

건축물 중심의 산사태 피해 대응 방향

김호걸
청주대학교 조경도시학과 교수

건축물 중심의 산사태 피해 대응 필요성

최근 5년여간 산사태로 인한 피해 면적은 2018년 2만 2,842헥타르, 2019년 5만 3,428헥타르, 2020년 39만 3,463헥타르, 2021년 1만 4,999헥타르, 2022년 8만 2,110헥타르로 확인되었다(중앙안전재난대책본부, 2023). 연도별 차이는 있으나 매년 막대한 면적의 산사태가 발생하고 있으며, 여름철 집중호우 증가와 장마 기간의 증가가 그 원인으로 지적된다. 그리고 이렇게 강우량과 강우 기간이 증가하는 것은 지구온난화에 따른 기후변화의 영향 때문인 것으로 파악된다. 기후변화 시나리오에 따른 미래 예측 결과, 중장기 미래에는 강우 관련 ‘극한 기상현상’이 더욱 증가할 것으로 전망됨에 따라 산사태 또한 더욱 증가할 것으로 예상된다. 산사태는 인명과 재산에 막대한 피해를 일으킬 수 있다. 따라서 많은 사람이 거주하고, 각종 재산이 집중된 건축물에 대한 산사태 피해 대응 방안을 찾는 것이 중요한 과제이다.

뉴스를 통해 보도된 내용을 참고하여 산림청이 작성한 ‘최근 5년여간 산사태 취약지역 내 거주민 현황 및 산사태 피해 현황’의 주요 내용을 살펴보았다(김용민, 2023). 먼저 산사태 취약지 내에 거주하는 주민은 2018년 6만 5,905명, 2019년 6만 7,690명, 2020년 6만 9,302명, 2021년 7만 2,174명, 2022년 7만 2,326명, 2023년 6월 기준 7만 2,231명으로 2023년을 제외하고는 매년 증가하는 추세를 보였다. 산사태 취약지역은 2018년 2만 5,545개소, 2019년 2만 6,238개소, 2020년 2만 6,484개소,

2021년 2만 6,923개소, 2022년 2만 7,400개소, 2023년 6월 기준 2만 7,948개소로 매년 지속적으로 증가하였다. 최근 5년간(2018~2022년) 산사태 발생으로 인한 피해 건수는 2018년 381건, 2019년 1,644건, 2020년 6,175건, 2021년 190건, 2022년 1,278건으로 총 9,668건이며, 이에 따른 사망자는 12명, 총 피해복구액은 약 4,791억 원이었다. 해당 보고서를 통해 산림청에서는 모든 지역에서 발생하는 산사태가 아닌 거주민에 대한 피해가 예상되는 경우에 초점을 맞추고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 다시 말해 인명과 재산 피해가 예상되는 지역을 파악하고, 해당 지역에 산사태 대응을 집중함으로써 효율적인 산사태 피해 저감을 달성하고자 하는 의지를 엿볼 수 있다.

건축물 산사태 피해 대응이야말로 가장 효율적인 산사태 대응 방안이 될 수 있다. 건축물에 산사태가 영향을 미치면 대규모 인명·재산 피해가 발생할 수 있기 때문이다. 건축물이 밀집한 지역에서 발생한 산사태 피해 사례로 우면산 산사태를 꼽을 수 있다. 2011년 7월 27일 우면산을 중심으로 여러 방향에서 산사태가 발생하였다. 북서쪽 사면인 남부순환로에 인접한 삼성래미안아파트의 1~3층, 신동아아파트의 1층이 산사태로 발생한 토사에 파괴되어 주민이 사망하는 피해가 발생하였다. 남동쪽 사면에 있는 형촌마을과 서쪽 사면에 있는 남태령 전원마을의 주택가에서도 산사태와 저수지 범람으로 인해 주택이 파괴되고, 주민이 사망하거나 실종되는 피해가 발생하였다. 당시 우면산 산사태로 인해 서초구에서 16명이 사망하고 2명이 실종되었으며, 168억 원의 피해 금액이 발생하였다. 그 외에 시민 400여 명이 대피하고, 인근의 아파트 2,000여 가구가 정전의 불편을 겪는가 하면 2만 5,000여 가구가 단수를 경험하는 등 직간접적인 피해가 발생하였다(한국지반공학회, 2011, pp.1~10).

한편 우면산 산사태가 일어난 같은 날에 춘천시 신북읍 천전리에서 발생한 산사태도 건축물에 직접 피해를 줌으로써 많은 사상자가 발생하였다. 이 산사태로 펜션의 투숙객과 주택의 주민이 피해를 입었다. 해당 펜션에는 인하대학교 학생 45명이 발명 캠프 일정을 마친 뒤 자고 있었으며, 이 중 10명이 사망하였다. 그 외 옆 건물에 투숙하던 관광객 2명, 건너편 건물의 주민 1명이 사망하였다. 춘천에서 발생한 산사태는 우면산 산사태보다 작은 규모였지만, 펜션처럼 많은 사람이 투숙하는 형태의 숙박 시설

에 피해가 집중되면서 많은 인명 피해가 발생하였다. 우면산과 춘천의 산사태는 건축물과 인구가 밀집된 지역에서 산사태가 발생할 경우 인명과 재산 피해가 극대화될 수 있음을 보여 준다.

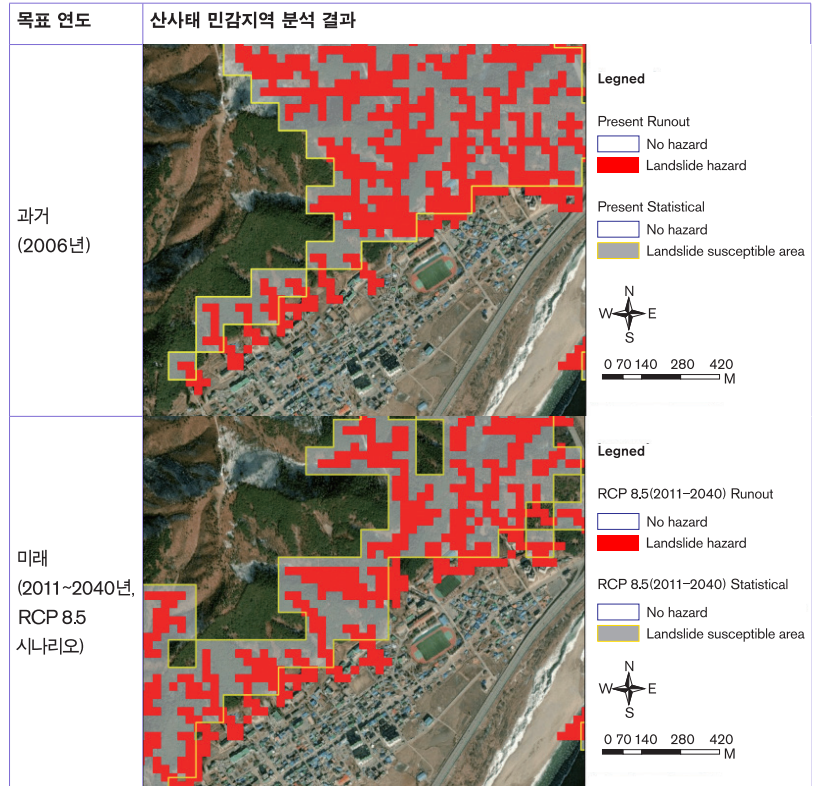
산사태 민감지역 분석을 통한 사전 예방 대책 수립 지원

공간 단위에서 산사태 피해 가능성을 분석하고, 이를 건축물의 공간 정보와 비교할 수 있다면 건축물의 산사태 피해 사전 예방 대책을 수립하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다. 이에 활용 가능성이 높은 방법론이 산사태 민감지역 분석이며, 민감지역과 건축물 입지 정보를 연계하면 공간 단위에서 효과적인 사전 예방 대책 수립이 가능하다. 공간 단위에서 수행되는 산사태 분석에는 노출, 취약성, 민감성, 위험성과 같은 다양한 개념*들이 있다(Corominas et al., 2014). 이 중에서 산사태 민감성 분석은 산사태 발생 이력을 바탕으로 과거의 산사태 민감지역을 분석하고, 이를 근거로 미래 시점의 산사태 발생 가능성을 예측한다는 점에서 중요한 수단으로 활용된다. 머신러닝과 딥러닝을 기반으로 발전하고 있는 데이터 기반의 산사태 민감지역 분석 시 전국을 대상으로 1킬로미터 수준, 광역지자체 단위에서는 30~100미터 수준의 다양한 해상도에서 분석이 가능하다. 특히 전국 단위의 분석에서는 기상청에서 제공하는 한반도 고해상도 기후변화 시나리오(1킬로미터 해상도)의 적용이 가능하므로, 더 정확한 미래 예측에도 활용될 수 있다.

다음의 지도는 산사태 민감지역 분석의 사례로서, 머신러닝 모형과 물리 기반의 모형을 연계하여 과거와 미래의 산사태 민감지역을 분석한 것이다(Kim et al., 2021). 머신러닝 모형으로 추정된 민감지역은 지도에서 노란색 테두리와 회색 음영으로 표시된 지역이다. 머신러닝 모형의 결과를 이용하여 물리 기반 모형으로 더욱 세부적인 민감지역을 추정하였으며, 지도에서 빨간색으로 표시된 지역이 민감지역이다. 2006년에 발생한 산사태 발생 이력을 바탕으로 산사태 민감성 모형을 구축하고, RCP 8.5

* '노출'은 산사태로부터 영향을 받을 수 있는 지역의 사람, 건축물, 재산, 시스템 또는 기타 요소의 존재를 의미한다. '취약성'은 특정 크기나 강도의 산사태 발생에 노출된 대상의 손실 정도를 의미한다. '민감성'은 과거 산사태 지점 정보를 바탕으로 미래 산사태의 발생 가능성을 정량 혹은 정성적으로 예측하는 것을 의미한다. '민감성'은 과거 산사태 지점 정보를 바탕으로 미래 산사태의 발생 가능성을 정량 혹은 정성적으로 예측하는 것을 의미한다. '위험성'은 산사태 위협의 정도 혹은 수준을 의미하며, 산사태 사건의 확률에 결과(인명·재산 피해)를 곱한 것으로 정의된다.

산사태 민감지역 분석 사례



출처: Kim et al. (2021)

기후변화 시나리오에 따른 중기 미래의 강수량값을 적용하여 미래의 산사태 민감지역을 추정하였다. 산림과 인접한 건축물들이 산사태 민감지역에 일부 포함되는 것을 확인할 수 있으며, 미래에는 민감지역에 속하는 건축물의 수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 산사태 민감지역 분석을 활용하면 산사태가 영향을 끼칠 가능성이 높은 건축물들을 파악하는 데 도움을 받을 수 있다.

건축물에 초점을 둔 산사태 피해 대응 방향

산사태는 발생 후에 대응할 수 없는 재해로서 건축물에 대한 산사태 피해를 줄이기 위해서는 사전 예방이 필요하다. 예방 대책 수립이 적용되는 건

축물은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 기존에 지어진 건축물과 미래에 지어질 건축물이다. 이미 조성된 건축물에 대한 예방 대책 수립을 위해서는 산사태에 민감하다고 판단되는 건축물을 파악하는 것이 중요하다. 미래에 조성될 건축물에 대해서는 산사태 민감지역에 포함되는 건축물의 경우 계획·설계·시공·관리의 전 단계에서 건축물 단위의 산사태 예방 대책을 의무화하는 법률 제정이 필요하다. 지금부터는 두 가지 유형의 건축물(기존 건축물, 미래 조성 건축물)에 대한 예방 대책 수립 방안을 거칠게나마 제안해 보고자 한다.

기존 건축물에 대해 가장 완벽하게 산사태를 예방할 수 있는 방법은 산림에 인접하거나 비탈면에 인접한 모든 건축물에 산사태 피해 예방 대책 사업을 수행하는 것이다. 하지만 제한된 예산과 시간을 고려할 때, 우선순위를 정하여 효율적으로 예방 대책을 적용할 수 있는 체계가 필요하다. 국토 및 지역 단위에서 구축 가능한 산사태 민감지역 지도는 산사태 피해 가능성이 높은 건축물을 파악하고, 우선순위를 정하는 데 도움이 될 수 있다. 국토 단위에서 구축된 산사태 민감 지도는 광역지자체별 도시·산업·입지의 특성에 따라서 서로 다른 산사태 민감지역 양상을 파악하고, 거시적인 수준에서 지자체 간 건축물 산사태 민감성을 비교하는 데도 도움이 된다. 1킬로미터 수준의 해상도에서 과거는 물론 미래의 산사태 민감지역 추정도 가능하므로, 토지피복도 분류 정보와의 비교를 통해 광역지자체별 시가화 지역 내 산사태 민감지역의 절대적 면적과 상대적 비율 등을 분석할 수 있다. 따라서 정부에서 과거와 미래의 산사태 민감성이 높은 광역지자체에 예산을 높게 배분하는 등 의사결정이 필요한 경우에 국토 단위의 산사태 민감지역을 활용할 수 있다.

지역 단위에서는 국토 단위보다 높은 해상도인 30~100미터 수준 혹은 그 이상의 해상도에서 과거 발생한 정보를 기반으로 한 산사태 민감지역 분석이 가능하다. 높은 해상도를 갖는 산사태 민감지역과 1:5,000 수준의 수치지형도 간 비교를 통해 산사태 민감지역에 속하는 세부적인 건축물의 위치를 파악할 수 있다. 미래 기후변화 시나리오는 1킬로미터 수준의 해상도가 한계이므로, 지역 단위에서 미래의 산사태 민감지역을 추정하는 것에는 한계가 존재한다. 다운스케일링 기술을 활용하여 더 높은 해상도의 기후변화 시나리오를 적용할 수 있으나, 불확실성이 더욱 커지는

문제를 수반한다. 따라서 과거 발생 이력을 기반으로 정밀하게 제작된 산사태 민감지역 정보를 바탕으로 우선순위가 높은 건축물을 탐색하고, 예방 대책을 적용하는 것이 더욱 효과적일 수 있다.

기존 건축물의 산사태 피해 방지 대책으로는 사방댐 조성, 배수로 조성, 산림 수목 관리, 비탈면 복원 등 다양한 사업이 존재한다(Kim et al., 2018). 산사태 피해 가능성의 높고 낮음에 따라서 다른 수준의 대책 사업 적용이 가능하다. 건축물이 산사태 민감지역에 속하거나, 비탈면과 매우 인접하여 산사태 대응 시급성이 높다고 판단되는 경우에는 완공이 빠르고 방지 효과가 큰 사방댐 및 배수로 조성과 같은 토목공학 기반의 사업이 적합하다. 이와 달리 건축물이 산사태 민감지역과 다소 거리가 있거나, 직접적인 산사태 피해 가능성이 낮다고 판단되는 경우에는 완공에 시간이 소요되는 비탈면 복원, 산림 수목 관리와 같은 자연 기반 해법을 적용하는 것도 고려할 수 있다. 자연 기반 해법을 적용하는 사업은 장기적으로 산사태 피해 예방 효과뿐만 아니라 탄소흡수량 확보를 통해 기후변화 완화에도 도움을 줄 수 있으며, 다양한 생태계 서비스를 제공할 수 있기 때문이다. 이처럼 건축물의 산사태 피해 가능성 및 입지 특성에 따라서 천편일률적인 산사태 피해 방지 사업이 아닌, 서로 다른 방식의 산사태 피해 방지 사업을 적용하는 것이 효율적일 수 있음을 고려해야 한다.

새롭게 조성될 건축물의 경우 해당 건축물의 입지가 산사태로부터 피해를 받을 가능성이 높다면, 건축물의 인허가 과정에서부터 산사태에 대한 안전관리 대책을 철저히 수립 및 반영하도록 법률을 제정할 필요도 있다. 산사태 피해 가능성은 건축물의 입지가 지역 단위에서 제작된 고해상도의 산사태 민감지역에 속하거나, 민감지역과 어느 정도로 인접하는지에 대한 기준*을 설정하여 판단할 수 있을 것이다. 건축물 입지가 산사태 피해 가능성이 높다고 판단될 경우 안전관리 대책을 수립하고, 해당 대책 적절성을 평가하는 추가적인 절차를 포함하고, 조성 후에도 건축물 인근의 비탈면 관리와 점검을 철저히 수행하도록 의무화하는 세부적인 조항이 포함되어야 한다. 이렇게 신규 조성 건축물 인허가 과정에서 안전관리 대

* 산사태 때문에 발생하는 토사가 해당 건축물에도 피해를 끼칠 수 있는지에 대한 거리 기준에 관한 연구가 필요하다. 우면산 산사태의 경우 산림으로부터 피해 아파트의 거리가 50m 수준이었지만, 토사 유출로 인해 훨씬 거리가 먼 건축물에도 피해를 끼쳤으므로, 많은 사례 연구와 전문가 간 논의를 통해 거리 설정이 필요하다.

책이 반영되도록 할 경우 건축업에 부담이 될 수 있으므로 인센티브 제공에 대한 논의 또한 수반될 필요가 있다. 하지만 산사태로 인한 건축물 피해를 사전에 회피할 수 있는 효과적인 대안이므로 법률 제정에 대한 논의는 꼭 필요하다. 또한 온 국민이 신뢰할 수 있는 산사태 민감지역 주제도 제작을 위한 장기간의 연구와 유관 분야 전문가들의 합의가 필요하다.

다소 거칠고 근거가 부족하지만 건축물 중심의 산사태 피해 대응 방안 수립과 관련해 정리해 보았다. 전술한 바와 같이 건축물은 산사태로 인한 인명 및 재산 피해가 극대화될 수 있는, 위험성이 높은 대상이며 이에 초점을 맞춘 산사태 피해 대응 방안이 필요하다. 하지만 산사태가 발생할 가능성이 높은 모든 건축물에 대해 예방 대책을 수립하는 것은 불가능하므로, 우선순위를 파악함으로써 효율적인 대책 사업을 수행할 필요가 있다. 여기에 활용될 수 있는 도구가 국토 및 지역 단위의 산사태 민감지역 분석이며, 국토 단위에서는 과거의 정보를 바탕으로 기후변화 시나리오를 이용하여 미래의 민감지역까지 추정할 수 있는 강점이 있다. 민감성 분석 외에 다양한 도구를 활용하여 기존 및 신규 조성 건축물에 대한 산사태 피해 대응 방안을 수립할 필요가 있으며, 신규 건축물에 대해서는 인허가 관련 법률의 개선을 통해 산사태 안전관리 대책을 강화함으로써 더욱 피해를 저감할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1 김용민. (2023). 정회용 “산사태 취약 지역 전국 2만8천 곳, 매년 늘어”. 연합뉴스, 6월 26일 기사.
- 2 중앙안전재난대책본부. (2023). 피해복구계획서. e-나라지표. https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtrlPageDetail.do?idx_cd=1311
- 3 한국지반공학회. (2011). 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종보고서 요약본. 서울도서관. https://lib.seoul.go.kr/search/detail/CATCRZ000000058627?mainLink=/searchS/eaz&briefLink=/searchS/eaz/result?sNo=0_A_mainLink=%2FsearchS%2Feaz_A_sq=45_A_st=SUBJ_A_bk_2=seouls#
- 4 Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., ... & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263.
- 5 Kim, H. G., Lee, D. K., & Park, C. (2018). Assessing the cost of damage and effect of adaptation to landslides considering climate change. *Sustainability*, 10(5), 1628.
- 6 Kim, H. G., Park, C., & Cho, M. (2021). Finding unrevealed landslide hazard area induced by climate change and topography-Case study for Inje-gun, Gangwon-do, ROK. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103180.