

붕괴사례 분석을 통한 토사재해 발생요인 및 건물 피해 특성 연구

석재욱¹, 정향선^{2*}, 송효성², 최선규², 정민수²

¹국립재난안전연구원 재난원인조사실

²국립재난안전연구원 방재기준평가센터

A Study on The Factors causing Sediment Disaster and the Characteristics of Building Damage through the Analysis of Collapse Cases

Jae-Wook Suk¹, Hyang-Seon Jeong^{2*}, Hyo-Sung Song², Sun-Gyu Choi², Min-su Jung²

¹Disaster Scientific Investigation Division, National Disaster Management Research Institute

²Disaster Prevention Assessment Center, National Disaster Management Research Institute

요약 본 연구에서는 국내에서 발생빈도가 가장 높은 토석류와 비탈면 붕괴를 토사재해로 정의하고 피해 특성을 파악하고자 하였다. 문헌자료 수집과 현장조사를 통해 2007년부터 2021년까지 발생한 토사재해 발생사례에 대한 피해현황, 강우정보, 지질-지형 특성 및 건물피해 정도 등을 DB화하고 이를 바탕으로 토사재해 발생요인과 인명 피해와 연관성이 높은 건물피해 특성을 분석하였다. 토사재해를 유발하는 요인에 대해 검토한 결과 국내에서 발생하는 토사재해는 모암의 암종과 상관없이 고르게 발생하며 집중호우가 주요한 유발요인으로 작용하며 붕괴 전 붕괴 2~3일간의 강우량이 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 토석류 피해지역의 경우 평균 200 m 이내의 이격거리를 가진 건물에서 인명피해가 집중되는 반면 비탈면 붕괴의 경우 대부분 10 m 이내의 건물에서 피해가 집중되었다. 토사재해로 인해 인명피해가 발생한 피해 건물의 66 %는 주거용 건물이며, 건물재료로 구분하면 무보강 조적조, 경량철구조, 경량목구조, 철근콘크리트 순으로 파손 정도가 높게 나타났다. 위의 결과는 향후 토사재해로 인한 건물의 피해를 예방하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract This study aimed to identify the characteristics of building damage caused by sediment disasters in Korea. So, cases of sediment disasters in Korea that occurred from 2007 to 2021 were converted into a database. Subsequently, the characteristics of building damage caused by sediment disaster, related highly to the causes and human casualties of the disaster, were analyzed. The analysis showed that sediment disasters in Korea occurred evenly regardless of the rock type of the bedrock, and torrential rains for 2 to 3 days before the disaster were the main causes of the disaster. In addition, human casualties in the debris-flow damaged areas of sediment disasters were concentrated in buildings with an average separation distance of 200 m or less in these areas. On the other hand, most damages in the slope-failure areas of sediment disasters were concentrated in buildings with an average separation distance of less than 10m in these areas. Further, 66 % of the buildings damaged by sediment disasters were residential buildings. And the degree of damage in the building materials ascended among non-reinforced masonry, lightweight steel structure, light wood structure, and reinforced concrete in the same order. In essence, the above results are expected to be used as basic data for research to prevent building damage caused by sediment disasters in the future.

Keywords : Sediment Disaster, Debris Flow, Slope Failure, Human Casualty, Building Damage

본 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("실증실험을 통한 토사재해 취약성 평가(I)", NDMI-주요-2022-07-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hyang-Seon Jeong(NDMI)

email: jhs99@korea.kr

Received March 28, 2022

Revised April 27, 2022

Accepted May 6, 2022

Published May 31, 2022

1. 서론

산지가 많은 우리나라는 산사태 및 토석류 등의 토사 재해 위협에 항상 노출되어 있는데 특히 6~9월에 발생하는 집중강우에 의해 많은 피해가 발생하고 있다. 지속적인 도시화 및 산업화로 주거지 및 산업단지가 급경사지에 인접해 있어 산지에서 발생한 토사가 건축물을 덮쳐 많은 인명피해가 발생하는 특징을 가진다.

산사태와 토석류 등의 토사재해는 주로 집중 강우가 발생요인으로 알려져 있으나 발생지역의 지질, 지형, 토층 속성 등의 요인 또한 중요한 요소가 될 수 있다.

국립재난안전연구원은 최근 20년동안 국내에서 발생한 토사재해 발생 자료를 수집하였는데 이 중 최근 9년간('11년~'19년) 인명피해 발생 사례 18건(사망 54명)에 대해 분석한 결과, 집중호우시 발생한 토사재해로 인한 주택 파손 피해가 15건(사망 50명)으로 83%의 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다[1]. 토사재해로 인한 건물의 피해 정도는 붕괴된 토사의 속도, 퇴적높이, 충격량 등의 위험 요인과 이로 인해 피해를 받는 재산, 건물 등과 같은 위험 요소의 손상정도를 나타내는 물리적 취약성으로 정량화할 수 있다. 국외에서는 실질적 인명피해를 경감하기 위해 토사재해로 인한 건축물의 취약성(vulnerability)에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2]. Fell et. al.(2005)은 토사재해로 인한 건물의 물리적 취약성을 건축물과 같은 위험요소의 손실 또는 손상 정도로 정의하였고 0(손상없음)~1(완전 손상)사이의 정량화된 값으로 표현하였다[3].

Silva and Pereira(2014)는 건물의 준공년도, 건물재료, 건물 용도, 층수, 산지 경사면을 바라보는 창문의 유무, 거주밀도 등의 건물 속성을 활용하여 건물의 취약성을 평가한 바 있다[4].

이 외에도 선행연구에서 다양한 물리적 취약성 평가방법이 제안되었지만 각 나라의 토사재해 현장별 환경특성이 많은 차이를 보여 연구사례를 직접 활용하는 데 한계가 있다.

따라서 국내환경에 맞는 물리적 취약성을 평가하기 위해서는 국내에서 발생한 토사재해 사례에 대한 지형, 지질, 건축물 특징, 토사재해 유형 등의 상세한 피해 정보를 수집·분석하여 국내의 피해환경을 진단할 수 있는 기초연구가 선행되어야 할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 우리나라에서 발생한 토사재해의 발생 추이 및 피해현황을 DB화하였으며 이를 바탕으로 토사재해 발생요인 및 인명 피해와 연관성이 높은 건물의 피해 특성을 분석하였다.

2. Database 구축

비탈면 붕괴는 암석이나 토사가 비탈면을 따라 이동하는 현상을 말하는데 토사지반활동, 암반지반활동, 낙석 등을 포함하는 것이 일반적인 개념이다. 그리고 토석류는 산지 계곡부 내 표층에 쌓인 토석, 잡물 등이 물과 함께 퇴적부로 흘러내려 하루에 피해를 발생시키는 현상을 말한다. 한편 본 연구에서는 국내에서 가장 빈번하게 발생하는 두 가지 붕괴 유형, 즉, 기반암 상부 얇은 표토층의 붕괴를 의미하는 비탈면 붕괴와 집중호우로 인해 발생하는 토석류를 토사재해로 한정하였다.

토사재해 피해사례 분석을 위해 2007년~2021년까지 장마, 집중호우 및 태풍 등에 의하여 발생한 토사재해 70건의 피해사례 정보를 수집하여 DB화하였다. Table 1은 토사재해 발생 일시, 붕괴유형, 피해 및 복구 현황 등 토사재해와 관련된 일반적인 정보수집 항목과 수집출처를 나타낸다. 토사재해 발생 현황은 기존 연구자료 및 언론자료를 우선 검토하였다. 과거 자료는 대부분 토사재해 규모, 유형, 강우량 등 지반정보가 주를 이루고 있어 주택 피해정도, 주택 유형 등의 정보는 누락된 경우가 많아 주택의 손상정도 및 피해규모가 명확하지 않은 경우에는 현장조사를 통해 정보를 추가 확보하였다.

Table 1. Information on sediment disasters

Category	Information	References
General	Date of occurrence, Location, Casualties	Literature, Field investigation
Damage	Collapse types, Casualties, Housing damage, Recovery status	Literature, Field investigation

Table 2는 토사재해 발생지역의 지질·지형적인 특성을 확인하기 위해 수집한 정보내용을 나타낸다. 토층정보는 농촌진흥청의 토양환경정보시스템을 통해 확보하였고 피해지역에 대한 지형정보는 산림청의 산사태정보시스템의 위성자료를 활용하여 수집하였다. 피해면적, 퇴적 규모 등의 상세한 정보는 현장 조사를 통해 추가 확인하였다. 또한 기상청 자료를 활용해 토사재해가 발생한 시점의 강우정보를 수집하였다. 이 자료는 토사재해를 유발한 요인을 분석하기 위해 활용되었다.

Table 2. Information on geology and topography

Category	Information	References
Scale	Width, Depth, Length, Separation Distance, Damaged area, Slope scale, Sediment area, Valley, Distance of debris flow	Field investigation Satellite image
Geology	Soil depth	Soil environment information system (http://soil.rda.go.kr)
Topography	Slope angle, Sediment slope, Slope length, slope curvature, bedrock type	Landslide information system (http://sansatai.for.est.go.kr)
Rainfall	Accumulated rainfall for 1day, 2days, 3days, 5days and 15days	Korea Meteorological Administration

Table 3. Information on Damaged buildings

Category	Information	References
Type of use	Residential, Commerce, Public, The others	Building life cycle management system (http://blcm.go.kr)
Material of building	Reinforced concrete, Steel moment, Reinforcement masonry, Unreinforcement masonry, Lightweight steel structure, Light wood structure, The others	

Table 3은 국토교통부의 건축물생애이력관리시스템을 활용해서 수집한 토사재해 발생지역에 위치한 건축물 정보를 나타낸다. 이 정보는 건축물 재료별 손상정도, 인명피해 특성 등을 파악하기 위한 자료로 활용하였다.

3. 토사재해 유발요인 특성 분석

3.1 토사재해 발생현황

Table 4는 2007년부터 2021년까지 15년간 인명피해가 발생한 토사재해 발생현황 70건의 추이를 나타낸다. 비탈면 붕괴는 36건, 토석류는 34건으로 나타났으며, 건물 파손피해는 비탈면 붕괴가 41개소, 토석류는 66개소로 나타났다. 일반적으로 토석류의 경우 일반적으로 피해 규모가 비탈면 붕괴보다 큰 경우가 많아 건물파손과 인명피해 또한 많은 것으로 여겨지는데 본 연구에 의하면 인명피해/건물파손 비율이 비탈면 붕괴의 경우

0.56인 반면 토석류는 1.14로 나타나 약 2배 높은 피해 비율을 나타내었다.

Table 4. Damage status of sediment disaster from 2007 to 2021

Type	Total	Slope Collapse	Debris Flow
Occurrence	70	36	34
Building Damage	107	41	66
Casualties	Death	75	20
	Injury	23	3

3.2 토사재해 유발요인 특성

Fig. 1은 본 연구에서 구축한 DB를 바탕으로 토사재해 발생 위치를 도시한 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 토사재해가 강우량, 지질, 지형 등의 요인에 의해 발생한다는 점을 고려하여 각 요인에 대한 특성을 살펴보았다.

3.2.1 피해유발 강우 특성

Suk(2020)은 1999년부터 2018년까지 20년간 국내에서 발생한 총 247건의 산사태 자료를 수집하고 산사태 발생 시기의 강우량을 분석하여 Table 5와 같이 누적강우량(C)과 강우기간(D)으로 표현되는 붕괴유발 강우기준을 제시하였다[1]. 본 연구에서는 해당 강우기준을 이용하여 토사재해를 유발한 강우 특성을 분석하였다.



Fig. 1. Distribution of building damage cases by sediment disaster from 2007 to 2021

Table 5. Rainfall thresholds for early warning criteria

Warning level	thresholds	Equation
None	Below 5% rainfall threshold	-
Watch	Between 5% rainfall threshold & 20% rainfall threshold	$C=21.66D^{0.49}$
Warning	Between 20% rainfall threshold & 50% rainfall threshold	$C=34.75D^{0.44}$
Alarm	Above 50% rainfall threshold	$C=59.35D^{0.36}$

Fig. 2는 총 24개의 토석류 발생사례 중 강우 지속기간 48시간과 72시간에 대한 누적강우량을 붕괴유발 강우기준과 함께 도시한 것이다. 17개소(70.8%)가 '주의' 기준 이상의 누적강우로 붕괴가 발생했으며, 나머지 7개소(29.2%)는 붕괴유발 강우기준보다 낮은 누적강우로 인해 붕괴가 발생한 것으로 나타났다. 이는 3일 전의 집중강우가 토석류 발생에 영향을 미치는 것을 의미하며 붕괴 3일전부터의 강우량을 통해 약 70%의 확률로 붕괴를 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

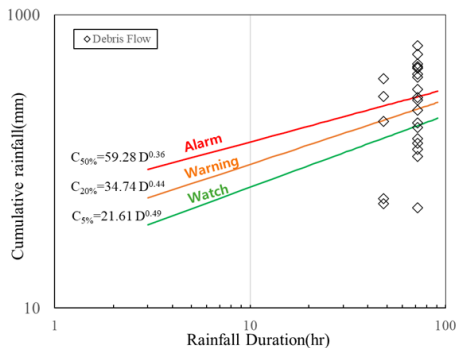


Fig. 2. Cumulative rainfall-duration for Debris Flow

Fig. 3은 비탈면 붕괴 사례 중 강우 지속기간 48시간과 72시간에 대한 누적강우량을 붕괴유발 강우기준과 함께 도시한 것이다. 총 29개소의 비탈면 붕괴 중 26개소(92.8%)가 '주의' 기준 이상의 누적강우로 붕괴가 발생했으며, 2개소 지역만이 기준 이하의 누적강우량을 나타내었다. 이는 토석류의 경우와 마찬가지로 붕괴 발생 전 집중강우가 붕괴에 직접적인 영향을 미친다는 것을 의미하며, 토석류보다 더욱 명확한 경향을 나타낸다고 할 수 있다. 비탈면 붕괴 중 '주의' 기준 이하에서 붕괴가 발생한 2개소의 평균 누적강우량은 165.7mm로 붕괴유발 강우 기준값이 175.7mm에 근접한 강우량으로 여겨진다. 한편 '주의' 기준 이하에서 발생한 토석류 7개소의 2일 및 3일 전 평균 누적강우량은 약 94mm 및 99.8mm

수준이나 15일 전 평균 누적강우량은 약 315.7mm, 30일 기간의 누적강우량은 약 424.8mm으로 많은 강우량을 기록한 것으로 나타났다. 이는 집중강우가 낮은 경우라도 선행강우량이 많을 경우에는 토석류가 발생할 수 있음을 나타낸다[5].

많은 연구자들에 의해 강우특성과 토사재해 발생과의 상관성에 관한 연구가 수행되어왔다[6-8]. 강우침투에 의한 표층붕괴 형태의 비탈면 붕괴는 집중호우에 영향을 받는 반면[9], 장마기간처럼 누적강우량이 많은 시기에는 붕괴 규모가 큰 심부 파괴가 주로 발생하는 것으로 알려져 있다[10]. 주로 강우강도와 누적강우로 표현되는 산사태 등의 토사붕괴 유발 강우는 연구자들마다 다른 의견을 제시하는 경향이 있어 아직 명확하게 붕괴 유발에 대한 강우 영향을 규정하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서 강우특성을 분석한 결과를 보면, 토석류와 비탈면 붕괴는 2~3일 간의 집중강우가 많은 영향을 미치는 것으로 보이며, 토석류의 경우에는 선행강우에 의한 영향도 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

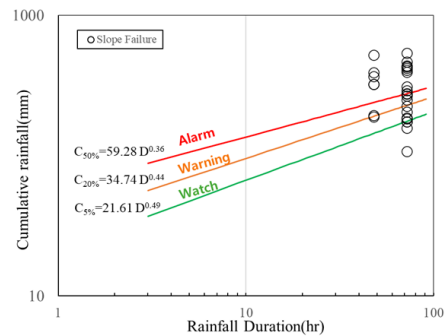


Fig. 3. Cumulative rainfall-duration for slope failure

3.2.2 지질 특성

토사재해 발생지역의 지질 특성을 파악하기 위해 암종별 특성을 분석하였다. 암종에 따른 토사재해 유형별 발생빈도는 Fig. 4와 같다. 퇴적암 지역에서는 비탈면 붕괴와 토석류가 각각 17%, 19%로 비슷한 비율을 보인 반면 화성암 지역에서는 토석류가 46%, 비탈면 붕괴가 32%로 나타나 토석류 붕괴가 더 많은 경향을 보였다. 변성암의 경우에는 토석류 37%, 비탈면 붕괴 49%로 비탈면 붕괴가 더욱 많이 발생하는 것으로 나타났다. 우리나라 산사태 지역 중 화강암 지역은 노두가 거의 없고 풍화심도가 고르게 분포해서 형태상 소규모 슬라이드가 우세한 반면 변성암 지역은 풍화심도가 불규칙하여 지형의 기복이 심하고 풍화노두가 토층과 함께 파괴, 유동하는 비교

적 큰 규모의 토석류가 우세한 것으로 알려져 있다[11]. 이는 산지 내 자연사면에서 주로 나타나는 경향으로 본 연구에서의 비탈면 붕괴는 인공비탈면, 자연비탈면을 모두 포함하기 때문에 산지내 산사태의 경향과 다소 차이가 있는 것으로 여겨진다. 한편 우리나라 암석의 성인에 따라 퇴적암, 화성암, 변성암의 분포면적이 각각 약 19%, 35%, 46%인 점을 고려하면[12] 암종에 따른 토사재해 발생빈도는 뚜렷한 경향을 나타내지 않는 것으로 판단된다. 다른 관점에서 보면 우리나라에서 인명피해를 유발한 토사재해는 모암 특성과 관계없이 고르게 나타난다고 할 수 있다.

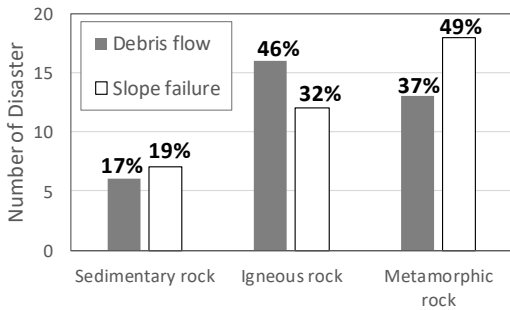


Fig. 4. Number of sediment disaster by Rock type

3.2.3 지형 특성

토석류와 비탈면 붕괴가 발생한 지역의 지형 특성을 파악하기 위해 붕괴 발생 위치의 경사각을 분석하였다. 비탈면의 경사는 비탈면 붕괴의 가장 중요한 요소 중 하나이나, 자연비탈면에서는 경사가 급한 지형에서 반드시 산사태가 발생하지는 않는다[11]. 토석류는 표층붕괴 등이 발생하는 시점부의 경사각 평균이 27.3°이며 붕괴가 발생한 비탈면의 평균 경사각은 37.4°로 나타났다. 한편 토석류로 인한 토사 퇴적으로 주택·인명 피해가 발생한 퇴적부의 평균 경사는 약 10.1°이며 비탈면 붕괴로 인한 퇴적부의 경사각은 10.5°로 토석류 사례와 유사한 것으로 나타났다(Table 6).

Table 6. Failure and sediment angle by slope disaster

Type	Failure slope angle(°)		Sediment angle(°)	
	Debris flow	Slope Failure	Debris flow	Slope Failure
Average	27.3	37.4	10.1	10.5
Standard Deviation	4.1	15.1	4.3	10.8

위와 같이 토사재해 유발인자 특성을 살펴본 결과 붕괴지역의 암종과 지형 조건은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 반면, 붕괴 발생 전 3일간의 강우량은 붕괴 유발에 가장 연관성이 큰 인자인 것으로 여겨진다.

4. 토사재해 피해 특성

4.1 붕괴 규모

토석류와 비탈면 붕괴는 발생 메커니즘에 따라 구분되지만, 규모에서도 많은 차이를 보이는 것이 일반적이다. 두 유형에 대한 피해 규모를 비교하기 위해 퇴적면적 특성을 파악하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 토사재해 유형별 붕괴토사의 퇴적면적 분포를 나타낸 것이다. 토석류 발생지역의 평균 퇴적범위는 12,415m²이며, 최소 약 800m²에서 최대 32,000m² 까지 편차가 매우 큰 편이다. 비탈면 붕괴의 경우 주택 인근에 퇴적된 토사 범위는 평균 351m² 정도인 것으로 나타났다. 최소범위는 약 28m²이며 최대범위는 약 831m²이다. 이 중 비교적 큰 퇴적범위를 나타내는 경우는 산지 자연비탈면에서 발생한 산사태에 의한 경우가 대부분이며, 상대적으로 작은 퇴적면적은 주택 배면의 소규모 토사비탈면 붕괴인 경우가 많았다.

붕괴에 의해 퇴적된 토사는 주택파손에 직접적인 영향을 미치게 되는데 퇴적범위가 넓은 토석류 사례는 피해가 발생할 가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 한편, 본 연구에서 수집한 피해사례 DB는 모두 인명피해가 발생한 현장만을 대상으로 구축된 점을 고려하면 상대적으로 퇴적범위가 좁은 비탈면 붕괴에서도 인명피해가 발생할 수 있음을 시사한다.

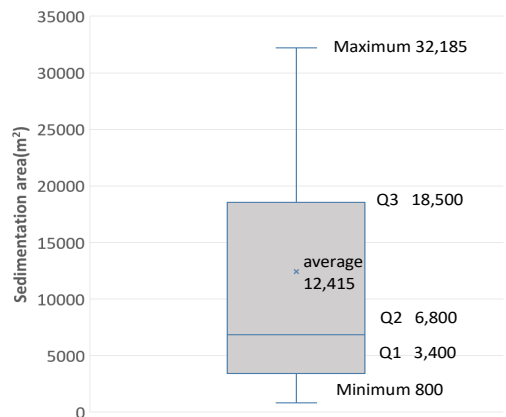


Fig. 5. Box plot of sedimentation area by debris flow

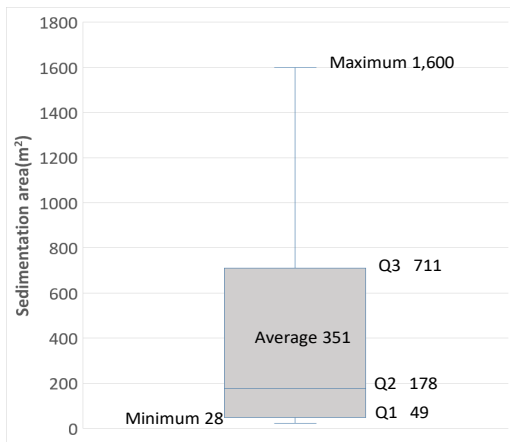


Fig. 6. Box plot of sedimentation area by slope failure

4.2 주택과의 이격거리

산지경계부 및 비탈면 끝단과 피해 건물과의 이격거리를 살펴보았다. 토석류의 경우 평균 이격거리는 103m, 최대 이격거리는 376m이며 200m 이내에 대부분의 건물이 위치한 것으로 나타났다(Fig. 7(a)). 비탈면 붕괴의 경우 평균 최대 이격거리는 178m이며 대부분 20m 이내에 건물이 위치하는 것으로 나타났다(Fig. 7(b)). 본 연구에서 비탈면 붕괴는 산지 경계부 비탈면 붕괴 뿐만 아니라 산지 내 산사태까지 포함한 것으로 이격거리 100m 이상 구간에서의 피해는 산지 내 산사태 결과가 반영된 것으로 판단된다.

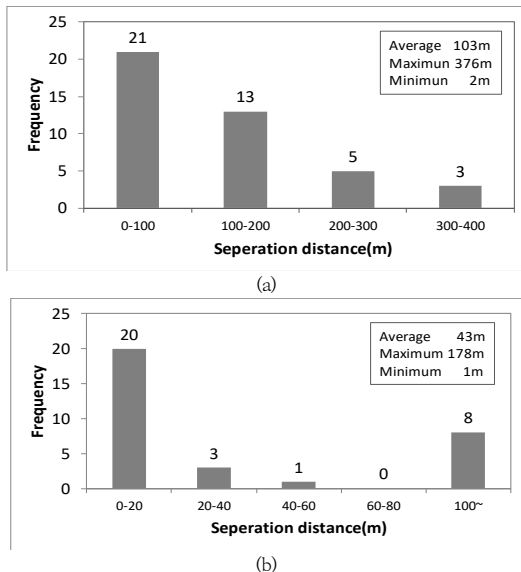


Fig. 7. Separation distance from damaged building to failure point (a) Debris Flow, (b) Slope Failure

4.3 토석류 이동거리

토석류는 산지 내 표층붕괴와 같이 토사가 붕괴되기 시작하는 발생부, 계곡이나 집수지형을 따라 토사와 지표수가 점차 증가하면서 이동하는 이동부 그리고 산지 경계부터 시작되는 퇴적부로 구분된다. 토석류는 발생지점부터 하류로 유하하는 과정에서 유로 바닥면 토사를 침식시키고 이 토사를 공급받거나 유하 도중 외부로부터 물을 공급받아 발달하게 된다[13]. 일반적으로 토석류의 규모는 퇴적 토사량의 체적으로 판단하나 본 연구에서는 토석류의 퇴적물의 체적에 대한 충분한 자료를 확보하지 못했다. 따라서 이동부의 거리를 이용하여 토석류의 규모를 추정하였다. 2017년 이전의 토석류 사례는 주로 위성사진을 이용하여 이동거리를 도출했으며, 2018년~2020년 토석류 사례는 실제 현장조사를 통해 측정한 결과를 활용하였다. Fig. 8은 토석류 이동 거리 현황을 나타낸 히스토그램이다. 토석류의 평균 이동거리는 508m이며 최소 이동거리는 104m, 최대 이동거리는 1,300m이다. 조사된 24개 사례 중 전체의 약 79%가 600m 미만의 이동거리를 보였으며 이중 이동거리 400m~600m 구간이 총 10개로 가장 많은 빈도를 나타내었다.

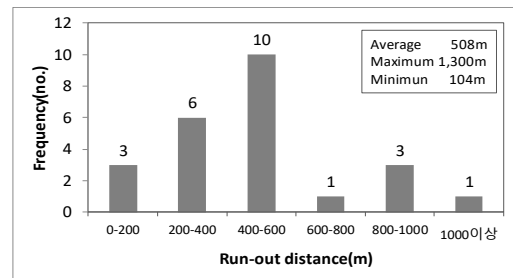


Fig. 8. Run-out distance of debris flow

4.4 이동거리와 퇴적부 면적 상관관계

토석류의 이동거리와 토사 퇴적면적이 모두 확보된 피해자료를 대상으로 이동거리별 토사 퇴적면적의 상관성을 확인하였다(Fig. 9). 이동거리 400m 이하의 구간에서는 이동거리가 증가함에 따라 퇴적면적이 증가하는 선형관계($R^2=0.89$)를 나타내었으나 이동거리 400m 이상에서는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았다. 특히 많은 인명피해로 인해 이슈가 되었던 2011년 춘천 펜션 산사태(사망 13명), 경남 밀양 산사태(사망 3, 부상 4), 2020년 전남 곡성 산사태(사망 5)가 넓은 퇴적면적을 가지는 것으로 나타났다. 퇴적 면적에 대한 자료를 확보하지 못한 분석에서 제외된 2011년 우면산 산사태 사례 또한 퇴적면

적이 매우 넓을 것으로 추정된다. 토석류의 규모를 이동 거리로 추정하는 것은 다른 변수를 고려하지 않은 단순한 방법이나 Fig. 9의 결과와 같이 비교적 이동거리가 짧은 산지 지형에서는 예상 퇴적면적을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 반대로 이동거리 400m 이상에서는 이동거리 외 이동부 토층 두께, 유로부의 경사도, 유입유량 등의 변수 영향이 매우 커 예상 퇴적면적 추정에 한계가 있는 것으로 여겨진다.

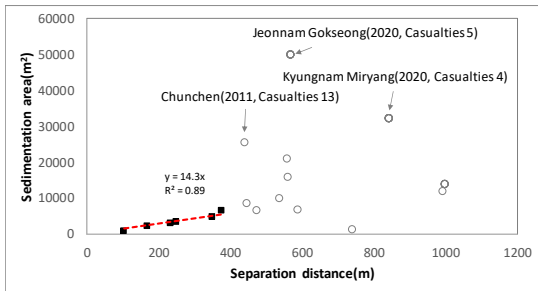


Fig. 9. Sedimentation area by separation distance for debris flow

5. 건물피해 특성

토사재해로 인명피해가 발생한 건물의 특성을 분석하였다. 피해 건물의 용도별 현황은 주거용 건물이 66%로 가장 많은 비율을 차지했으며, 기타, 상업용, 공공용 순으로 높은 비율을 보였다(Table 7). 서울시에서 전수조사를 통해 산지 경계부 50m 이내 건물의 용도를 분석한 결과와 비교하면 용도별 피해 비율이 비슷한 양상을 보이는데 전반적으로 주거용 건물의 비율이 높은 만큼 이에 대한 피해사태도 많은 것으로 여겨진다.

Table 7. Classification according to building use

Classification	Residential	Commerce	Public	Other
Building occurred casualties in Korea	66% (61)	12% (11)	1% (1)	22% (20)
Building within 50m of the mountain boundary in Seoul	73.1%	3.0%	3.8%	20.1%

피해가 발생한 건물의 재료별 분류 정보는 국토교통부 ‘건축물 생애이력관리시스템’에서 확보하였다. 본 연구에

서는 토사재해 피해지역 내 재료별 건축물 특성을 고려하여 Table 8와 같이 RC-frame 3종(철근콘크리트골조(RC), 철골모멘트골조(SM), 보강조적조(RM)), Non RC-frame 3종(무보강조적조(UM), 경량철골조(LWS), 경량목구조(LWW)), 기타 1종으로 건물재료를 분류하였다.

Table 8. Classification according to building material

Classification		Building Classification by building life history management system
RC-frame	RC	Steel structures Reinforced concrete structure
	SM	Steel moment frame
	RM	Iron pipe masonry
Non RC-frame	UM	Masonry, soft brick, cement block, brick, block, block structure, face block
	LWS	Lightweight steel structure, general steel structure
	LWW	Wood, general wood structure
Other	Other	Log wood

5.1 건축물 손상정도

Table 9는 건축물 재료별 파손규모를 나타낸 것이다. 무보강 조적조, 경량철구조, 경량목구조, 철근콘크리트 등의 건축물 피해사태가 가장 높은 빈도를 나타냈으며, 기타구조, 목구조가 일부 존재하였다. DB 구축과정에서 무보강조적조와 보강조적조의 구분이 모호한 경우는 무보강 조적조로 기록한 경우가 많아 무보강조적조 빈도가 높게 나타내는 경향이 있다. 향후 피해현장 자료 구축과정에서는 이러한 점을 개선 할 수 있도록 충분한 설명을 포함한 가이드라인이 필요할 것이다. 경량철구조, 경량목구조에서는 완파 피해 비율이 높으나 무보강조적조, 철근콘크리트 골조의 경우는 완파보다 매몰에 의한 피해가 높은 것으로 나타났다.

Table 9. Damage status according to building materials

Classification	Damaged buildings	Damage				
		Complete(C)	Extensive(E)	Moderate(M)	Slight(S)	Buried(B)
RC	10	1	1	3	-	5
SM	0	-	-	-	-	-
RM	1	-	-	1	-	-
UM	17	4	-	2	2	9
LWS	15	8	-	2	-	5
LWW	14	6	1	5	1	1
Other	2	1	1	-	-	-
Total	59	20	3	13	3	20

5.2 이격거리별 건물 손상정도

토사재해 발생으로 인한 피해건물과 산지경계부 및 비탈면 끝단과의 이격거리별 손상 정도를 분석하였다.

토석류의 경우 이격거리 200m 이내에서 가장 많은 빈도의 피해가 발생하였다(Fig. 10(a)). 인명피해와 직결된 완파의 빈도 또한 이 구간에서 가장 높아 토석류에 의한 피해에 취약한 거리임을 나타내었다. 한편 최대 376m의 이격거리에서의 완파 피해는 지형이 약 11°인 경사를 가진 지형에 위치한 축사 용도의 경량철골조인 것으로 나타났다.

비탈면 붕괴의 경우에는 이격거리 100m 이내의 건물 피해가 주를 이루고 있었으며 특히, 이격거리 10m 이내에서 높은 빈도의 건물 피해 사례가 나타났다. 비탈면 붕괴는 산지 경계부 비탈면 붕괴와 산지 내 산사태를 포함한 것으로 이격거리 50~100m 구간에서의 피해는 이러한 산사태에 의한 결과인 것으로 판단된다. 비탈면 붕괴가 발생한 평균 수직높이가 약 36m인 점을 고려하면 높이의 약 2.5배 거리까지 피해위험이 있는 것으로 여겨진다.

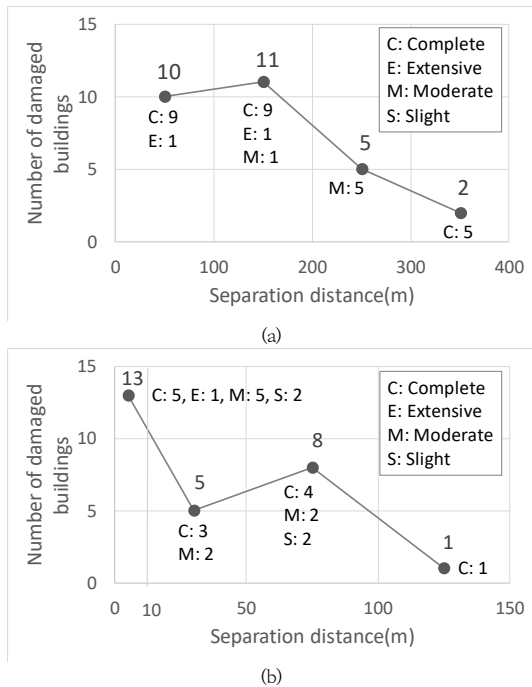


Fig. 10. Number of damaged buildings according to separation distance (a) Debris Flow, (b) Slope Failure

5.3 건축물 분류에 따른 인명피해 현황

건축물 분류에 따른 인명피해 현황을 Fig. 11에 도시하였다. 인명피해는 사망자와 부상자를 포함하여 집계하였다. 비탈면 붕괴로 인한 인명피해는 경량철골조, 경량 목구조에서 인명피해가 많았으며, 대부분 중파~완파의 손상에 의한 것으로 분석되었다. 철근콘크리트 골조에서의 인명피해는 매몰에 의한 것으로 개구부에서의 토사 집적이 주요 원인으로 추정된다.

토석류에 의한 인명피해는 무보강조적조와 경량목구조에서 53명으로 가장 높은 빈도를 나타내었으며 이때 건물의 손상정도는 완파~중파인 것으로 분석되었다. 비탈면 붕괴와 달리 철근콘크리트에서의 인명피해는 건물 완파~중파인 사례가 존재했다.

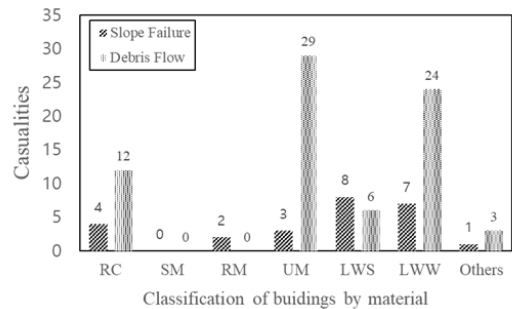


Fig. 11. Casualties by Building material classification

6. 결론

토사재해 발생사례에 대한 문헌자료 수집 및 현장조사를 통해 DB를 구축하고 토사재해 발생요인, 피해특성 및 피해건물의 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 토석류와 비탈면 붕괴의 발생건수는 큰 차이가 없으나 인명피해는 토석류에서 많이 발생하는 경향을 보였다. 이러한 토사재해를 유발하는 요인에 대해 살펴보면 모암의 암종에 따른 차이는 없으며 강우요인의 경우 토석류와 비탈면 붕괴는 2~3일간의 집중강우가 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 토석류의 경우에는 선행강우에 의한 영향도 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.
2. 토석류 발생지역의 평균 퇴적범위는 12,415m²이며, 평균 200m 이내의 이격거리를 가진 건물에서 피해가 집중되는 반면, 비탈면 붕괴의 경우 퇴적된

토사 범위는 평균 351m² 정도이며 대부분 이격거리 10m 이내의 건물에서 대부분의 피해가 집중되었다. 한편, 토석류의 경우 토사가 산지에서 퇴적부까지 이동하는 거리가 400m 이내인 경우에는 예상 퇴적면적을 추정할 수 있을 것으로 나타났다.

3. 토사재해로 인해 주거용 건물에서 피해가 발생한 비율(66%)이 가장 높으며 무보강 조적조, 경량철구조, 경량목구조, 철근콘크리트 건축물에서 피해 빈도가 높은 것으로 나타났다. 이 중 철근콘크리트의 경우 건물의 파손이 아닌 개구부로 인한 토사유입이 인명피해의 원인인 것으로 추정되었다.

이상의 결과를 통해서 국내에서 발생하는 토사재해로 인한 피해 특성을 파악할 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 향후 본 연구의 후속연구로 토사재해에 의한 건물의 취약성을 평가하는 방법 개발과 관련하여 피해지역 선정, 토사재해 유형별 예상 피해 규모 등을 결정하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Suk, J. W., Development of national-scale evaluation system for steep-slope disaster, Research report, Research Report, National Disaster Management Research Institute(NDMI), Korea, pp. 29-52, 2020.
- [2] Alexander D.E, Principles of Emergency Planning and Management. pp. 340, Oxford University Press, 2002.
- [3] Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., and Leroi, E., A Framework for Landslide Risk Assessment and Management. in: Landslide Risk Management, Taylor & Francis, London, pp. 533-541, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9781439833711-4>
- [4] Silva, M. and Pereira, S., "Assessment of physical vulnerability and potential losses of buildings due to shallow slides", *Nat. Hazards*, Vol. 72, No. 2, pp. 1029-1050, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1052-4>
- [5] Yagi, N. and Yatabe, R., "Prediction model of slope failure in sandy soil due to rainfall", *Proc. 8th Asian Regional Conf., Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 217-220, 1987.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)92360-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)92360-7)
- [6] Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H., "Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in japan", *Geomorphology*, Vol. 118, pp. 167-175, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.12.016>
- [7] Oh, J.R. and Park, H.J., "Establishment of Landslide Rainfall Threshold for Risk Assessment in Gangwon Area", *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 3, pp. 43-51, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.3.043>
- [8] Lee, J.S., Kim, Y.T., Song, Y.K. and Jang, D.H. "Landslide Triggering Rainfall Threshold Based on Landslide Type", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No. 12, pp. 5-14, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2014.30.12.5>
- [9] Cannon S.H. and Ellen, S.D., "Rainfall that conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California", *California Geology*, Vol. 38, No. 12, pp. 267-272, 1985.
- [10] Bonnard, C. and Noverraz, F., "Influence of climate change on large landslides: assessment of long-term movements and trends", *International conference on landslides - Causes, Impacts and Countermeasures*, pp. 121-138, 2001.
- [11] Kim W.Y. and Chae, B.G., "Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, no. 3, pp. 331-344, 2009.
- [12] Jung, M. S., Study on the secure plan for the stability of slope based on ground characteristics, Research report, National Disaster Management Institute, Korea, pp. 13, 2012.
- [13] Takahasi, T., Soil runoff phenomenon and sediment disaster countermeasures, *CIR*, pp. 191, 2011

석재욱(Jae-Wook Suk)

[정회원]



- 2008년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 탐사공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 (공학박사)
- 2013년 4월 ~ 2015년 10월 : 한국시설안전공단 선임연구원
- 2015년 11월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>

지반공학, 지질공학

정 향 선(Hyang-Seon Jeong)

[정회원]



- 2016년 2월 : 부산대학교 토목공학과(공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 선임연구원

〈관심분야〉
지반공학

정 민 수(Min-Su Jung)

[정회원]



- 2008년 3월 : Kobe대학 자연과학연구과 (공학박사)
- 2008년 4월 ~ 2011년 1월 : Kobe대학 시민공학과 학술추진연구원
- 2011년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국건설기술연구원 박사후 연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구관

〈관심분야〉
지반공학

송 효 성(Hyo-Sung Song)

[정회원]



- 2017년 8월 : 군산대학교 해양과학대학 해양건설공학과(공학석사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 연구원

〈관심분야〉
지반공학, 지질공학

최 선 규(Sun-Gyu Choi)

[정회원]



- 2008년 6월 : 경북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 경북대학교 건설환경에너지공학부 (공학박사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 선임연구원

〈관심분야〉
지반공학