

auri brief.

건축공간연구원

우리 집은 산사태로부터 안전한가? - 머신러닝을 활용한 건축물 산사태 위험 분석

허한결 부연구위원 (044-417-9665, hkheo@auri.re.kr)

조영진 선임연구위원 (044-417-9692, yjcho@auri.re.kr)

* 이 글은 조영진 외. (2024). 빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 연계 방안 연구. 건축공간연구원 중 일부 내용을 정리하여 작성함

2011년 우면산 산사태를 계기로 산사태는 더 이상 산에서만 발생하는 재난이 아니라, 우리 집과 생활공간인 건축물을 직접 위협하는 문제라는 인식이 생겼다. 이에 이번 연구에서는 산사태가 일어날 가능성이 높은 지점을 찾고, 산사태 피해 범위를 시뮬레이션한 뒤, 그 영향권 안에 포함되는 건축물을 찾아내는 방식으로 건축물 단위의 산사태 위험을 분석하였다. 그 결과, 일부 지역에서는 산사태 발생 시 실제로 국민의 생활공간인 아파트와 주택이 피해를 입을 수 있는 것으로 나타났다.

극한강우 등 기후변화로 산사태는 더욱 많이 발생할 것으로 예측되며, 이미 시행 중인 제도는 물론 피해지역 복구, 사전 예방 공사, 위험지역 내 건축 규제 및 도시계획 등 다양한 정책수단을 조합해 산사태로 인한 인명·재산 피해를 줄이기 위한 정책방안 마련이 필요하다. 더불어 국민이 자신이 거주·이용하는 건축물의 산사태 등 재난 취약성을 확인하고 대비할 수 있도록 '건축물 단위 재난위험 정보 제공 서비스'도 구축할 필요가 있다.

● 산사태로 인한 국민 안전 불안감 확산

산사태는 오랜 기간 우리 국민의 인명과 재산의 심각한 손실을 입혔다. 2002년 태풍 ‘루사’로 인한 산사태 인명 피해와 복구액이 각각 35명과 2,994억 원, 2003년 태풍 ‘매미’로 인한 산사태 인명 피해와 복구액이 각각 10명과 2,278억 원으로 집계되었다.¹⁾ 이후에도 산사태 피해는 지속적으로 발생하고 있으며, 2015년부터 2024년까지 10년간 인명 피해는 29명, 피해 복구 비용은 약 6,966억 원에 달한다.

2011년 7월 서울 우면산에서 발생한 산사태는 큰 인명 피해와 재산 피해를 일으키며 산사태에 대한 국민들의 불안감을 높였다. 산사태에 안전하다고 생각했던 건축물은 3층 높이까지 쌓인 산사태 토석류 앞에 속수무책으로 피해를 입었다.

최근에도 산사태에 의한 피해가 계속 발생하고 있으며, 거주지 주변에서 발생한 산사태가 국민이 거주하는 건축물을 덮치는 피해가 보고되고 있다. 2023년 7월에 예천에서 발생한 대규모 산사태가 마을을 덮쳐 여러 채의 주택이 붕괴하고 17명의 사망자가 발생하였으며,²⁾ 2025년 7월 경남 산청군에서 발생한 산사태 또한 건물과 인명 피해를 야기하였다.³⁾

이제는 산사태 피해를 최소화하기 위해 산사태 위험지역을 파악하고 대응하는 방식에 더하여 건축물 단위의 산사태 위험성 분석과 대응이 필요하다. 이를 위한 첫 단계로, 국민이 생활하는 개별 건축물이 산사태 위협으로부터 안전한지 확인할 필요가 있다. 이전까지는 산사태 발생 가능성이 높은 지역을 찾아내 산사태 발생 가능성을 저감시키기 위해 연구를 수행하였다면, 이번에는 산사태 발생 시 피해를 입을 수 있는 건축물을 도출하여 건축물이 산사태에 대비할 수 있도록 지원할 필요가 있다.

● 건축물 산사태 리스크 분석모델

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

①산사태 위험지역을 파악하기 위해 과거 산사태 발생 지점을 기반으로, 지형·토양·식생·기후 등 산사태 발생에 영향을 미치는 여러 환경 변수를 활용하였다. 이때 독립변수로 사용할 자료 간 중복성을 줄이고 신뢰성을 높이기 위해 피어슨 상관계수를 도출하여 상관성이 과도하게 높은 변수는 분석에서 제외하였다.

②산사태 피해범위를 추정하기 위해 여러 종류의 런아웃(runout) 모델을 비교·검토한 뒤, 최종적으로 LAHARZ를 적용하였다. LAHARZ는 미국 지질조사국에서 개발한 분석모델로, 산사태로 인한 토석류 확산 범위를 파악하는 데 널리 활용된다. 이번 연구에서는 LAHARZ를 이용하여 산사태가 발생했을 때 토석류가 도달할 수 있는 공간적 피해범위를 산정하였다.

③이렇게 산정된 토석류 피해범위 내부에 포함되는 건축물을 추출하였다. 이를 위해 건축물대장 자료를 지오코딩 처리하여 좌표 정보를 가진 공간데이터로 변환한 뒤, 피해범위와 공간 중첩 분석을 통해 산사태 영향이 예상되는 건축물을 도출하였다.



산사태 위험 건축물 분석 프로세스

출처: 조영진 외(2024, p.vi)

● 산사태 발생 위험지역 분석

• 산사태 발생 위험지역 분석 모델

최근 머신러닝, 딥러닝 분석 방법의 개발로 산사태를 포함한 다양한 재난·재해 예측 정확도가 높아지고 있다. 이번 연구에서는 산사태 발생 위험지역을 도출하기 위해 여러 기계학습 모델을 복합적으로 활용하여 분석의 정확도를 높이고 불확실성을 줄여주는 앙상블 모델을 활용하였다. 총 10개의 개별 모형(ANN, CTA, FDA, GAM, GBM, GLM, MARS, Maxent, SRE, XGBoost)을 활용하도록 모델을 구성하였다.

각 모델 학습을 위한 종속변수로는 산사태 발생지역 데이터를 활용하였다. 서울시의 산사태 발생지점 데이터는 90건으로 발생지점 수가 적어, 산사태 발생 위험지역 모델 학습 및 정확도 확보에 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 모델 학습을 위해 경기도 산사태 발생지점 데이터를 추가로 활용하였다. 결과적으로 2008년부터 2022년 사이 서울시와 경기도에서 발생한 642건의 산사태 발생지점 데이터를 활용하였다.

모델 학습 및 산사태 발생 위험지역을 예측하기 위한 독립변수로는 지형, 토양, 식생, 기후 관련 변수 22개를 수집하였다. 이후 변수 간 피어슨 상관계수를 계산하여 상관계수가 높은 변수를 제거하였다. 이를 통해 모델의 과적합 문제를 예방하고, 모델의 불필요한 복잡성을 제거하였다. 최종적으로 경사, 고도, 향, 평면 곡률, 측면 곡률, 하천강도지수, 토양습윤지수, 유효토심, 배수등급, 토양유형, 경급, 영급, 여름철(6~10월) 평균 강수량, 1일 최대 강우량의 14개의 환경변수를 사용하여 모델을 학습시켰다.

산사태 발생 위험지역 분석을 위한 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	흙토람 토양도(1:25,000)
토양	유효토심	흙토람 토양도(1:25,000)
	배수등급	흙토람 토양도(1:25,000)
	토양 유형	산림공간정보서비스(2020)
식생	경급	산림공간정보서비스(2020)
	영급	산림공간정보서비스(2020)
	산림 유형	산림공간정보서비스(2020)
기후	연평균 강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	여름철(6~10월) 평균 강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	1일 최대 강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	5일 최대 강수량	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	일 강우량이 80mm 이상인 날	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	일 강우량이 120mm 이상인 날	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	일 강우량이 150mm 이상인 날	기상자료개방포털(ASOS, AWS)
	3일 주기 누적 강우 150mm 이상 횟수	기상자료개방포털(ASOS, AWS)

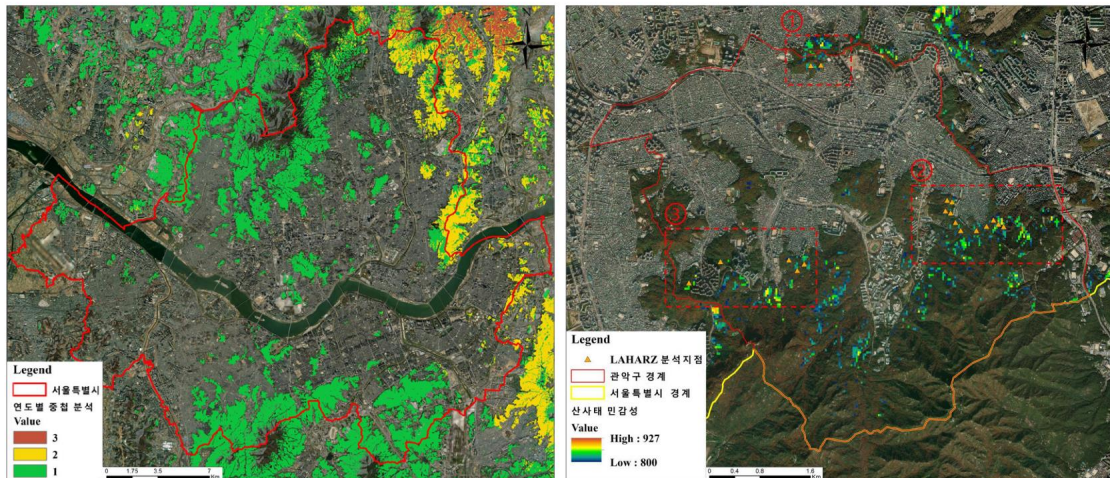
출처: 조영진 외(2024, p.69)

• 산사태 발생 위험지역 분석 결과

학습된 산사태 발생 위험지역 분석 모델을 통해 서울시 내 산사태 발생 위험지역을 도출하였다. 분석 결과의 정확도를 판단할 수 있는 AUC⁴⁾ 값은 0.934로 나타났고, 이를 바탕으로 모형의 분석 정확도가 높은 것으로 판단할 수 있다. 산사태 발생 위험지역을 도출하는 데 기여도가 높은 주요 변수로는 여름철 강우량과 DEM,⁵⁾ 그리고 배수등급으로 나타났다.

분석 결과 서울시 전체를 산사태 발생 위험이 높은 지역으로 보기는 어렵지만, 산사태 발생 위험지역이 일부 분포하는 지역이 있었다. 상대적으로 산지가 많은 관악구 등이 이에 해당한다.

산사태 위험지역은 산림지역에 위치하나, 대부분의 건축물은 산림지역 외부에 있기 때문에 단순한 중첩분석으로는 산사태 피해 위험 건축물을 알아내기 어렵다. 따라서 이번 연구에서는 서울시 관악구를 사례로 산사태 발생 가능지점을 예측하고, 이 지점에서 발생한 산사태 피해가 인근 건축물에 영향을 미치는지 확인하고자 하였다.



산사태 발생 위험지역 분석 결과: (좌)서울시 전체, (우)관악구 인근 지역

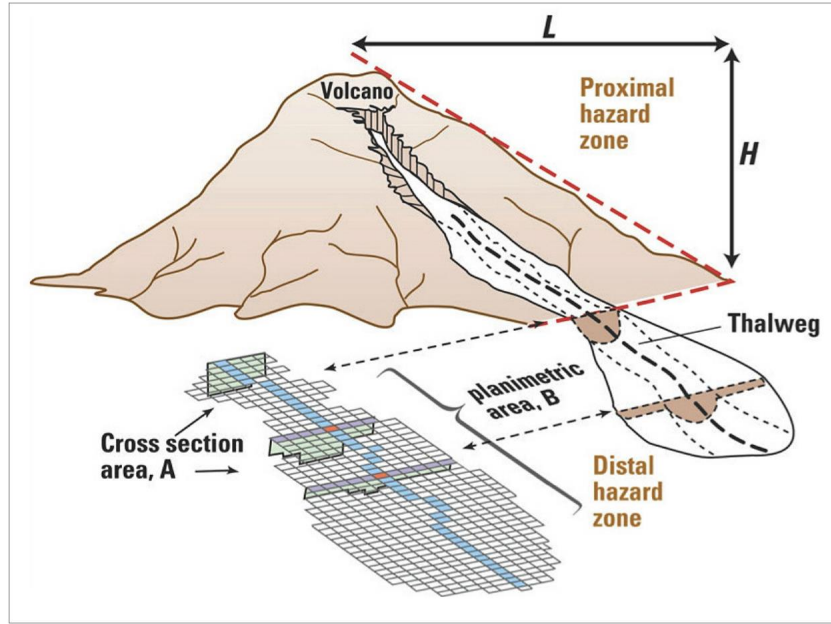
출처: 조영진 외(2024, p.84, 86)

● 건축물의 산사태 위험성 분석

• 산사태 피해 범위 시뮬레이션 방법

산사태 시 발생하는 토석류는 건축물에 피해를 입히는 주요 요인이다. 토석류는 기존의 머신러닝 분석 방법으로는 피해범위를 예측하기 어려우며, 시뮬레이션 분석이 필요하다. 이에 산사태 발생 시

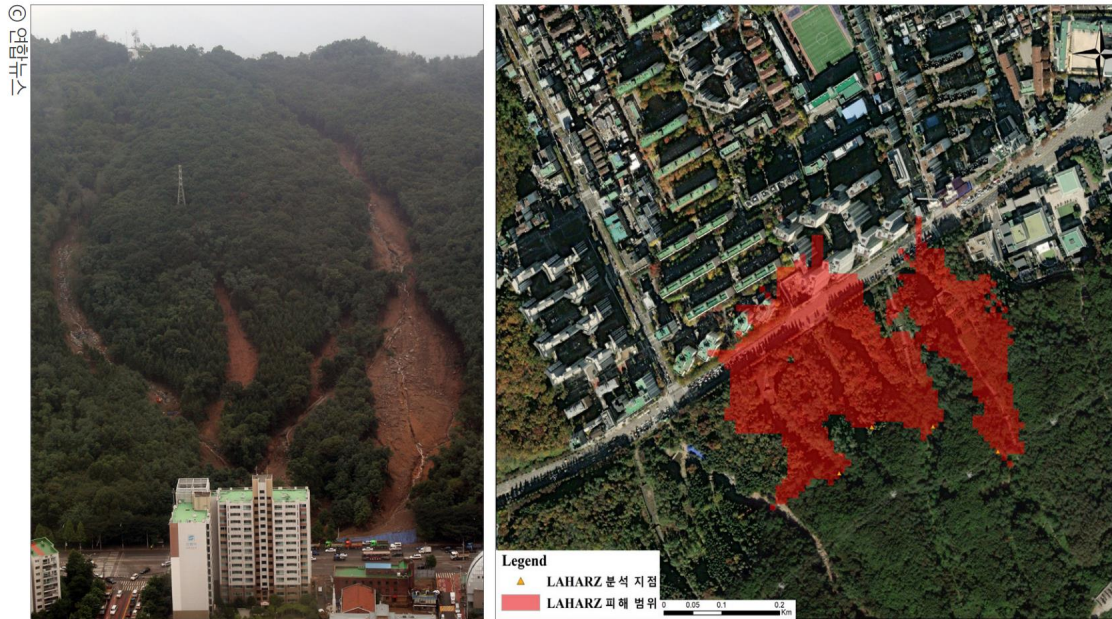
토석류 피해범위를 예측하기 위해 미국 지질조사국(United States Geological Survey: USGS)에서 개발한 LAHARZ 모델을 이용하였다. LAHARZ 모델은 산사태 발생지점과 분석에 필요한 환경변수를 입력하면 물질의 확산 경로를 예측하여 토석류 피해범위를 시뮬레이션할 수 있는 모델이다.



LAHARZ 모델을 사용한 화산성 이류 및 토석류 위험 구역

출처 : Schilling(2014, p.5, <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1073/>, 검색일: 2024.6.3.)

LAHARZ의 토석류 모듈은 입력된 토석류 부피를 바탕으로, 토석류가 흐르면서 어느 경로로 이동하고 어느 범위까지 확산할지 분석하는 도구이다. 이 과정에서 부피가 커질 때 횡단면적과 평면 면적이 어떻게 달라지는지를 경험식으로 표현한다. 이 과정에서 산정되는 토석류의 횡단면적은 부피가 커질수록 함께 증가하며, 특정 지점에서 토석류가 얼마나 넓게 퍼지는지를 나타내는 지표가 된다.



우면산 지역 대상 시뮬레이션 결과

출처: 조영진 외(2024, p.79)

LAHARZ 모델의 정확도 개선을 위해서는 토석류 부피값의 산정이 중요하며, 정밀한 부피값 산정을 위해서는 모델에 적용하는 변수와 상관계수를 국내 상황에 맞게 설정해야 한다. 이를 위해 2011년 산사태가 발생한 우면산 지역을 대상으로 LAHARZ 모델을 시범 적용하였다. 실제 우면산 산사태 피해 범위와 유사한 결과를 얻을 수 있도록 분석을 반복 적용하여 관계 변수와 상관계수를 설정하였다.

• 산사태 피해를 받는 건축물 도출

관악구 산사태 발생 위험지점을 대상으로 산사태 피해 범위 시뮬레이션을 수행하였다. 산사태 피해 위험 건축물은 아래 그림과 같이 산정하였다. 건축물의 위치는 포인트 데이터의 형태로 변환시키고, LAHARZ 시뮬레이션 결과 도출된 산사태 피해 범위 내에 건축물 포인트가 포함되는지 여부를 확인하였다. 붉은색 범위 내에 건축물 포인트가 있으며 산사태 피해에 위험한 건축물(붉은 포인트)로, 그렇지 않으면 위험하지 않은 건축물(녹색 포인트)로 구분하였다.

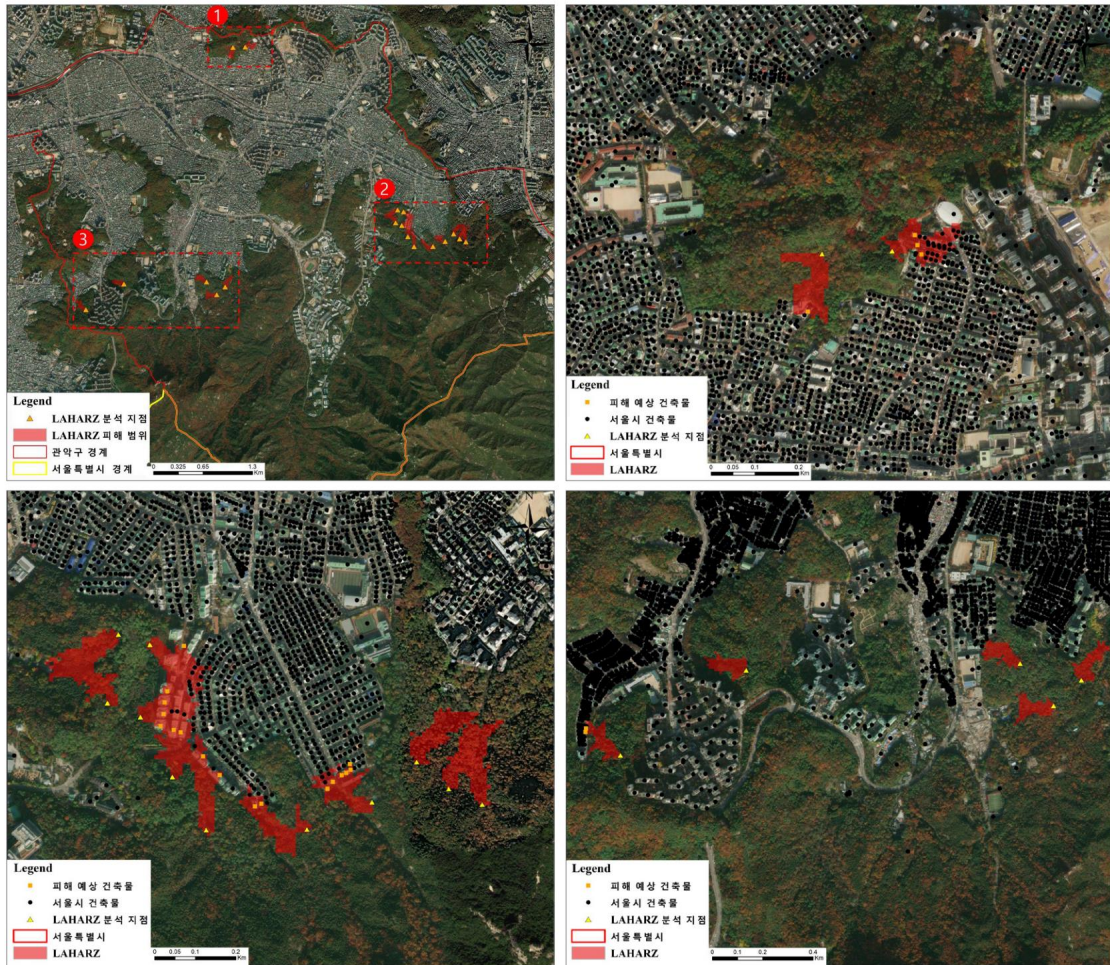


산사태 피해 위험 건축물 도출 방식

출처: 조영진 외(2024, p.88)

시뮬레이션은 관악구 내 산사태 발생 위험도가 80% 이상으로 도출된 19개 지점을 대상으로 하였다. 분석 결과 총 19개 지점 중 9개 지점에서 발생한 산사태의 토석류는 건축물이 있는 위치까지 도달하지 못하였다. 즉, 10개 지점은 산사태 발생 시 피해 범위 내에 건축물이 위치하는 것으로 확인되었다. LAHARZ 모델의 시뮬레이션 방식이 건축물의 물리적 형상은 반영하지 못하기 때문에 실제 산사태 발생 시 피해 건축물의 수는 달라질 수 있으나 이번 연구의 분석을 통한 산사태 피해 범위 내 건축물의 수는 67개로 도출되었다.

기존 LAHARZ 모델에서 건축물의 영향을 일부 반영할 수 있는 방안을 도출하였다. 건축물은 산사태 토석류 발생 시 토석류의 흐름을 방해하는 댐의 역할을 하기 때문에 어떤 건축물이 산사태 토석류 피해 범위 안에 위치하더라도, 산사태 발생 지점과 해당 건축물 사이에 다른 건축물이 있다면 실제 피해가 발생하지 않을 수 있다. 즉, 산사태 피해 건축물 산정은 토석류에 1차적으로 접하는 건축물로만 한정하였다.



산사태 피해 위험 건축물 분석 결과

출처: 조영진 외(2024, p.87)

이 같은 방식을 적용한 결과 산사태 피해가 예상되는 건축물은 총 27개로 도출되었다. 건축물대장 정보와 연계하여 산사태 피해가 예상되는 건축물의 용도와 구조를 확인하였다. 건축물대장에 기입된 용도에 따르면 아파트 13동, 주택 4동, 다세대주택 4동, 단독주택 3동, 생활편익시설 1동, 연립주택 1동, 공동주택 1동이 포함되어 있다. 또한 건축물의 구조로는 평슬라브 구조가 16동, 철근콘크리트 5동, 슬라브 3동, 세멘와즙 2동, 경사지붕 1동으로 나타났다. 다만 건축물대장 오류가 있음을 확인하였고, 이는 향후 개선되어야 할 사항으로 판단된다.



개선된 산사태 피해 위험 건축물 도출 방식

출처: 조영진 외(2024, p.88)

산사태 피해 예상 건축물의 용도 및 구조

번호	용도	구조	번호	용도	구조
1	다세대주택	철근콘크리트	15	아파트	평슬라브
2	공동주택	철근콘크리트	16	아파트	평슬라브
3	단독주택	슬라브	17	아파트	평슬라브
4	주택	세멘와즙	18	다세대주택	평슬라브
5	주택	세멘와즙	19	아파트	철근콘크리트
6	주택	슬라브	20	아파트	철근콘크리트
7	아파트	평슬라브	21	연립주택	평슬라브
8	아파트	평슬라브	22	단독주택	경사지붕
9	아파트	평슬라브	23	주택	슬라브
10	아파트	평슬라브	24	다세대주택	평슬라브
11	아파트	평슬라브	25	아파트	평슬라브
12	아파트	평슬라브	26	다세대주택	평슬라브
13	생활편익시설외 1	평슬라브	27	단독주택	철근콘크리트
14	아파트	평슬라브			

출처: 조영진 외(2024, p.89)

● 산사태 등 재난에 대응하는 건축물 안전 확보 방안

• 산사태에 대응하기 위한 국내외 국가의 정책

해외 여러 국가들 또한 산사태의 피해를 입고 있으며 이에 대한 대응 방안을 마련하고 있다. 일부 사례는 우리나라에서는 찾아보기 어려울 정도로 피해 범위와 규모가 커, 각국이 다양한 방식으로 산사태 대응체계를 마련해 온 것을 확인할 수 있다. 이러한 해외의 대응 방식은 크게 세 가지로 구분할 수 있으며, 이 중 대부분은 우리나라에서도 이미 시행 중이나 일부는 향후 우리나라에 도입하는 방안을 검토해 볼 필요가 있다.

첫째, 산사태로 피해를 입은 지역과 주민을 지원·복구하는 접근이다. 다른 재난과 마찬가지로, 산사태 발생 이후에는 피해 지역 복구가 최우선 과제로 추진된다. 다만 화재나 홍수와는 달리, 산사태의 경우 피해가 발생한 지역을 정비하여 다시 활용하는 경우와 주민을 다른 곳으로 이주시키는 경우로 대응이 나뉜다. 피해 지역을 재이용하는 국가들은 주변 산림에 추가적인 붕괴를 막기 위한 각종 방지 대책을 병행하여, 향후 유사한 피해가 재발하지 않도록 대비하고 있다.

둘째, 애초에 산사태가 일어나지 않도록 위험을 줄이는 사전 예방 중심의 대응이다. 많은 국가에서 산사태 발생 이후 해당 구역의 산림을 대상으로 사면 안정화 공사, 옹벽 설치, 계단식(테라스) 조성 등 구조적 보강을 추진해 추가 발생 위험을 낮추려는 노력을 기울이고 있다. 이는 우리나라의 사망사업과 유사한 개념으로, 거의 모든 국가에서 공통으로 수행되는 기본적인 산사태 대응 방식이다. 더 나아가 일부 국가는 산사태 징후를 조기에 파악하기 위해 감지 센서, 원격탐사, 강우·지반 정보 등을 활용한 산사태 모니터링·예측 시스템을 구축하여 운영하고 있다.

셋째, 산사태가 발생하더라도 인명과 재산 피해를 최소화하는 방향의 공간·계획적 대응이다. 도시·국토계획 단계에서 산사태 위험이 높은 구역이나 사면 하부 지역에는 원칙적으로 건축물을 짓지 못하도록 하거나, 산림 경계선에서 일정 거리 이상 떨어져 건축하도록 규제하는 방식이 대표적이다. 이러한 토지이용·건축 규제는 다수 국가에서 공통으로 확인되며, 베네수엘라 바르가스 산사태 이후 사례처럼, 건축물의 배치와 형태를 조정해 산사태에 직접적인 영향을 받는 면적을 줄이려는 설계·계획 기법도 함께 제시되고 있다.

• 건축물 단위의 재난위험 확인 시스템 필요

건축물은 사람들이 일상에서 가장 오랜 시간을 보내는 생활공간 중 하나이다. 건축물 관련 재난사고로 발생하는 재산상의 피해, 무엇보다 인명 피해를 줄이기 위해 건축물은 안전 확보가

매우 중요한 장소이다. 그럼에도 지진 안전 여부를 알려주는 ‘우리집 내진설계 간편조회’와 같은 일부 서비스를 제외하면, 개별 건축물 단위로 재난 안전 정보를 제공하는 서비스는 거의 없는 실정이다. 현재로서는 개인이 거주하거나 이용하는 건축물이 재난에 안전한지 판단하기 위해서는 재난위험이 공간적으로 표현된 지도를 직접 확인하고, 해당 건축물이 위험지역 경계 안에 포함되는지를 일일이 대조해야 한다.

국민의 재난 안전을 실질적으로 향상시키기 위해서는 건축물 단위에서 재난 위험 수준을 확인할 수 있는 정보 체계가 필요하다. 특정 재난에 대한 위험 여부를 먼저 인지할 수 있어야만 그에 상응하는 대응 방안을 고민하고 실행할 수 있기 때문에, 현재 머무르고 있거나 이용 중인 건축물이 재난에 안전한지를 거주자와 이용자가 손쉽게 확인할 수 있어야 한다. 국민의 안전한 일상을 위해 다양한 재난에 대한 안전 여부를 건축물 단위에서 확인할 수 있는 공공 서비스가 신속히 구축될 필요가 있다.

The screenshot displays the '국토교통부 건축물 생애이력 관리시스템' (National Building Disaster Prevention Management System) interface. The main content area shows the '건물일반정보조회(요약)' (Building General Information Search (Summary)) page. The search results for a specific building are displayed in a table format.

건물일반정보			
건물명	KT&G서울타워 (KT&G서울타워)	생태번호	807a
대지면적	6,001.4㎡	면적	48,074.7㎡
지적		지구	경관지구
건축면적	4,194.94㎡	용적률 산정용 면적	28,345.22㎡
구조	철근콘크리트구조	층도	업무시설, 판매시설, 교육연구시설(복합) (6층)
층수	지하 5층 / 지상 13층	지명	(철근콘크리트)

Below the table, there is a section for '건물생애이력' (Building Life History) with a table showing the building's status over time.

구분	구분	면적	면적	면적
지하층	철근콘크리트구조	지하층지상	3,294.1㎡	2020-09-29

The interface also includes a sidebar with navigation links like '건축물 요약정보 조회', '도로명주소', '지번주소', '건물명', and a '공지사항' (Notice) section.

건축물 생애이력 관리시스템의 건축물 검색 화면

출처: 건축물 생애이력 관리시스템(<https://blcm.go.kr/>, 검색일: 2024.10.16.)

- 1) 산림청(<https://sansatai.forest.go.kr/intro/progress.do>, 검색일: 2025.10.22.)
- 2) 예천군청(<https://ycg.kr/open.content/ko/participate/disaster.guide/situation/>, 검색일: 2025.10.22.)
- 3) 김준호 외(2025, <https://www.chosun.com/national/2025/07/20/D6HTPYB3HNB5BATLBHJIITHCKU/>, 검색일: 2025.10.22.)
- 4) AUC(Area Under the Curve)는 모델의 분류 성능을 설명하는 지표로, 1에 가까울수록 성능이 좋음
- 5) DEM(Digital Elevation Model)는 지표면의 높이를 격자 형태로 표현한 자료

-
- 건축물 생애이력 관리시스템. <https://blcm.go.kr/>(검색일: 2024.10.16.)
 - 김준호, 한영원, 김수연, 김미희. (2025.7.21). "산이 우우~ 울다 순식간 와르르"... 참혹한 산청 산사태 가보니. 조선일보. <https://www.chosun.com/national/2025/07/20/D6HTPYB3HNB5BATLBHJIITHCKU/>(검색일: 2025.10.22.)
 - 산림청. 산사태 발생 추이, 대형 산사태 피해. <https://sansatai.forest.go.kr/intro/progress.do>(검색일: 2025.10.22.)
 - 예천군청. 집중호우 피해현황. <https://ycg.kr/open.content/ko/participate/disaster.guide/situation/>(검색일: 2025.10.22.)
 - 조영진, 허한결, 현태환, 송유미, 김호걸, 염승일, 김준우. (2024). 빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 연계 방안 연구. 건축공간연구원.
 - Schilling, S. 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/>(검색일: 2024.6.3.)

auri.brief.



No.305

2025.12.02.

발행처 건축공간연구원
발행인 박한용
주 소 세종특별자치시 가림로 143, 8층
전 화 044-417-9600
팩 스 044-417-9604
www.auri.re.kr

(a u r i) 건축공간연구원