 및 제32조에 따른 승강기 설치검사 및 안전검사에 관한 정보

[표 5-1] 「건축물관리법」 제7조 개정안(계속)

개정 전	개정 후
5. 「에너지이용 합리화법」 제39조에 따른 검사대상기기의 검사에 관한 정보 6. 「전기안전관리법」 제12조에 따른 일반 용전기설비의 점검에 관한 정보 7. 「하수도법」 제39조에 따른 개인하수처 리시설의 운영·관리에 관한 정보 8. 「자연재해대책법」 제34조에 따라 구축 된 재해정보 <신 설> 9. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항 ④ 제3항에 따른 자료 또는 정보의 요청 절 차, 제출 방법 등 필요한 사항은 국토교통부 령으로 정한다.	5. 「에너지이용 합리화법」 제39조에 따른 검사대상기기의 검사에 관한 정보 6. 「전기안전관리법」 제12조에 따른 일반 용전기설비의 점검에 관한 정보 7. 「하수도법」 제39조에 따른 개인하수처 리시설의 운영·관리에 관한 정보 8. 「자연재해대책법」 제34조에 따라 구축 된 재해정보 9. 「 <u>재난 및 안전관리 기본법</u> 」 제74조 및 제 74조의2에 따른 <u>재난관리정보</u> 10. 「 <u>소방의 화재조사에 관한 법률</u> 」 제19조 에 따른 <u>화재정보</u> 11. 「 <u>자연재해대책법</u> 」 제21조에 따른 <u>재해</u> <u>지도</u> 12. 「 <u>산림보호법</u> 」 제45조의5에 따른 <u>산사</u> <u>태정보체계</u> 13. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항 ④ (현행과 같음)

출처: 연구진 작성

□ 건축물 단위의 재난위험 확인 시스템 필요

건축물은 인간이 가장 많은 시간을 보내는 공간 중 하나이며, 건축물 자체 뿐 아니라 건축물 내 다양한 시설 및 재화들로 인해 안전 확보가 중요한 공간이다. 그러나 지진안전을 확인할 수 있는 우리집 내진설계 간편조회 서비스²⁸⁾등을 제외하면 건축물 단위로 재난안전 관련 정보를 제공하는 서비스는 적다. 개인이 살거나 이용하는 건축물이 재난안전으로부터 안전한지 혹은 위험한지 확인하기 위해서는 공간화된 재난위험 지도를 확인하고 위험지역 내에 해당 건축물이 포함되었는지 여부를 일일이 확인해야 한다.

28) 우리집 내진설계 간편조회 서비스. <https://www.aurum.re.kr/KoreaEqk/SelfChkStart>

재난으로부터의 국민 안전 제고를 위해 건축물 단위의 재난위험 여부 확인이 가능할 필요가 있다. 특정 재난에 대한 위험 여부 인지 이후에 대응방안을 모색하고 실행할 수 있기 때문에, 현재 거주하는 혹은 이용하는 건축물이 재난으로부터 안전한지, 거주자와 이용자가 손쉽게 확인할 수 있어야 한다. 즉, 지진에 대한 안전성 여부를 알려주는 우리집 내진설계 간편조회 서비스처럼 건축물 단위로 재난 안전 여부를 확인할 수 있어야 한다.



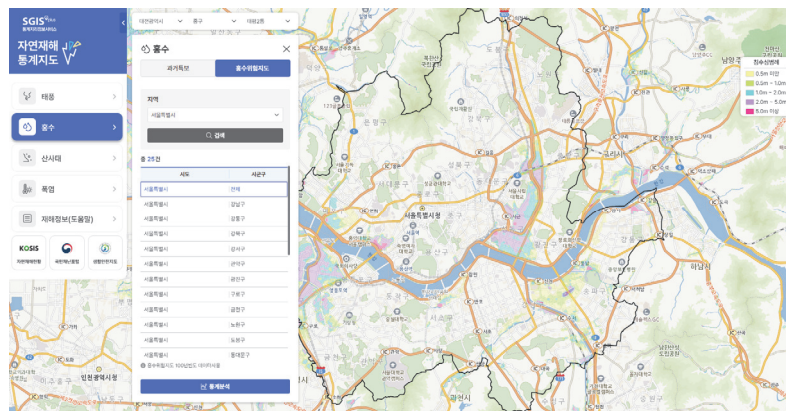
[그림 5-1] 건축물 생애이력 관리시스템의 건축물 검색 화면

출처 : 건축물 생애이력 관리시스템. <https://blcm.go.kr/>. 2024.10.16. 접속

본 연구는 건축물 생애이력 관리시스템을 향후 건축물의 재난안전 여부를 확인할 수 있는 기초도구로 검토하고 있다. 건축물 생애이력 관리시스템은 건축물의 기획·설계, 시공, 유지관리, 멸실 등 건축물의 생애 동안 생산되는 정보를 관리하고, 이에 기반한 건축물의 관리 및 점검을 통해 건축물의 안전을 확보하고 사용자 치를 향상시키기 위해 구축되었다. 건축물의 재난 리스크는 건축물의 안전 확보와 관련되며, 재난안전 확보를 위한 대응방안은 건축물의 점검 및 관리와 밀접한 관련이 있다. 이에 건축물 생애이력 관리시스템을 건축물 단위의 재난안전 정보 열람을 위한 시스템으로 사용하는 방안을 검토할 필요가 있다.

□ 건축물 통합 안전 플랫폼 필요

서로 다른 재난유형에 대한 리스크 분석 과정에서 화재, 홍수, 산사태 위험은 모두 서로 다른 기관에서 분석하고 관리한다는 것을 확인하였다. 종합적으로는 재난 피해현황 데이터나 홍수, 산사태와 같은 일부 위험지도의 경우 행정안전부의 국가재난안전관리시스템(NDMS)이나 국민재난안전포털²⁹⁾에서 관리하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다만, 시각적으로 확인 가능한 지도만을 제공하고 있을 뿐 건축물 주소정보나 위치정보와 연계한 건축물 단위의 정보를 제공하고 있지는 못하며, 화재와 같이 건축물에 가장 큰 피해요인은 다루지 않고 있다는 점에서 한계가 있다.



[그림 5-2] 국민재난안전포털의 자연재해 통계지도

출처 : 자연재해통계지도. 홍수. <https://ndsm.kostat.go.kr/ndsm/srv/map/intMap.do?type=flud>. 2024.10.16. 접속

이에, 건축물 단위에서 다양한 재난 관련 정보를 통합하여 제공하는 하나의 플랫폼이 필요하다. 본 연구에서 다른 건축물 화재, 홍수, 산사태 뿐 아니라 폭염, 태풍 등 다양한 재난에 대한 정보를 제공하여 건축물 거주자 및 이용자가 확인할 수 있도록 해야한다. 현재 건축물 단위 재난 위험정보 통합이 되어있지 않기 때문에 우선 단순히 정보 통합부터 고려되어야 할 것이다. 이를 위해서는 개별 재난위험 정보를 구축 및 관리하는 기관 간 연계방안과 미구축 재난위험 데이터의 구축방안을 모색할 필요가 있다.

29) 국민재난안전포털. <https://www.safekorea.go.kr/>

3. 연구의 한계 및 향후과제

□ 분석모델 간 연계 방식의 한계

건축물의 여러 가지 재난 리스크를 종합적으로 분석하기 위한 모델 연계 방법은 다양하다. 본 연구에서 사용된 다차원 매트릭스 방식은 각 리스크 모델의 결과를 중첩하여 분석하는 방법이다. 다차원 매트릭스 방식의 장점은 먼저, 결과가 직관적이라는 점이다. 여러 재난 리스크 요소를 중첩하여 볼 수 있어 결과 해석이 용이하며, 복합적인 위험을 한눈에 파악할 수 있다. 또한, 이 방식은 개별 재난 리스크가 중첩되는 건축물에서의 종합적인 리스크 평가가 용이하여, 다양한 재난 상황에 대한 대응 전략을 마련하는 데 유용하다. 마지막으로, 적용이 비교적 간단하고 빠르게 수행될 수 있는 실용적인 방법이라는 장점도 있다.

그러나 다차원 매트릭스 방식의 연계는 리스크 요소 간의 상호작용을 충분히 고려하지 못한다는 한계가 있다. 재난 유형들이 상호작용할 때 발생하는 복잡한 인과관계를 반영하기 어렵기 때문에, 화재, 홍수, 산사태 등 여러 재난 유형들이 동시에 발생할 경우 그 상호작용을 제대로 분석하기 어렵다. 또한, 리스크의 중대성이나 발생 확률을 정확하게 반영하지 못할 수 있다. 단순한 중첩만으로는 각 리스크의 실질적인 영향을 과소평가하거나 과대평가할 가능성이 있기 때문에, 보다 세부적인 분석이 필요한 경우에는 다차원 매트릭스 방식만으로는 충분하지 않을 수 있다. 마지막으로, 이 방법은 데이터의 정확성에 매우 의존하는데, 각 개별 리스크 모델의 데이터가 부정확할 경우 왜곡된 결과를 초래할 수 있다는 한계도 존재한다.

향후 모델 간 연계를 위해 다양한 방식을 검토해볼 필요가 있으며, 본 연구는 크게 세 가지 방식에 대한 검토 필요성을 확인하였다. 첫 번째로, 베이지안 네트워크가 있다. 이는 확률론적 그래프 모델을 활용하여 서로 다른 리스크 요소 간의 상관관계를 나타내는 방법이다. 베이지안 네트워크 방식은 변수들 간의 인과관계를 바탕으로 리스크를 분석하고 통합한다. 불확실성이나 데이터 부족 상황에서도 확률 기반 예측이 가능하다는 장점이 있으나, 네트워크 구축에 필요한 충분한 데이터와 사전 지식이 부족할 경우 정확한 모델링이 어려울 수 있다.

두 번째로, 동적 시뮬레이션 모델을 사용할 수 있다. 이는 리스크 요소 간의 상호 작용을 시간적 변화에 따라 시뮬레이션하는 방식으로, 변화하는 상황에 적합하다. 이 모델은 시간의 흐름에 따른 리스크 변화를 분석할 수 있는 장점이 있지만, 모델링이 복잡하고 계산량이 많아 시간이 많이 소요될 수 있다. 즉, 연산량이 많기 때문에 넓은 지역의 많은 건축물을 대상으로 분석하여 전반적인 결과물을 얻기에는 부적합할 수 있다.

세 번째로는 다기준 의사결정 분석(MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis)이 있다. 리스크 분석에 다기준 의사결정 분석 방식을 적용하면 여러 리스크 요소와 의사결정 기준을 바탕으로 통합적인 리스크 평가를 진행한다. 각 리스크 요소에 가중치를 부여하여 최적의 분석 결과를 도출할 수 있는 장점이 있으나, 분석 결과의 신뢰성이 가중치 결정에 의존하는 방법으로, 가중치 설정에 주관성이 개입될 수 있는 한계가 있다.

향후 연구의 정확도 개선 및 활용성 제고를 위해 제시된 세 가지 방식 이외에도 다양한 모델 간 연계 및 결과의 통합 방식에 대하여 검토해볼 필요가 있다.

□ 산사태 리스크 분석 모델의 한계

본 연구에서는 LAHARZ 모델을 활용하여 관악구 내 산사태 위험 지역을 분석하고 건축물 피해 범위를 예측하였으나, 해당 방식을 활용함에 있어 몇 가지 한계가 존재한다.

첫째, 본 연구에서 사용된 DEM (Digital Elevation Model) 데이터는 건축물의 세부적인 지형 특성을 반영하지 못하였다. DEM 데이터는 자연 지형만을 기반으로 하기 때문에, 건축물의 높이, 구조적 특성, 또는 건축물이 지형에 미치는 영향을 충분히 고려하지 못하였다. 이로 인해 건축물의 정확한 피해 예측에 한계가 있었다. 향후 연구에서는 건축물의 구조적 특성과 지형적 특성을 보다 정밀하게 반영한 데이터 구축이 필요하다.

둘째, 본 연구는 토석류 흐름 상 첫 번째 건축물에만 초점을 맞추어 분석을 진행하였다. 이로 인해, 다수의 건축물이 존재하는 지역에서 인접한 건축물에 미치는 영향을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있었다. 향후 연구에서는 여러 건축물이 위치한 환경에서 발생할 수 있는 복합적인 피해를 분석하는 연구가 필요하다.

셋째, 본 연구에서는 우면산 산사태를 바탕으로 10,000m²의 토석류 부피 값을 사용하여 피해 범위를 예측하였으나, 이 값이 다른 지역의 산사태에도 동일하게 적용될 수 있는지에 대한 추가 검증이 필요하다. 각 지역의 지형 및 토양 특성에 따른 맞춤형 부피 값 설정이 요구되며, 이를 통해 모델의 예측 정확도를 더욱 높일 수 있을 것이다.

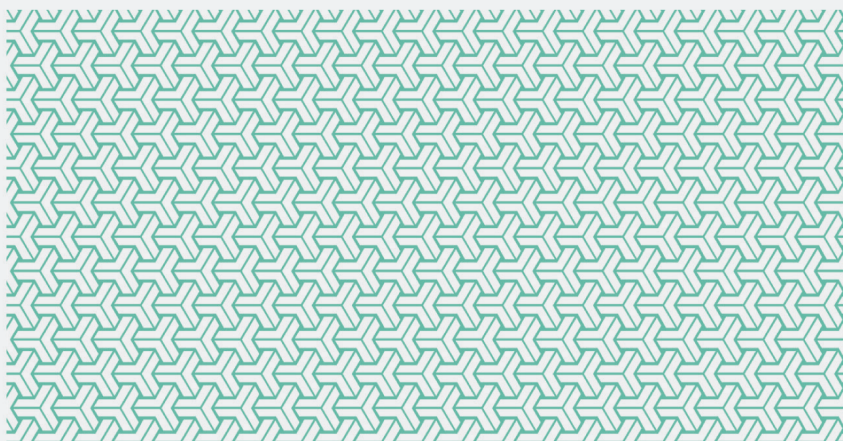
뿐만 아니라 산사태 분석 시 고려해야하는 내용에 대해서도 향후 범위를 확장할 필요가 있다. 본 연구에서는 산사태의 유형 중 강우에 의한 산사태만을 고려하였다. 그러나 산사태의 유형에는 지진에 의해 발생하는 산사태도 있으며, 해외에서는 산사태를 더 세분하여 암석붕괴(Rock fall)와 같은 유형도 분석하고 있다. 현재 지진의 의한 산사태나 암석붕괴가 우리나라에서 발생빈도가 매우 낮기 때문에 검토 대상이 아니었으나, 기후변화에 의한 재난 증가 추세를 볼 때 향후 연구에서는 고려대상에 포함할 필요가 있다.

□ 분석결과 표출방식의 고도화 및 추가적인 유형의 재난 고려 필요

본 연구의 건축물 재난 리스크 분석 방식은 이항분류 방식으로, 재난 유형별 건축물의 리스크가 높고 낮음의 두 가지 항목으로 분류하였다. 이 같은 방식은 정책결정자가 의사결정을 내리기 쉽다는 장점이 있다. 다만, 실제 건축물의 재난 리스크를 단순화한다는 점에서 일부 한계점이 존재한다. 건축물의 재난 리스크는 실제로 이분법적이지 않고 연속적이며 이항분류를 할 경우 정보의 손실이 발생한다고 볼 수 있다. 이에 향후 리스크 분석결과와 표출방식 검토 시 정보 이용자의 수요에 따른 다양한 방식을 검토할 필요가 있다.

산사태, 홍수, 화재 이외의 추가적인 재난 유형에 대해 고려하여 건축물의 리스크 분석 연구를 지속할 필요가 있다. 1차, 2차, 3차연도 연구를 통해 집중호우에 따른 산사태 발생과 산사태에 따른 건축물의 피해, 집중호우 발생에 따른 홍수 발생과 건축물의 침수 피해, 건축물 내 화재 발생에 따른 피해를 분석하였다. 건축물의 피해를 발생시키는 근본 원인으로는 호우와 화재 두 가지 유형이 검토되었고, 최종 건축물의 피해 유형으로는 산사태, 침수, 화재 등 세 가지 유형이 검토되었다. 향후 「재난 및 안전관리 기본법」에 따른 다른 재난유형을 검토하고 건축물 단위에서의 분석모델을 개발할 필요가 있다.

참고문헌



건축물관리법. 법률 제19367호. 2023.4.18.. 일부개정

건축물 생애이력 관리시스템. <https://blcm.go.kr/>

공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률. 법률 제19408호. 2023.5.16.. 타법개정

공공데이터포털. <https://www.data.go.kr/>

국민재난안전포털. <https://www.safekorea.go.kr/>

국토의 계획 및 이용에 관한 법률. 법률 제19590호. 2023.8.8.. 타법개정

국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행령. 대통령령 제34531호. 2024.5.28.. 일부개정

급경사지 재해예방에 관한 법률. 법률 제19117호. 2022.12.27.. 타법개정

김규현. 2023. '예천 산사태' 경북 북부 폭우 피해액 2,946억원 잠정 집계. 한겨레. <https://www.hani.co.kr/arti/area/yeongnam/1103688.html>. 8월 10일 기사

농업·농촌 및 식품산업 기본법. 법률 제19750호. 2023.10.24.. 일부개정

농업·농촌 및 식품산업 기본법 시행규칙. 농림축산식품부령 제685호. 2024.10.21.. 일부 개정

도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률. 법률 제19879호. 2024.1.2.. 일부개정

도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙. 농림축산식품부령 제672호. 2024.7. 24.. 일부개정

도시숲 등의 조성 및 관리에 관한 법률 시행령. 대통령령 제31739호. 2021.6.8.. 제정

문성규. 2012. 서울시 "우면산 산사태 피해지 96% 복구". 연합뉴스. 5월 30일 기사. <https://www.yna.co.kr/view/AKR201205300799000004>

민간인 통제선 이북지역의 산지관리에 관한 특별법. 법률 제19590호. 2023.8.8.. 타법개정

민경환. 2023. '예천 산사태' 정부 지정 취약지역 66곳 전부 비껴갔다. 세이프타임즈. 7월 18일 기사. <https://www.safetimes.co.kr/news/articleView.html?idxno=206266>

사방사업법. 법률 제19117호. 2022.12.27.. 타법개정

산림공간정보서비스. <https://www.forest.go.kr>

산림기본법. 법률 제19803호. 2023.10.31.. 일부개정

산림보호법. 법률 제20309호. 2024.2.13.. 타법개정

산지관리법. 법률 제19590호. 2023.8.8.. 타법개정

우리집 내진설계 간편조회 서비스. <https://www.aurum.re.kr/KoreaEqk/SelfChkStart>

이정현. 2014. 2년반 보고서에도 '못끝내는' 우면산 산사태 공방(종합). 연합뉴스. 3월 13일 기사. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20140313062751004>

임업·산림 공익기능 증진을 위한 직접지불제도 운영에 관한 법률. 법률 제18535호. 2021. 11.30.. 제정

임채두. 2020. 남원 산동면 산사태로 주민 20여명 대피...인명피해 확인 중. 연합뉴스. 8월 8일 기사. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200808012600055>

자연재해대책법. 법률 제19702호. 2023.9.14.. 타법개정

자연재해통계지도. <https://ndsm.kostat.go.kr/ndsm/srv/map/intMap.do>

재난 및 안전관리 기본법. 법률 제20030호. 2024.1.16.. 일부개정

저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률. 법률 제19635호. 2023.8.16.. 타법개정

- 정세진. 2022. 신림동 숨진 가족처럼...영화 '기생충' 반지하 집에 32만 가구가 산다. 머니투데이. <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2022080917011789586>. 8월 10일 기사
- 조영진·허한결·안의순·류수연·송유미·현태환. 2022. 빅데이터 기반 건축물 화재 예측 모델 개발 연구. 건축공간연구원
- 조영진. 2023. 재난과 데이터 그리고 건축물 재난 예방. 건축과 도시공간. v.51. 건축공간연구원
- 조영진·허한결·송유미·현태환. 2023. 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. 건축공간연구원
- 탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률. 법률 제19806호. 2023.10.31.. 일부개정
- 풍수해·지진재해보험법. 법률 제20275호. 2024.2.13.. 일부개정
- 흙토람. <https://soil.rda.go.kr>
- Barnhart, K. R., Jones, R. P., George, D. L., McArdeell, B. W., Rengers, F. K., Staley, D. M., and Kean, J. W. 2021. Multi-Model Comparison of Computed Debris Flow Runout for the 9 January 2018 Montecito, California Post-Wildfire Event. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. v.126. i.12. pp.1-33
- BBC. 2010. Dozens killed in landslides in China's Gansu province. Aug 8. <https://www.bbc.com/news/world-asia-pacific-10905399>
- BBC. 2014. Indian landslide: Dozens trapped in Pune village of Malin. Jul 30. <https://www.bbc.com/news/world-asia-28559617>
- BBC. 2017. Colombia opens investigation into deadly Mocoa landslide. Apr 6. <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-39510721>
- Bernard, David, Trousil, Emily and Santi, Paul. 2021. Estimation of inundation areas of post-wildfire debris flows in Southern California USA. *Engineering Geology*. v.285. Technical Notes. Article 105991
- Bessette-Kirtona, Erin K., Keana, Jason W., Coe, Jeffrey A., Rengers, Francis K. and Staley, Dennis M.. 2019. An evaluation of debris-flow runout model accuracy and complexity in Montecito, California: Towards a framework for regional inundation-hazard forecasting. 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. DEBRIS-FLOW HAZARDS MITIGATION-Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment. Association of Environmental and Engineering Geologists. pp.257-264
- Blundo, Davide Settembre-, Sánchez, Rocío González-, Salgado, Sonia Medina-, and Muiña, Fernando E. García-. 2021. Flexibility and Resilience in Corporate Decision Making: A New Sustainability-Based Risk Management System in Uncertain Times. *Global Journal of Flexible Systems Management*. v.22. i2 suppl. pp.S107-S132

- Cesca, M., and D'Agostino, V.. 2008. Comparison Between FLO-2D And RAMMS In Debris-flow Modelling: A Case Study In The Dolomites. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. v.60. pp.197-206. doi:10.2495/DEB080201
- Chen, Wei., Peng, Jianbing., Hong, Haoyuan., Shahabi, Himan., Pradhan, Biswajeet., Liu, Junzhi., Zhu, A-Xing., Pei, Xiangjun. and Duan, Zhao.. 2018. Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China. *Science of The Total Environment*. v.626. pp.1121-1135. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.124
- Deng, Chuxiong., Zhang, Guangye., Liu, Yaojun., Nie, Xiaodong., Li, Zhongwu., Liu, Junyu. and Zhu, Damei. 2021. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*. v.9 i.3. pp.344-359
- Devoli, Graziella., Blasio, Fabio V. De., Elverhøi, Anders. and Høeg, Kaare.. 2008. Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run-out Distance. *Geotechnical and Geological Engineering*. v.27. pp.23-42
- Ding, Xing-Yu, Hu, Wen-Jun, Liu, Fang and Yang, Xian. 2023. Risk assessment of debris flow disaster in mountainous area of northern Yunnan province based on FLO-2D under the influence of extreme rainfall. *Frontiers in Environmental Science*. 11. doi: 10.3389/fenvs.2023.1252206
- Dorta, D. Oramas., Toyos, G., Oppenheimer, C., Pareschi, M. T., Sulpizio, R. and Zanchetta, G.. 2007. Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ. *Natural Hazards*. v.40. pp.381-396. doi:10.1007/s11069-006-0035-5
- e-나라지표. <https://www.index.go.kr/>
- Earth Observatory. 2010. Landslide in Zhouqu, China. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/45329/landslide-in-zhouqu-china>
- George, David L.. and Iverson, Richard M.. 2014. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. II. Numerical predictions and experimental tests. *Proceedings the Royal of Society*. v.470. i.2170. pp. 1-31. doi:10.1098/rspa.2013.0820
- Goetz, J.N., Brenning, A., Petschko, H. and Leopold, P.. 2015. Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling. *Computers & Geosciences*. v.81. pp.1-11. doi:10.1016/j.cageo.2015.04.007
- Hossain, Md. Akbar., Zaman, Nawrin., Begum, Mahmuda., Islam, Emadul. and Hasan, Md.Rakibul.. 2022. Explainable Artificial Intelligence to Improve Human Decision Support in Heart Disease. A Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Bachelor of Science in Computer Science and Engineering

- IANIS. 2014. Maharashtra's worst landslide claims 82 lives, 130 still trapped. INDIA TODAY. Aug 2. <https://www.indiatoday.in/india/story/pune-landslide-malin-village-death-toll-rescue-operations-mass-cremation-202565-2014-08-02>
- Jiang, Wenyu., Wang, Fei., Zheng, Xiaocui., Zheng, Xinxin., Qiao, Xiaohui., Li, Xin. and Meng, Qingxiang.. 2022. Toward Interoperable Multi-hazard Modeling: A Disaster Management System for Disaster Model Service Chain. *International Journal of Disaster Risk Science*. v.13. pp.862-877
- Kalantar, Bahareh., Ueda, Naonori., Saeidi, Vahideh., Ahmadi, Kourosh., Halin, Alfian Abdul. and Shabani, Farzin.. 2020. Landslide Susceptibility Mapping: Machine and Ensemble Learning Based on Remote Sensing Big Data. *Remote Sens*. v.20. n.11. 1737. pp.1-23. doi:10.3390/rs12111737
- Kim, Jun Woo, Jung, Huicheul and Kim, Ho Gul. 2023. Comparative Analysis of Future Landslide Susceptible Areas Based on Climate Change Scenario Applications. *Journal of people, plants, and environment(JPPE)*. v.26. n.5. pp.565-581
- Landslides@NASA. Landslide Team Projects. <https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html#GLC>
- Larsen, Matthew C., Wiczeoreck, Gerald F., Eaton, L. Scott., Morgan, Benjamin A. and Torres-Sierra, Heriberto.. 2002. Natural hazards on alluvial fans: The Venezuela debris flow and flash flood disaster. U.S. Geological Survey Fact Sheet 103-01. USGS
- Lehmann, P., Ruette, J. von. and Or, D.. 2018. How Landslides Become Disasters. EOS. Aug 27. <https://eos.org/science-updates/how-landslides-become-disasters>
- Li, Liu.. 2010. UNICEF sending medical supplies to landslide-hit Zhouqu County. UNICEF. Aug 20. <https://www.unicef.cn/en/press-releases/unicef-sending-medical-supplies-landslide-hit-zhouqu-county>
- Lina, Yang. 2011. NW China's Zhouqu mourns victims, steps up reconstruction one year after devastating mudslide. reliefweb. Aug 8. <https://reliefweb.int/report/china/nw-chinas-zhouqu-mourns-victims-steps-reconstruction-one-year-after-devastating>
- Long, Priscilla. 2014. Catastrophic landslide hits Steelhead Haven, near Oso, Snohomish County, on March. HistoryLink.org. Sep 17. <https://www.historylink.org/File/10792>
- Magirl, Christopher S., Griffiths, Peter G. and Webb, Robert H.. 2010. Analyzing debris flows with the statistically calibrated empirical model LAHARZ in southeastern Arizona, USA. *Geomorphology*. v.119. i.1-2. pp.111-124

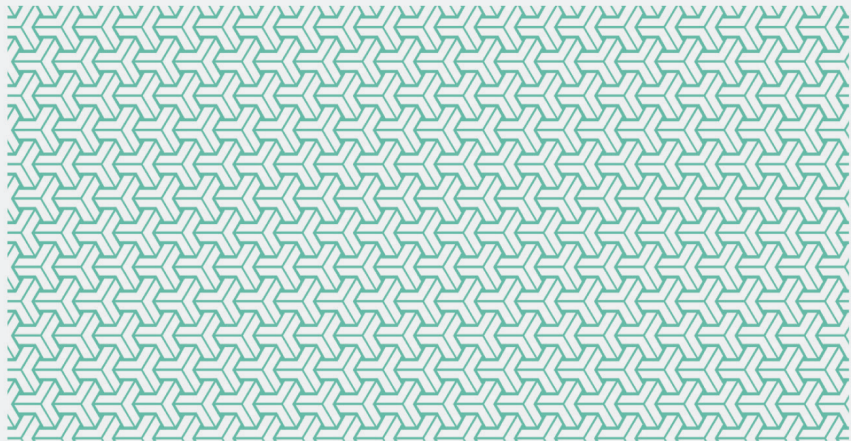
- Merghadi, Abdelaziz., Yunus, Ali P., Dou, Jie., Whiteley, Jim., ThaiPham, Binh., Bui, Dieu Tien., Avtar, Ram. and Abderrahmane, Boumezbeur.. 2020. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*. v.207. pp.1-47. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103225
- Mikoš, Matjaž. and Bezak, Nejc.. 2021. Debris Flow Modelling Using RAMMS Model in the Alpine Environment With Focus on the Model Parameters and Main Characteristics. *Frontiers in Earth Science*. v.8. pp.1-11
- Mishra, Mallikarjun., Dugesar, Vikas., Raju, K.N.Prudhvi., Sarkar, Shraban., and Vishwakarma, Mukesh.. 2017. Post-Disaster Investigation of the Malin Slope Failure Deccan Plateau, India. *National Geographical Journal of India. National geographical Society of India*. v.63 n.3. pp.1-7
- Moloney, Anastasia.. 2019. Danger still lingers two years after Colombia's deadly Mocoa landslide. Reuters. Mar 31. <https://www.reuters.com/article/idUSKCN1RC0BB/>
- Muñoz, Á.G., Ruiz, D., Ramírez, P., León, G., Quintana, J., Bonilla, A., Torres, W., Pastén, M. and Sánchez, O.. 2012. Risk Management at the Latin American Observatory. *Risk Management - Current Issues and Challenges*. doi:10.5772/50788
- NBC NEWS. 2017. Colombia Mourns Hundreds Killed in Mudslides. Apr 6. <https://www.nbcnews.com/slideshow/colombia-mourns-hundreds-killed-mudslides-n743061>
- Nguyen, Vu Viet., Pham, Binh Thai., Vu, Ba Thao., Prakash, Indra., Jha, Sudan., Shahabi, Himan., Shirzadi, Ataollah., Ba, Dong Nguyen., Kumar, Raghvendra., Chatterjee, Jyotir Moy. and Bui, Dieu Tien.. 2019. Hybrid Machine Learning Approaches for Landslide Susceptibility Modeling. *Forests*. v.10. n.2. 157. pp.1-27. doi:10.3390/f10020157
- Ocean Global. 2023. The Ultimate Guide to Landslide Prevention: Tips and Techniques for a Secure Environment. Jul 7. <https://oceangeosynthetics.com/the-ultimate-guide-to-landslide-prevention/>
- OurWorldinData. 2024. Economic damage by natural disaster type, 2013 to 2024. Apr 11. <https://ourworldindata.org/grapher/economic-damage-from-natural-disasters?time=2013..2024&showSelectionOnlyInTable=1&country=Landslide~Wet+mass+movement>
- Paltrinieri, Nicola., Comfort, Louise. and Reniers, Genserik.. 2019. Learning about risk: Machine learning for risk assessment. *Safety Science*. v.118. pp.475-486

- Peng, Szu-Hsien. and Lu, Shih-Chung.. 2013. FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in southeastern Taiwan during Typhoon Morakot. *Journal of Mountain Science*. v.10. i2. pp.207-218
- Petley, Dave. 2014. Malin landslide in Pune, India: a mass fatality mudslide yesterday. AGU Blogosphere . Jul 31. <https://blogs.agu.org/landslideblog/2014/07/31/malin-landslide-1/>
- Pham, Binh Thai., Pradhan, Biswajeet., Bui, Dieu Tien., Prakash, Indra. and Dholakia, M.B.. 2016. A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: A case study of Uttarakhand area (India). *Environmental Modelling & Software*. v.84. pp.240-250. doi:10.1016/j.envsoft.2016.07.005
- PreventionWeb. 2019. Danger still lingers two years after Colombia's deadly Mocoa landslide. Mar 31. <https://www.preventionweb.net/news/danger-still-lingers-two-years-after-colombias-deadly-mocoa-landslide>
- Sandoval, Vicente., Voss, Martin., Flörchinger, Verena., Lorenz, Stephan. and Jafari, i Parisa.. 2023. Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance Its Study and Assessment. *International Journal of Disaster Risk Science*. v.14. pp.343-356
- Schilling, Steve P.. 2014. Laharz_py: GIS Tools for Automated Mapping of Lahar inundation Hazard Zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073. USGS. <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1073/>
- Seattle Times staff. 2024. Oso landslide: A 2014-2024 timeline of devastation, discovery and memory. The Seattle Times. Mar 18. <https://www.seattletimes.com/seattle-news/oso-landslide-a-2014-2024-timeline-of-devastation-discovery-and-memory/>
- The Seattle Times. <https://special.seattletimes.com/o/flatpages/local/oso-mudslide-coverage.html>
- Trimble. 2021. Deep Learning (CNN) Algorithms. Reference Book eCognition Developer. https://docs.ecognition.com/v10.0.2/eCognition_documentation/Reference%20Book/02%20Algorithms%20and%20Processes/9%20Deep%20Learning%20%28CNN%29%20Algorithms/Deep%20Learning%20%28CNN%29%20Algorithms.htm
- Wieczorek, G.F., Larsen, M.C., Eaton, L.S., Morgan, B.A. and Blair, J. L.. 2016. Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation. U.S. Geological Survey Open File Report 01-0144. USGS. doi:10.3133/ofr01144. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0144/>

- Witt, A.C.. 2017. Using LAHARZ to Determine Potential Inundation Associated with a Surface Mining-Related Debris Flow in the Appalachian Coalfields of Southwest Virginia, USA.. 3rd North American Symposium on Landslides. Jun 4-8. Association of Environmental & Engineering Geologists (AEG). pp.381-389
- Witt, A.C., Wooten R.M., Gillon, K.A., Douglas, T.J., Fuemmeler, S.F., and Bauer, J.B., 2012, Determining potential debris flow inundation zones for an emergency response using LAHARZ: The Ghost Town debris flow, Maggie Valley, North Carolina, USA. In: Eberhardt E., Froes C., Turner A.K., Leroueil S. (Editors), Landslides and engineered slopes: Protecting society through improved understanding. 11th International symposia on landslides and 2nd North American Symposium on landslides, June 2-8 2012, Banff, Canada, pp. 711-715.
- World health Organization. Landslides. https://www.who.int/health-topics/landslides/#tab=tab_1
- Xiang, Zhang. 2010. China steps up disaster prevention work in Zhouqu after massive landslide. Xinhua. Oct 24. reliefweb. <https://reliefweb.int/report/china/china-steps-disaster-prevention-work-zhouqu-after-massive-landslide>
- Youberg, Ann M., Webb, Robert H., Fenton, Cassandra R. and Pearthree, Philip A.. 2014. Latest Pleistocene-Holocene debris flow activity, Santa Catalina Mountains, Arizona: Implications for modern debris-flow hazards under a changing climate. *Geomorphology*. v.219. pp.87-102
- ZD. 2017. UN reports over 250 people dead in Colombian landslides. XINHUANET. Apr 4. http://www.xinhuanet.com/english/2017-04/04/c_136180950.htm
- Zimmermann, Maria Lourdes.. 2017. A foreseen environmental disaster in Colombia?. MONGABAY. Apr 20. <https://news.mongabay.com/2017/04/a-foreseen-environmental-disaster-in-colombia/>

Big Data-Based Landslide Risk Analysis for Buildings and Study on Linking Disaster Risk at the Building Unit

Summary



Cho, Youngjin
Heo, Hankyul
Hyeon, Taehwan
Song, Yumi
Kim, Hogul
Yum, Seungil
Kim, Junwoo

1. Introduction

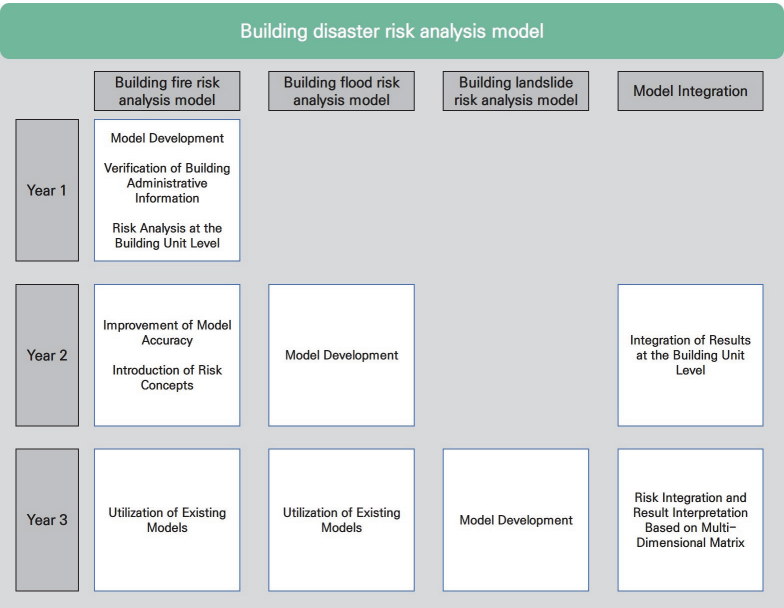
In recent years, large-scale disasters such as the fire at Coupang's distribution center in Icheon, the flooding at Gangnam Station, and the landslide in Yecheon have occurred frequently, raising concerns about public safety. Disasters that occur in buildings and urban spaces are closely related to people's daily lives, which increases anxiety. In the case of buildings, the cost of damage is high, and physical injuries and deaths of building occupants may occur. Therefore, it is necessary to analyze the risk of disasters and catastrophes in buildings and prepare measures to ensure safety.

Landslides are particularly common during extreme rainfall events, causing physical damage to the building itself, as well as property damage and loss of life in the exterior of the building. In particular, landslides such as the one that occurred in Yecheon in July 2023 have caused large-scale loss of life and property damage to buildings and residents near forests, raising public concern about landslides. In response, various measures have been proposed in laws and institutions, and overseas countries are also seeking ways to minimize damage in various ways.

The characteristics and location of buildings have an important impact on the likelihood of disasters and the extent of damage. For example, buildings with large floor areas are relatively more likely to be affected by fires, low-lying buildings are more likely to be affected by floods, and the extent of damage is likely to increase if there is a basement. By using the disaster damage characteristics of buildings, it will be possible to identify buildings with high disaster risk and prioritize their inspection and management to ensure effective building safety.

Disaster risk at the building level is determined by a variety of factors, making it difficult to accurately predict or estimate. Recently, advanced technologies such as IoT, machine learning, deep learning, and big data have made it possible to analyze the disaster risk of buildings and urban spaces with greater accuracy than previous studies. By processing large amounts of data, it is possible to analyze the complex characteristics of buildings in an integrated manner and build risk analysis models for different types of disasters. Based on the disaster risk analysis of buildings, it is possible to prepare measures to ensure the safety of buildings.

This study aims to derive a method for analyzing various disaster risks that can damage buildings, and to establish a method for linking disaster risks. This study is the third year of a three-year research project, and the first and second years of the study focused on fire and flood risks in buildings. In the third year, we will develop an analysis method for building landslide risk as an additional disaster element, and develop and apply a method for linking multiple disaster risks.



Development Status of Models by Year

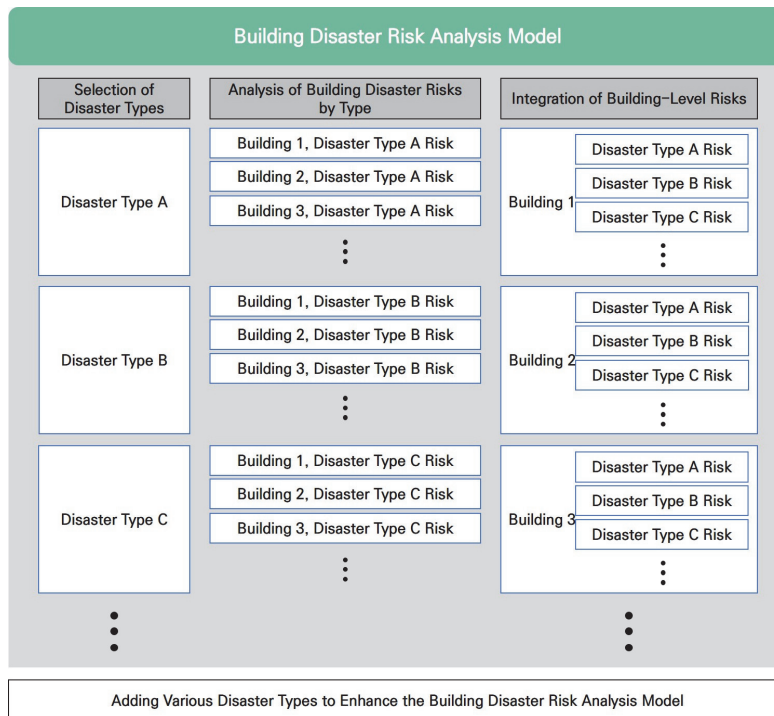
This study is divided into four phases. First, the development of a building risk analysis model. The existing models are reviewed and the development framework of the model to be developed in this study is presented. Second, the development of a building landslide risk analysis model. This study aims to develop a method for analyzing the risk of building landslides, a type of hazard that was not included in the first and second studies. Third, the developed model will be used to analyze the risk of building landslides. In doing so, we aim to establish building risk data in the landslide sector for linking building disaster risk. Finally, we aim to link building landslide, flood and fire risks at the building level. In this way, we will verify the effectiveness of the building disaster linkage model and suggest policy improvements to enhance the disaster safety of buildings by synthesizing the implications derived from the entire research process.



Concept of Landslide Risk Analysis Model for Buildings

2. Development Direction of Disaster Risk Analysis Models for Buildings

The building risk analysis model developed in this study aims to fulfill three criteria. First, it should be able to respond to a variety of disaster types and be able to freely add or remove disaster types. Second, it should be able to represent disaster risk at the building level. Third, the results should be easy to understand so that countermeasures can be developed based on building disaster risk. To this end, a building disaster risk analysis model will be developed to analyze the risk of buildings for individual disaster types and to link the disaster risks analyzed at the building level.

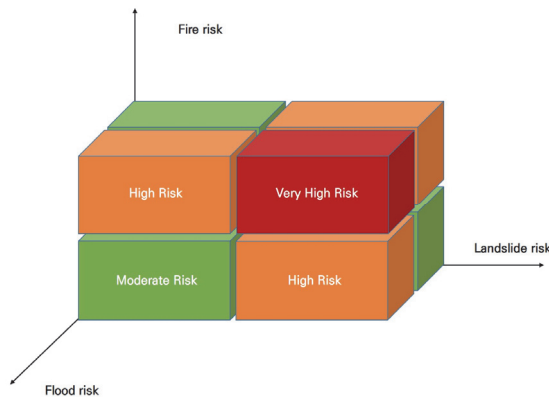


Concept of Developing Disaster Risk Analysis Models for Buildings

The analytical process of a building disaster risk analysis model can be divided into three steps. First, the type of disaster to be considered is selected. However, since the building disaster risk analysis model in this study aims to link the risks of building units, it is necessary to select the types of disasters that can cause damage to buildings. Second, the disaster risk of each building is derived by disaster type. For this purpose, it is necessary to develop a risk analysis method for each type of disaster, and this study aims to develop a building landslide risk analysis method following the building fire and flood risk analysis method in previous studies. Third, it is the step of linking disaster risks to building units. In order to link different disaster risks in the same building unit, this study applies the multidimensional matrix technique.

Multidimensional matrix is a tool that can organize and analyze data from multiple dimensions simultaneously, and is effective in systematically identifying interactions among risks and formulating comprehensive response strategies. It enables prioritization, scenario analysis, and the systematic management of complex data, taking into account the correlation between risks. However, the complexity and data requirements of a multidimensional matrix increase dramatically as the number of dimensions increases. Lack of sufficient data or difficulty in quantifying risks can reduce the reliability of the analysis, and the cost and time required to build and maintain them can be prohibitive for small organizations.

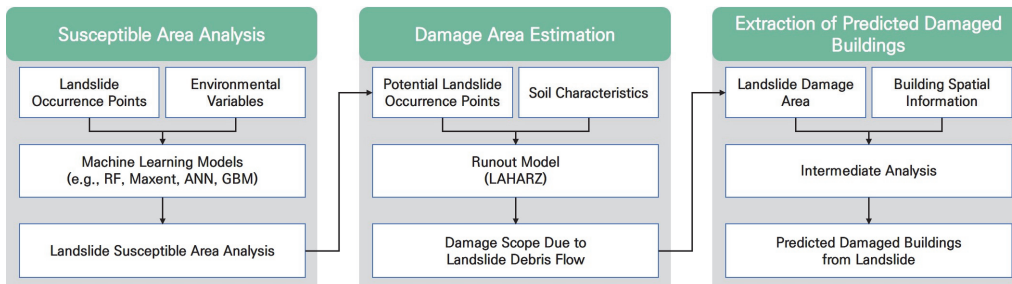
In this study, a multidimensional matrix is used to comprehensively analyze the fire, flood, and landslide risks of buildings at the building level. The risk level for each type of hazard can be determined for each building and the combined risk level for all three hazards can be analyzed. This allows you to assess a building's exposure to a combination of hazard types and develop strategies for specific situations.



Concept of Multi-Dimensional Matrix-Based Integrated Disaster Risk

3. Developing Landslide Risk Analysis Models for Buildings

The Building Landslide Risk Analysis Model consists of a three-step process: 1) identification of landslide-prone areas, 2) identification of landslide-prone areas, and 3) identification of buildings at risk of landslide damage.



Concept of Landslide Risk Analysis Model for Buildings

To identify landslide-prone areas, historical landslide occurrence data and environmental variables related to topography, soil, vegetation, and climate that affect landslide occurrence were used. To increase the reliability of the data used as the dependent variable, Pearson's correlation coefficient was used to exclude variables with high correlation. Machine learning based ensemble models such as ANN, XGBoost and GLM were used as models to analyze landslide prone areas. The AUC value for the accuracy analysis of the final model was 0.934, indicating that the model is highly accurate.

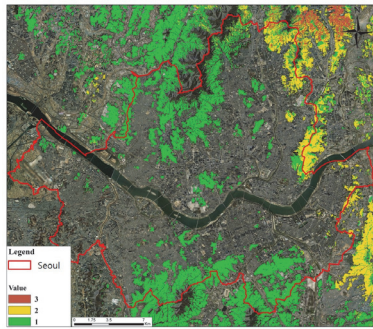
To derive the landslide hazard area, different runout models were considered and finally LAHARZ was used. LAHARZ is a software developed by the United States Geological Survey (USGS) for debris flow analysis and is widely used for landslide extent analysis. For the analysis, the possible landslide points were extracted from the results of the landslide-prone area, and information such as weather conditions, topography, geology, soil, and vegetation were used to analyze the extent of damage caused by debris flows in the event of a landslide.

Finally, we extracted the buildings that were within the damage area of the debris flows. For this purpose, the information from the building register was geocoded and converted into spatial data. The geocoding was performed using the geocoding tool of BIZ-GIS, and the analysis was performed on 596,244 buildings in Seoul.

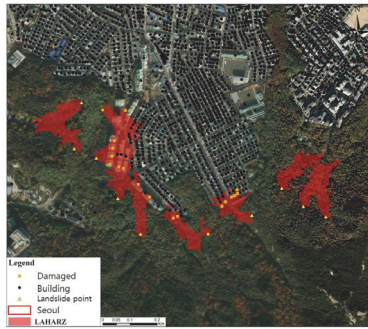
4. Integrated Analysis of Landslide, Flood, and Fire Risks for Buildings

Seoul was selected as the target city for the analysis of building landslide-flood-fire risk nexus. The flood and fire risks of buildings in Seoul were derived from the results of the second year of the study, and the landslide risk of buildings was analyzed in this study. The percentage of landslide occurrence points in the landslide-prone areas identified by the model analysis is 88.4%, which shows a relatively high accuracy.

To derive the landslide risk for each building, a landslide damage area analysis was conducted for Gwanak-gu, Seoul. The landslide-prone areas were extracted from areas where the landslide sensitivity analysis showed a sensitivity of more than 80%. A total of 19 possible landslide sites were identified in Gwanak-gu, and the LAHARZ model was run on these sites.



Analysis Results of Landslide
Susceptibility in Seoul



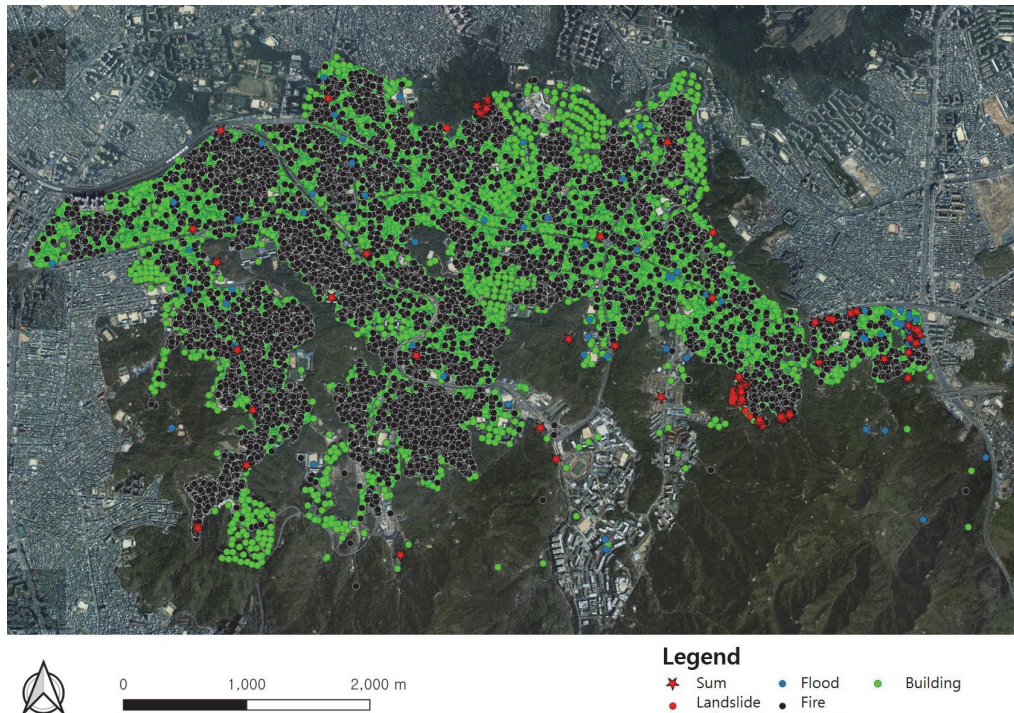
Example of LAHARZ Model Simulation
Results

Analysis Results of Landslide Susceptibility and Damage Scope

After deriving the landslide damage area, an overlap analysis was performed with the building spatial information. In 10 of the 19 possible landslide sites, buildings were located within the damage area in the event of a landslide, but in the remaining 9 sites, no buildings were found to be damaged even if a landslide occurred. As a result, a total of 67 buildings in Gwanak-gu, Seoul are likely to be damaged in the event of a landslide.

Finally, we linked the building fire, flood, and landslide risks for Gwanak-gu, Seoul. By linking the three risks through a multidimensional matrix, the risk of buildings is classified into eight categories: “very risky”, “risky”, “somewhat risky”, and “safe”, according to the number of high-risk disaster types. Of the 32,079 buildings in Gwanak-gu, 48 buildings (0.15 percent) are at high risk of fire and flood, mainly located along rivers and boulevards. On the other hand, 47 buildings (0.15 percent) are at high risk of fire and landslide, mainly located in forested areas.

There were no buildings at high risk of both flood and landslide, and therefore no buildings at high risk of all three hazard types. A total of 95 buildings (0.3 percent) were at risk of two or more types of hazards, which is consistent with the sum of the number of buildings at risk of fire and flood, and fire and landslide. Based on the risk characteristics of each type of building disaster and the regional distribution of high-risk buildings, it will be possible to establish inspection areas, set inspection items, and prepare countermeasures to ensure the safety of buildings.



Integrated Results of Landslide, Flood, and Fire Risks for Buildings

5. Conclusions

This study aims to identify various disaster risks of buildings in advance by linking them and deriving basic data to propose efficient management measures based on them. In connection with the existing first and second year studies, we have analyzed the landslide, flood, and fire risks of buildings by developing a method for analyzing the landslide risk of buildings and introducing a multidimensional matrix technique that can link various risks. The results of the study show that the disaster risk of buildings can be predicted with high accuracy. The study also provides three policy implications.

First, it is necessary to strengthen data linkage at the building level. Various data have been used to analyze the disaster risk of buildings, but the data are currently managed inefficiently in individual systems. By integrating and distributing disaster-related information such as fire, flood, and landslide into a building life history system, data linkage should be improved and a system should be established to facilitate safety management activities such as statistical analysis of disaster safety, alerting, and emergency inspections.

Second, a building-level disaster risk identification system is needed. Currently, services that provide building-level disaster safety information are limited, and it is difficult for people to check whether their buildings are safe from disasters. By establishing a building-level disaster risk identification service using a building life history management system, residents and users can easily determine whether their buildings are safe and take countermeasures. This will help ensure disaster safety and increase the efficiency of building management.

Third, it is necessary to establish an integrated building safety platform. Currently, disaster information such as fire, flood, and landslide is managed by different organizations and is not integrated at the building level, which reduces efficiency. It is necessary to build an integrated platform where building occupants and users can check various disaster information such as heat wave, typhoon, etc. at a glance, in addition to fire, flood, and landslide. To do this, it is necessary to link data between different organizations and build additional disaster risk data that is missing.

Keywords

Big Data, Building Fire Risk, Building Flood Risk, Building Landslide Risk, Machine Learning