

# 공간정보를 활용한 복합재난의 정량적인 피해추정 방안

나유경\*·최진무\*\*

## Quantitative Damage Estimation of Complex Disaster Using Spatial Information

Yugyung Na\* · Jinmu Choi\*\*

**요약** : 홍수로 인한 산사태 등 복합재난으로 인해 피해가 발생하고 있다. 이러한 복합재난에 한정된 자원을 가지고 대비·대응·복구하기 위해서 피해 규모 추정은 반드시 필요하다. 하지만 국내에서는 복합재난 피해추정을 위하여 사용할 수 있는 분석 방법이 마련되지 않았고, 복합재난 피해함수가 작성되지 않았다. 본 연구는 복합재난 피해율을 작성하고 이를 이용하여 복합재난의 피해액을 추정하는 방법을 제안하였다. 울산을 사례지역으로 분석한 결과, 복합재난 총 피해액을 추정한 결과가 단일재난 피해액의 합산보다 낮게 추정됨을 확인하였다. 이는 두 가지 재난으로 인하여 중복되는 피해액을 고려한 결과이다. 본 연구에서 제안한 복합재난 피해추정 방법은 복합재난 예방을 위한 예산 분배 등의 정책적 의사결정의 기초자료로서 사용할 수 있을 것이다.

**주요어** : 복합재난, 피해추정, 홍수, 산사태

**Abstract** : The damage is being occurred by complex disasters such as landslides caused by floods. Damage estimation of complex disaster is essential to effectively use limited resources in order to prevent, prepare for and respond to and recover from disasters. However, domestically no analysis method has been prepared to estimate damage from the complex disaster, and no damage function for the complex disaster has been prepared. This study proposes a method to estimate the damage of a complex disaster by preparing the damage rate of complex disaster and using it to estimate the damage of complex disaster. As a result of analyzing the Ulsan area, it was confirmed that the result of estimating the total damage from complex disaster is lower than the sum of the total damage from individual disaster. This is the result of considering the overlapping damage caused by two disasters. The method proposed in this study for damage estimation method for complex disaster may be used as basic data for policy decision-making such as budget distribution for the prevention of complex disaster.

**Key Words** : Complex disaster, Damage estimation, Flood, Landslide

### 1. 서론

과거에는 하나의 재난이 개별적으로 발생하여 피해 예측이나 예방이 체계적으로 이루어졌다. 그러나 최근에는 기후 및 사회 환경 변화로 인하여 재난의 복합화, 대형화, 신종화, 세계화 양상을 보이고 있다(나유경 등, 2019; 국립

재난안전연구원, 2017; 이자원, 2010). 복합재난이란 자연 재난, 사회재난, 기술재난 등 두 가지 이상의 재난이 연쇄적 혹은 동시다발적으로 연계되어 발생하는 것을 말한다(정창삼, 2017; 이재은·이우권, 2014). 복합재난은 재난 상황을 전체적으로 파악해야 하며, 하나의 재난이 발생하였을 때 연계되어 발생 가능한 재난에 대응할 수 있어야 한다(이병훈 등, 2018). 한정된 자원을 복합재난의 예방·대비·

본 연구는 행정안전부 재난안전 산업육성지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20009742). 본 연구는 나유경의 경희대학교 박사학위논문요약을 요약한 것임

\* 경희대학교 대학원 지리학과 박사(Ph.D, Department of Geography, Kyung Hee University, ygna@khu.ac.kr)

\*\* 경희대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Kyung Hee University, cjm89@khu.ac.kr)

대응에 효과적으로 사용하려면 재난의 발생 가능성과 개연성, 예상되는 피해 등에 대한 과학적인 근거가 필요하다. 이러한 근거로써 복합재난에 따른 피해를 정량적으로 추정하면 정비 대상의 우선순위 선정, 지자체 예산 할당, 효과적인 대응방안 마련 등 재난상황에서의 의사결정을 위한 기초자료가 된다.

재난 피해를 정량적으로 추정하는 것에는 한계가 있는데, 분석에 사용할 과거 자료가 불충분하고, 복합재난의 피해액 변동이 매우 크기 때문에 검증이 어렵다는 것이다. 그럼에도 불구하고 재난 피해액 추정은 반드시 필요한 부분이므로 각 재난에 대한 피해추정 방법을 향상시키기 위한 연구들이 진행된 바 있다. 특히 홍수 피해에 대한 추정 방법은 간편법에서 개선법, 개선법에서 다차원법으로 수정되면서 사용하는 데이터가 세분화되고 추정 방식이 정교해졌다(정우영·김성준, 2012; 김병일·김두연, 2015; 이근상, 2015; 최천규, 2017; 추태호 등, 2017, 강동호 등, 2018).

복합재난 피해추정 연구는 특정 복합재난 시나리오를 설정하고 이에 대한 피해액을 추정하는 방법이 연구되었다. 미국의 HAZUS-MH는 다음과 같은 복합재난 피해를 추정할 수 있다(FEMA, 2018). 허리케인과 홍수와 복합적으로 발생하는 쓰나미 피해액을 추정할 수 있다. 지진 발생 후 건물 및 나무의 잔해로 인한 피해와 화재 피해를 추정할 수 있다. 홍수로 인해 생성된 건물의 잔해로 발생하는 피해액을 계산할 수 있다. HAZUS-MH는 복합재난의 단일 재난 상황에 옵션을 추가하여 복합재난 상황을 시뮬레이션하는 방식으로 복합재난 피해액을 산출한다.

유럽의 MATRIX(New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Method for Europe)는 유럽에 가장 큰 영향을 미치는 재해인 지진, 산사태, 화산, 쓰나미, 산불, 겨울 폭풍, 홍수를 포함하는 복합재난을 분석할 수 있다(Komendantova *et al.*, 2014). 복합재난을 발생 순서에 따라 파악하고, 반복적으로 모의하여 복합재난으로 인한 피해가 연평균 손실비용을 초과할 확률을 결과로 도출하게 된다. 미국의 HAZUS-MH는 분석결과가 금액으로 도출되는 반면, 유럽의 MATRIX의 분석결과는 확률만 제시한다.

우리나라에서 재난 피해를 추정하는 방법에 대한 연구는 개별 재난 중심의 연구가 대부분이며, 복합재난 관련 연구는 시나리오와 모델링 도구 개발에 관한 연구들이 다소 수행되었다. 2005년 이재은의 연구에서 재난 유형이 복합재난으로 변화하고 있음을 밝힌 것이 복합재난 개념을 이용한 첫 연구라고 볼 수 있다(이재은, 2005). 김동영·정일

원(2018)은 복합재난의 시나리오를 개발하기 위한 재난 간 연관성을 분석하였고, 김동영 등(2018)은 복합재난 시나리오를 구축하고 시나리오를 활용한 바 있다. 이병진 등(2017)은 복합재난 모델을 개념적으로 구성하고 복합재난 프로세스를 구성하여 입출력 자료를 제안하였다. 오승희 등(2018)은 시나리오를 기반으로 한 복합재난 통합모델링 시스템을 개발하였다. 하지만 아직 이러한 시나리오와 복합재난 프로세스를 기반으로 복합재난 피해를 산정하는 구체적인 방법과 도구가 제시되지 않았다. 피해액 산정에 필요한 국내 매개변수는 행정안전부(2020)에서 수행된 연구가 있지만, 단일재난으로서 홍수와 사태에 대한 매개변수만 정의되었다.

복합재난의 피해액을 산정함에 있어 복합재난의 총 피해액은 단일 재난의 피해액을 합산한 값과 다를 수 있다(Arosio *et al.*, 2018). 재난 간 상호작용으로 인하여 재난의 강도나 범위가 달라질 수 있으며, 동일한 지역에 대하여 두 가지 이상의 재난이 반복적으로 피해를 입혀 피해액이 이중으로 계산될 수 있다. 따라서 복합재난의 피해를 추정할 때 중복되는 피해를 이중으로 계산하지 않도록 유의하여야 한다.

기존 연구를 살펴본 결과, 현재 국내에는 복합재난의 정량적인 피해를 산정하기 위한 구체적인 방법과 매개변수가 정의되지 않았으며, 복합재난의 총 피해액은 단일 재난의 단순 합산으로 계산할 수 없음을 알 수 있었다. 이 연구는 복합재난의 피해추정 방법을 구체적으로 제시하기 위하여 복합재난 피해추정에 사용되는 매개변수를 정의하고, 사례 분석을 통하여 복합재난의 총 피해액을 추정해보고자 하였다. 본 연구의 복합재난 피해추정은 기존의 단일 재난 피해추정 방법 중 복합재난 피해추정에 가장 적합한 방법을 선택하고 매개변수를 수정하는 방법으로 연구를 진행하였다. 홍수와 산사태의 복합재난에 대한 피해합수는 복합재난의 피해를 추정할 때 중복되는 피해를 이중으로 계산하지 않도록 작성하였다. 복합재난의 피해추정 방법이 실제로 적용가능한지 알아보기 위하여 울산 지역을 대상으로 데이터를 구축하여 홍수와 산사태 각각의 피해 추정액과 복합재난 피해추정액을 비교하였다.

복합재난은 시나리오가 매우 다양하며 여러 재난상황으로 구성되기 때문에 시나리오마다 피해액 추정 프로세스와 입출력데이터가 상이하므로 모든 복합재난 시나리오를 다루는 데에는 한계가 있다. 우리나라는 집중호우로 인하여 발생하는 산사태로 매년 막대한 피해가 발생하므로

(류주형 등, 2002), 본 연구는 호우가 발생한 이후 산사태가 발생하는 시나리오를 대상으로 복합재난 피해액을 추정하는 방법을 제안하였다.

분석 사례지역의 공간적 범위는 울산광역시로 하였다. 울산광역시는 2018년 태풍 콩레이로 인한 침수 피해 및 산사태가 발생한 지역이다. 연구에 사용한 데이터인 도로명 주소 건물 데이터, 건축물대장 표제부, 건물신축단가 등은 2019년 자료를 사용하였다.

## 2. 단일재난 피해추정 방법

### 1) 침수 피해액 추정 방법

국외에서 홍수 피해추정 도구의 대표적인 사례로 미국의 HAZUS-MH(Hazards United States-Multi Hazard), 유럽의 CRISMA 등이 있다. 일본과 태국 등에서는 미국에서 개발한 HAZUS-MH를 국가에 적합하도록 수정하여 사용한다(FEMA, 2003; 강부식, 2012, 59). HAZUS-MH는 홍수 피해추정을 위해 외수 침수에 의한 피해액을 금액으로 환산한 결과를 도출한다. 피해추정 방법은 다음과 같다. 외수 침수 모델링으로 홍수의 범위를 예측하여 침수예상도를 작성한다. 피해지역의 자산가치와 관련된 데이터를 입력한다. 홍수 발생 지역에 가장 적합한 피해손실함수를 선택한다. 피해손실함수는 과거 홍수 피해 기록과 보험사 데이터를 기반으로 작성되었으며, 해안/하안 지역, 건물의 유형·자재·지하의 유무 등 다양한 환경을 고려하여 선택할 수 있도록 여러 가지 함수들이 제시되어 있다. 침수 건물의 자산가치를 계산하여 피해손실함수를 적용하면 각 건물의 침수 피해액을 산정할 수 있다.

HAZUS-MH를 이용한 분석에서 주목할 점은 피해 대상물에 대해 매우 상세한 데이터를 사용한다는 것이다. 예를 들어, 주거용 건물의 경우, 건물 연식, 토대, 자재, 1층의 높이 등에 대한 정보가 갖춰져야 한다. 그리고 이러한 정보를 바탕으로 피해액을 추정수 있도록 다양한 피해손실함수를 갖추고 있다는 것이다. 정교한 데이터를 갖출수록 재난 지역의 상황을 상세하게 반영한 피해추정이 가능할 것이다.

유럽의 CRISMA는 재난 취약성 및 손실을 평가하고 관리하는 모델이다. 유럽인으로 구성된 위원회의 협력 프로그램에서 2012년 3월부터 2015년 8월의 기간에 위기관리 모

델링, 개선된 조치 및 준비에 대한 시뮬레이션 기반 의사 결정 지원 시스템을 개발하였다. CRISMA 시스템은 위기를 발생시키는 외부 요인과 위기관리 팀의 다양한 활동에 따라 현실적인 위기 시나리오를 만든다. 위기상황에서 가능한 대응 조치 및 위기의 영향을 모델링, 시뮬레이션한다. 홍수 상황에서 경제적 손실, 사망 등 일반적인 손실 평가를 처리하고 정량화할 수 있다.

우리나라의 홍수 피해추정 방법은 분석단위가 세분화되고, 필요로 하는 데이터가 구체화되는 등 계속해서 정교화되고 있다(건설교통부, 1993; 김광목 등, 2001; 최승안 등, 2006; 국립방재연구원, 2012; 정우영·김성준, 2012; 이근상, 2015; 나유경·최진무, 2019; 행정안전부, 2019). 국내에서 풍수해 피해추정을 위하여 사용되는 방법론은 간편법, 개선법, 다차원홍수피해산정법(이하 다차원법)으로 발전해왔다. 간편법은 행정구역에 대해 홍수면적의 비율을 적용하여 해당 구역의 농작물 피해액을 추정한 후, 농작물 피해액에 피해계수를 곱하여 각종 피해액들을 산정하는 방법이다(건설교통부, 1993). 개선법은 재해연보상의 침수면적과 홍수 피해자료를 기반으로 회귀식을 작성하여 피해액을 추정하며, 도시규모별로 침수면적과 피해액의 관계식에 차이를 두었다(김광목 등, 2001). 이 두 가지 방법은 행정구역별 홍수면적 비율로 재산 손실을 가정하기 때문에 건물에 직접피해가 발생하지 않더라도 해당비율의 피해가 추정되는 심각한 과대추정 오류를 발생시키게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 행정구역에서 침수면적의 비율이 아니라 침수된 건물 수의 비율을 이용하여 행정구역(읍면동) 총 자산의 비율을 침수 피해액으로 추정하는 다차원법을 개발하였다(최승안 등, 2006). 이 방법은 동일 지역의 건물들은 동일한 자산가치를 갖는 것으로 판단하게 되므로 오래되고 낡은 소규모 가치가 낮은 건물들이 있는 지역에서는 과대추정이 발생하고 넓고 가치가 높은 대형 건물들이 있는 지역에서는 당연히 과소추정이 발생하게 되어 아직 피해추정에 논리적 오류를 포함하게 되는 방법이다.

객체별 홍수 피해 산정이 가능하도록 나유경·최진무(2019)는 공간정보를 기반으로 객체별 침수 피해액을 산정하는 객체기반법을 제안하였다. 다차원법과 비교하면, 침수된 개별 건물의 면적과 가치를 반영하여 피해액이 산정되므로 지역에 따른 침수 피해액의 과소추정 또는 과대추정이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 또한 개별 건물의 면적과 자재, 유형 등의 속성정보를 포함하는 공간정보를 활

용하여 개별 건물 단위의 상세한 피해추정을 할 수 있어 분석 결과의 신뢰도 및 정확도가 향상된다는 장점이 있다. 다만, 연구 당시 우리나라의 피해함수가 없어 HAZUS-MH에서 제공하는 피해함수 중 우리나라 환경에 가장 유사한 것을 선택하여 사용하였다는 한계가 있었다.

행정안전부(2020)는 객체를 기반으로 홍수 피해액을 계산하는 방법을 우리나라에 적용하기 위한 연구를 진행한 바 있다(행정안전부, 2020). 기본적인 분석방법은 객체기반법과 같지만, 우리나라의 보험사 자료를 사용하여 피해함수를 작성하였다는 점이 차별점이다. 행정안전부(2020)의 연구에서 제안한 피해함수는 건설기술연구원에서 국내 홍수 상황을 모의실험하고 이를 바탕으로 개발한 함수이므로 본 연구에서는 행정안전부(2020)가 제안한 피해함수를 사용하였다.

## 2) 산사태 피해추정 방법

산사태의 피해액 추정은 대부분 과거 산사태 피해액 조사 자료를 바탕으로 추정한다. Fleming and Taylor(1980)는 산사태 피해액 추정을 위해 조사 대상 지역의 지리적 범위를 정하고, 과거 피해에 대한 기록자료 취득 및 인터뷰를 통하여 비용 정보를 취득하였다. 직접피해액은 산사태로 파괴·손상된 구조물과 토지를 기존과 동일한 상태로 재건하는 비용을 산정하였다. 간접피해액은 건물 및 도로의 재배치 비용, 추가적인 산사태 피해 예방 비용, 관개시설 수질 개선비용, 농업 및 산업 생산 감소, 업무시간 손실 및 수입 감소로 인한 영향 등을 포함하였다. Cardinali *et al.*(2002)은 기존 산사태와 과거 산사태의 인식, 지역 지질 및 형태조사, 과거 산사태 사건에 대한 현장별 역사적 정보를 수집하여 산사태 피해를 분석하였다. 과거의 항공사진, 현장지도, 현장 검토를 통해 산사태 인벤토리 지도를 작성하여 산사태의 분포와 패턴을 확인하였다. 피해 규모를 금액으로 환산하여 제시하지는 않고, 지수를 사용하여 산사태 빈도, 산사태 강도 및 피해 가능성 등 산사태 위험 및 위험 수준을 제시하였다. Wills *et al.*(2016)의 연구에서는 캘리포니아 지역을 사례로 산사태 피해를 추정하였다. 과거 기록에 대한 자세한 데이터가 없어 이를 대체하는 데이터로 산사태의 빈도를 보여주는 작은 지역의 상세지도와 주 차원의 산사태 위험 지도를 사용하였다. 분석 결과로 강우와 산사태 피해량이 연관이 있음을 밝혔으며, 고속도로 및 기타 인프라에 대한 산사태 피해는 수십억 달러일 것으로 추정하였

다. 산사태 피해를 추정한 국외 연구를 정리하면, 산사태 피해에 대한 과거의 자료가 있어야 피해액 산정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 다만, 산사태 피해 자료가 부족한 경우 현장조사 자료와 산사태 위험 지도를 사용하여 대략적인 추정이 가능하다는 것을 확인하였다.

우리나라에서는 산사태로 인한 피해액을 추정하는 연구보다는 산사태의 발생 원인을 규명하거나 위험지역을 예측하는 연구가 주를 이루었다(김원영, 1998; 김경수 등, 2006; 김석우 등, 2012). 산사태 피해추정과 관련된 연구로 양인태 등(2014)은 산사태 위험지도를 이용하여 강원도의 산사태 피해규모를 산정하였다. 산사태 취약성지도, 발생 확률지도, 위험지도를 제작한 후 산사태 위험 등급이 1등급, 2등급에 해당하는 도로, 건물, 산림의 면적을 산사태 발생시 해당 피해 규모로 보았다. 강원도에서 산사태로 인한 도로 피해 면적이 가장 큰 지역은 춘천시, 건물 피해 면적이 가장 큰 지역은 평창군, 산림 피해 지역이 가장 큰 지역은 홍천군으로 분석되었다.

우리나라의 산사태 피해액에 대한 과거자료는 복합재난 피해액 추정에 사용할 수 있을 만큼 충분하지 않다. 따라서 본 연구에서는 산사태 피해액 산정을 위해 Wills *et al.*(2016)의 연구와 같이 산사태 위험 지도를 이용하여 대략적인 피해를 추정하는 방법을 사용하였다.

## 3. 복합재난 피해추정 방법

본 연구는 복합재난 피해액을 정량적으로 추정하기 위하여 기존의 개별 재난 피해추정 방법 중 복합재난 피해추정에 적합한 방법을 선택하고, 단일재난 피해함수들을 기반으로 복합재난 피해율을 작성하여, 복합재난 피해율을 단일재난 피해액 추정 방법에 적용하는 방법으로 복합재난 피해추정을 수행하였다.

### 1) 복합재난 피해추정 식

홍수 및 산사태의 총 피해액을 추정하는 식은 다음과 같다. 식 1부터 식 3은 홍수 피해를 추정하는 객체기반법(나유경·최진무, 2019)을 기반으로 하되 피해율을 수정하였다. 홍수 단일재난은 침수심별 피해율을 적용하는데, 복합재난은 침수심 산사태등급별 피해율을 적용하도록 하였다.

건물 피해액 = 건물구조물 피해액 + 건물내용물 피해액  
식 1

건물구조물 피해액 = 건축면적×건물복구단가(원/㎡)×  
침수심 산사태등급별 피해율 식 2

건물내용물 피해액 = 건물내용물 평균금액×침수심 산  
사태등급별 피해율 식 3

## 2) 복합재난 피해를 작성

복합재난 피해율은 기본적으로 행정안전부(2020)의 연  
구 결과로 도출된 홍수 피해율을 기반으로 하였다(표 1).  
이 피해율은 가장 최근의 자료일 뿐만 아니라 건설기술연

구원에서 실험을 통해 국내 실정에 맞게 개발한 함수이다.  
표 1을 보면, 주거용 건물이 3.0m이상 침수되면 건물신축  
단가의 약 50%에 해당하는 피해가 발생함을 알 수 있다. 홍  
수로 인한 건물 피해는 유속이 매우 빠르거나 부유물의 영  
향을 받지 않는다면 건물의 구조적 결함이 없으므로 건축  
물의 유형과 자재를 반영하지 않아도 무방하지만(FEMA,  
2018) 산사태는 건물의 유형과 자재에 영향을 받기 때문에  
이를 반영해야 한다. 건물의 유형과 자재에 따라 산사태 피  
해율을 적용할 수 있도록 단독주택, 다중주택, 다가구주택,  
아파트, 연립주택, 다세대주택의 자재별 피해율을 구축하  
였다. 본 논문에서는 단독주택의 침수심 산사태등급별 피  
해율을 중심으로 피해를 작성 방법을 설명하였다.

한편, 산사태에 대해서는 피해액이 명시된 과거 기록이  
충분하지 않기 때문에 산사태로 인한 피해율을 도출하는

표 1. 침수심별 건물구조물 침수피해율(행정안전부, 2020)

(단위: %)

| 건물유형 \ 침수심   | 0 ~ 0.3m   | 0.3 ~ 0.6m | 0.6 ~ 0.9m | 0.9 ~ 1.2m | 1.2 ~ 1.5m | 1.5 ~ 1.8m |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 단독주택         | 7.9        | 14.3       | 19.4       | 24.8       | 30.4       | 35.1       |
| 아파트          | 4.5        | 11.3       | 17.4       | 23.0       | 28.1       | 32.7       |
| 연립주택 / 다세대주택 | 3.7        | 10.5       | 16.1       | 20.9       | 25.9       | 30.9       |
| 건물유형 \ 침수심   | 1.8 ~ 2.1m | 2.1 ~ 2.4m | 2.4 ~ 2.7m | 2.7 ~ 3.0m | 3.0m이상     |            |
| 단독주택         | 39.8       | 44.7       | 48.7       | 51.4       | 52.3       |            |
| 아파트          | 39.0       | 46.4       | 51.1       | 53.1       | 53.8       |            |
| 연립주택 / 다세대주택 | 36.6       | 43.1       | 47.4       | 49.6       | 50.1       |            |

비고) 다중주택, 다가구주택은 연립주택, 다세대주택의 침수피해율을 적용하였음

표 2. 단독주택의 침수심 산사태위험2등급 피해율

(단위: %)

| 건물유형 | 건물자재    | 침수심        |            |            |            |            |            |
|------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|      |         | 0 ~ 0.3m   | 0.3 ~ 0.6m | 0.6 ~ 0.9m | 0.9 ~ 1.2m | 1.2 ~ 1.5m | 1.5 ~ 1.8m |
| 단독주택 | 조적조     | 20.5       | 26.9       | 32         | 37.4       | 43         | 47.7       |
|      | 철근콘크리트조 | 15.4       | 21.8       | 26.9       | 32.3       | 37.9       | 42.6       |
|      | 철골조     | 26.9       | 33.3       | 38.4       | 43.8       | 49.4       | 54.1       |
|      | 목조      | 28.2       | 34.6       | 39.7       | 45.1       | 50.7       | 55.4       |
| 건물유형 | 건물자재    | 침수심        |            |            |            |            |            |
|      |         | 1.8 ~ 2.1m | 2.1 ~ 2.4m | 2.4 ~ 2.7m | 2.7 ~ 3.0m | 3m 이상      |            |
| 단독주택 | 조적조     | 52.4       | 57.3       | 61.3       | 64         | 64.9       |            |
|      | 철근콘크리트조 | 47.3       | 52.2       | 56.2       | 58.9       | 59.8       |            |
|      | 철골조     | 58.8       | 63.7       | 67.7       | 70.4       | 71.3       |            |
|      | 목조      | 60.1       | 65.0       | 69.0       | 71.7       | 72.6       |            |

데 한계가 있었다. 산사태 피해는 건물의 주변 환경이나 토석류의 방향 등에 따라 다르게 발생하나, 구체적인 기록이 없는 상태에서 이러한 점을 반영하기는 쉽지 않았다. 이에 본 연구는 산사태 피해가 예상되는 건물에 대해 산사태 위험 등급을 바탕으로 건물의 피해정도를 추정하고 이를 바탕으로 피해액을 산정하는 방법을 모색하였다. 산사태 위험 등급이 3등급, 4등급, 5등급에 해당하는 지역은 산사태가 발생할 확률이 거의 없으므로 기존의 침수심별 피해율(표 1)을 적용하였다.

산사태 위험 등급이 2등급인 지역은 건물구조물이 반파될 것으로 보았다. 재해연보를 통해 산사태로 인하여

건물이 반파되는 경우에는 지붕공사, 유리공사, 창호공사가 필요하다는 것을 알 수 있었다(행정자치부, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017; 행정안전부, 2018, 2019). 한국감정원(2019)의 건물신축단가표를 사용하여 건물 전체의 신축단가 중 지붕공사, 유리공사, 창호공사의 복구단가에 해당하는 금액을 비율로 환산하여 기존 침수 피해율에 추가하였다. 이를 침수심 산사태등급별 피해율로 나타내면 표 2와 같다.

산사태 위험 등급이 1등급인 지역에서 산사태가 발생하면 전파될 가능성이 매우 높다(행정자치부, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 행정안전부, 2018; 2019). 산사태

표 3 단독주택의 침수심 산사태등급별 피해율

(단위: %)

| 건물자재        | 산사태<br>위험등급 | 침수심      |            |            |            |            |            |
|-------------|-------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
|             |             | 0 ~ 0.3m | 0.3 ~ 0.6m | 0.6 ~ 0.9m | 0.9 ~ 1.2m | 1.2 ~ 1.5m | 1.5 ~ 1.8m |
| 조적조         | 3·5등급       | 7.9      | 14.3       | 19.4       | 24.8       | 30.4       | 35.1       |
|             | 2등급         | 20.5     | 26.9       | 32         | 37.4       | 43         | 47.7       |
|             | 1등급         | 100      | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        |
| 철근<br>콘크리트조 | 3·5등급       | 7.9      | 14.3       | 19.4       | 24.8       | 30.4       | 35.1       |
|             | 2등급         | 15.4     | 21.8       | 26.9       | 32.3       | 37.9       | 42.6       |
|             | 1등급         | 100      | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        |
| 철골조         | 3·5등급       | 7.9      | 14.3       | 19.4       | 24.8       | 30.4       | 35.1       |
|             | 2등급         | 26.9     | 33.3       | 38.4       | 43.8       | 49.4       | 54.1       |
|             | 1등급         | 100      | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        |
| 목조          | 3·5등급       | 7.9      | 14.3       | 19.4       | 24.8       | 30.4       | 35.1       |
|             | 2등급         | 28.2     | 34.6       | 39.7       | 45.1       | 50.7       | 55.4       |
|             | 1등급         | 100      | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        |

| 건물자재        | 산사태<br>위험등급 | 침수심        |            |            |            |       |
|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-------|
|             |             | 1.8 ~ 2.1m | 2.1 ~ 2.4m | 2.4 ~ 2.7m | 2.7 ~ 3.0m | 3m 이상 |
| 조적조         | 3·5등급       | 39.8       | 44.7       | 48.7       | 51.4       | 52.3  |
|             | 2등급         | 52.4       | 57.3       | 61.3       | 64         | 64.9  |
|             | 1등급         | 100        | 100        | 100        | 100        | 100   |
| 철근<br>콘크리트조 | 3·5등급       | 39.8       | 44.7       | 48.7       | 51.4       | 52.3  |
|             | 2등급         | 47.3       | 52.2       | 56.2       | 58.9       | 59.8  |
|             | 1등급         | 100        | 100        | 100        | 100        | 100   |
| 철골조         | 3·5등급       | 39.8       | 44.7       | 48.7       | 51.4       | 52.3  |
|             | 2등급         | 58.8       | 63.7       | 67.7       | 70.4       | 71.3  |
|             | 1등급         | 100        | 100        | 100        | 100        | 100   |
| 목조          | 3·5등급       | 39.8       | 44.7       | 48.7       | 51.4       | 52.3  |
|             | 2등급         | 60.1       | 65.0       | 69.0       | 71.7       | 72.6  |
|             | 1등급         | 100        | 100        | 100        | 100        | 100   |

가 발생하면 침수에 따른 피해 정도와 상관없이 최종적으로 건물이 전파된다. 산사태 위험등급이 1등급인 지역 또는 산사태로 건물이 전파된 경우는 산사태가 발생하기 이전의 침수심에 상관없이 건물신축단가의 100%에 해당하는 피해를 입는다. 침수심 산사태등급별 피해율을 종합하여 나타내면 표 3과 같다.

단독주택 외에도 다중주택, 다가구주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택의 자재별 피해율을 구축하였다. 본 연구에서 작성한 침수심 산사태등급별 피해율은 검증에 위한 데이터 부족으로 인하여 신뢰도 검증은 어렵다는 한계가 있다. 향후 호우 후 산사태 피해 발생 시 현장 실사를 통해 피해를 조사하고 이를 바탕으로 한 피해율 검증이 필요하다.

### 3) 데이터 수집 및 처리

본 연구에서는 침수와 산사태의 복합재난 피해액 산정을 위해 현재 국내에 구축되어 있는 공간정보를 비교하여 복합재난 피해추정에 적합한 데이터를 수집하였다. 필요한

데이터는 자산 데이터셋, 재난 데이터셋, 피해율로 구분할 수 있다. 자산 데이터셋에 해당하는 건물 데이터는 개별 건물 단위로 구축하였다. 피해추정을 위해서는 건물 용도, 건물 구조, 면적, 지상층수, 지하층수, 건물 연식 등의 속성정보가 필요하다. 국내 건물 데이터 중 개별 건물 단위로 구축된 공간정보는 국토지리정보원에서 작성하는 연속수치지형도 건물 데이터, 국토교통부에서 제공하는 GIS건물통합정보, 행정안전부에서 제공하는 도로명주소 건물 데이터가 있다. 각 데이터는 구축 목적과 방법이 달라 총 건물 개수 및 건물 유형 분류체계가 상이하다. 세 가지 데이터 중 복합재난 피해액 추정에 사용되는 피해율을 적용하기 편리한 건물 유형 분류체계를 갖는 데이터는 도로명주소 건물 데이터이다. 도로명주소 건물 데이터는 갱신주기가 짧기 때문에 최신의 건물 상황을 적용하기에도 바람직한 자료이다. 다만 건물의 자재에 대한 정보를 포함하지 않으므로, 건축물대장 표제부를 사용하여 보완하였다. 복합재난 피해추정에 매개변수로 사용하는 건물신축단가는 한국감정원에서 제공하는 2019년 건물신축단가를 사용하였다.

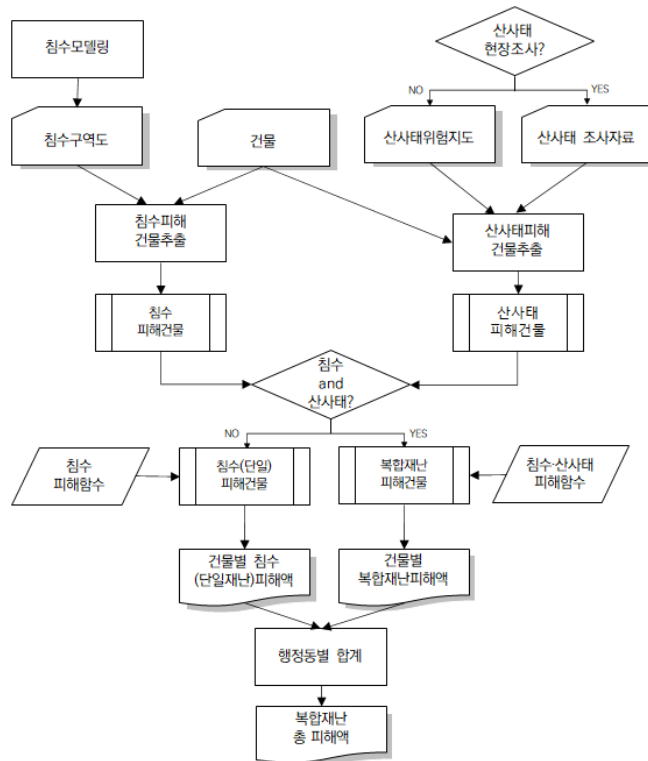


그림 1 복합재난 건물 피해액 추정 프로세스

재난 데이터셋은 복합재난으로 피해를 입은 대상물과 그 피해 정도를 파악하기 위하여 사용하는 데이터이다. 재난 데이터셋은 재난의 범위 및 강도에 대한 속성정보를 담고 있는 침수구역도와 산사태위험지도가 포함된다. 침수구역도는 내수침수와 외수침수 시뮬레이션을 통해 작성할 수 있으며 속성에 침수심 정보를 반드시 포함해야 한다. 본 연구에서는 연구지역의 하천주변 침수심 정보를 추출하기 위해 HEC-RAS를 이용한 외수침수 시뮬레이션 결과 데이터를 사용하였다. 산사태위험지도는 산림청에서 제공하는 산사태위험지도를 사용하였다. 산사태 발생인자 9개를 고려하여 산사태위험등급을 5등급으로 구분한 래스터 형식의 지도이다. 만약 산사태가 발생한 특정 지역을 알고 있다면 산사태 발생위치를 폴리곤으로 구축하여 분석할 수 있다.

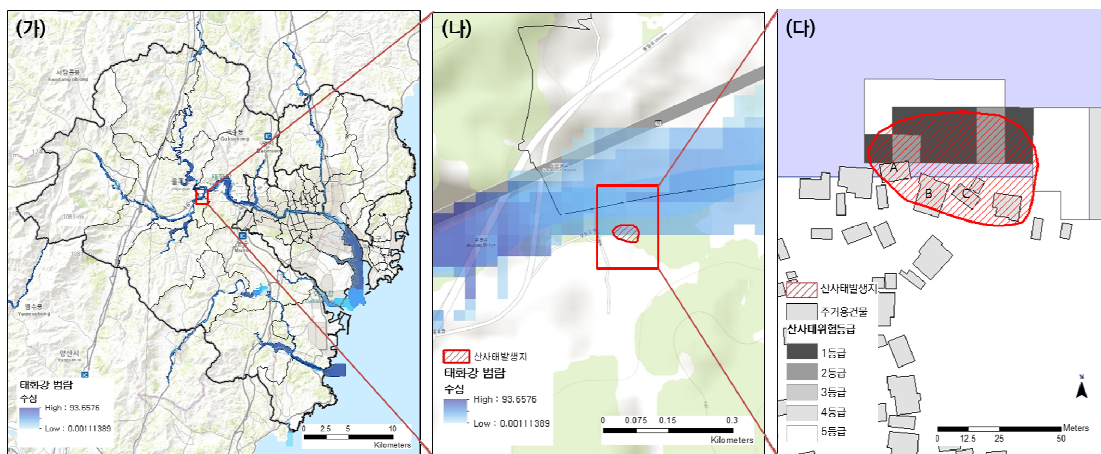
분석에 사용하는 피해율은 앞서 설명한 침수심 산사태 등급별 피해율을 적용하였다. 건물은 유형과 자재에 따라 12가지의 피해율 중 선택하여 사용할 수 있다. 침수구역도, 산사태위험지도, 건물 데이터를 중첩하여 각 건물이 침수심과 산사태위험등급을 속성값으로 갖게 한 후에 건물의 특성에 따라 피해율을 적용하였다. 분석에 앞서, 모든 데이터의 좌표계제를 UTM-K로 통일하였고, 침수구역도는 침수심을 속성으로 포함하는 폴리곤 형태의 데이터가 되도록 하였다. 침수구역도의 침수심은 0.3m간격으로 구분되어 있는 침수심별 건물구조물 피해율을 적용할 수 있도록 0.3m간격으로 재분류하였다. 건물데이터는 도로명주소 건물 데이터를 건축물대장 표제부의 주거용 주거건축물

과 병합하여 사용하였다.

복합재난으로 인한 건물 피해액 추정 프로세스는 그림 1과 같다. 산사태가 발생하기 이전에는 산사태위험지도를 사용할 수 있고, 산사태 조사자료가 있다면 실제 산사태 발생 위치와 강도에 대한 데이터를 사용할 수 있다. 침수구역도와 산사태위험지도를 이용하여 산사태 발생 가능성이 있는 지역을 선별하고, 그 지역에 속한 건물의 피해액을 추정할 수 있다. 침수지역에 위치하고 있지만 산사태 피해를 입지 않은 건물에는 침수 피해함수를 적용하고, 침수 후 산사태 피해까지 입은 지역은 침수·산사태 피해율을 적용하여 피해액을 산정한다. 각 건물의 신축단가에 침수심 산사태 등급별 건물 피해율을 곱하여 복합재난 피해액을 추정한다.

#### 4. 사례지역 분석

울산의 침수구역도와 산사태위험지도를 중첩하여 호우로 인한 산사태가 발생할 가능성이 있는 위치를 선정하였다. 데이터를 중첩하여 침수구역도의 침수구역에 포함되면서 산사태위험등급이 1등급 또는 2등급에 해당하는 지역 중 건물이 위치한 지역을 선별하고자 하였다. 확인 결과, 산사태위험지역에는 주거용 건물이 건축되어 있지 않은 것을 알 수 있었다. 가상의 산사태 발생지를 선정하기 위하여 산사태위험등급이 1등급, 2등급에 해당하는 지역의 30m 버퍼를 두고 주거용건물 포함되어 있는 지역인 울



W그림 2 분석 지역((가)울산시 침수구역도, (나)울산시 울주군 산사태지역, (다)침수 및 산사태 피해 건물)



표 4. 건물유형별 단일재난 피해와 복합재난 피해추정액 비교

(단위: 천원)

| 건물<br>구분 | 단일재난 피해액     |         |         | 복합재난 피해액     |              |
|----------|--------------|---------|---------|--------------|--------------|
|          | 홍수(침수심2.71m) | 산사태(반파) | 산사태(전파) | 홍수 후 산사태(반파) | 홍수 후 산사태(전파) |
| A        | 77,890       | 75,768  | 151,536 | 108,651      | 151,536      |
| B        | 83,361       | 81,090  | 162,180 | 95,524       | 162,180      |
| C        | 85,004       | 82,689  | 165,378 | 97,407       | 165,378      |
| 계        | 246,255      | 239,547 | 479,094 | 301,582      | 479,094      |

주군 언양읍 일부 지역을 선정하였다(그림 2). 이 지역에 포함된 5개의 건물 중 주 건축물인 3개 건물의 홍수 후 산사태 피해액을 분석하였다.

그림 2(다)의 산사태 지역에서 산사태 발생지에 포함되는 건물들은 모두 단독주택이며 A건물은 목조, B건물과 C건물은 철근콘크리트조 건물이다. 건물의 유형 및 자재에 따른 침수심 산사태등급별 피해율을 적용하였다. 각 건물의 피해추정액은 표 4와 같다. 홍수 후 산사태로 건물이 반파된 경우, 홍수로 인한 단일재난 피해와 산사태로 인한 피해액을 각각의 단일재난 피해추정 방법으로 추정하여 단순 합산한 금액보다 복합재난 피해추정방법을 사용하였을 때 피해금액이 낮게 추정되었다. 이는 침수로 인한 피해와 산사태로 인한 피해를 중복하여 계산하지 않았기 때문이다. 산사태 단일재난으로 건물이 전파된 경우의 피해액과 복합재난으로 인하여 건물이 전파된 경우의 피해액은 동일하게 추정되었다. 건물이 전파되었을 경우 건물을 신축하는 비용의 100%에 해당하는 금액으로 산정되기 때문이다. 본 연구의 분석방법을 적용하면 복합재난 시 중복되는 피해에 대한 복구금액을 고려하여 피해액을 산정할 수 있다. 다만, 복합재난이 발생할 때 2차 재난의 강도가 단일재난으로 발생할 때와 차이가 있을 수 있음을 주의해야 할 것이다.

## 5. 결론

기존에는 단일재난의 피해액 추정 방법으로는 복합재난의 피해액을 정량적으로 파악할 수 없고, 중복되는 피해를 고려할 수 없다. 이에 본 연구는 기존의 단일재난 피해액 추정 방법에 사용되는 피해율을 이용하여 복합재난의 피해액을 산정할 수 있는 피해율을 도출하고 이를 이용하여

복합재난 피해액 산출 방법을 제안하였다. 홍수 후 산사태라는 복합재난 피해에 적용할 수 있는 피해율이 개발되어 있지 않기 때문에 홍수 후 산사태에 대해 건물자재별로 침수심과 산사태위험등급에 대한 피해율을 도출하여 활용하였다. 울산지역을 사례로 분석한 결과, 중복되는 피해금액을 고려함으로써 단일재난으로서의 침수 피해액과 산사태 피해액을 합산한 금액보다 복합재난으로서 침수 후 산사태 피해액이 낮게 추정됨을 확인하였다. 다만 단일재난으로서 발생하는 산사태와 2차 재난으로서 발생하는 산사태의 강도나 범위는 다를 수 있음을 주의해야 할 것이다. 사례 분석을 통하여 현재 구축되어 있는 데이터를 사용하여 복합재난 피해액 추정이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 기 구축된 공간정보를 통합하여 사용함으로써 개별 건물 객체에 대한 홍수와 산사태라는 복합재난의 피해를 산정할 방법을 제시하였다는 것에 의의가 있다. 특히 과거 산사태 피해 기록을 바탕으로 건물에 대한 홍수 후 산사태의 피해액 산정에 적용할 수 있는 피해율을 논리적으로 도출하여 제시함으로써 홍수 후 산사태의 복합재난 피해추정을 위한 가능성을 제시한 것에도 의의가 있다. 다만 산사태 피해율에 대하여 검증할만한 기록 자료가 부족하므로 향후 현장검증 등을 통하여 피해율을 수정·보완하고 이를 바탕으로 연속자료인 피해함수로 발전시켜야 할 것이다. 또한 이 연구를 다른 복합재난 시나리오로 발전시킨다면 국내에서 발생 가능한 다양한 복합재난 시나리오에 대한 종합적인 틀에서 재난간의 연쇄작용으로 인한 피해를 확인할 수 있게 되고 이를 바탕으로 복합재난에 대한 대응정책 마련에 도움이 될 것으로 확신한다.

본 연구에서 제안한 복합재난 피해추정 방법론을 사용한 분석 결과는 재난지역 정비 대상의 우선순위를 정하는 근거에 활용될 수 있다. 복합재난에 대한 피해액 추정은 재난의 예방 단계에서는 복합재난이 발생할 수 있는 위험지역에 대한 예방 사업을 위해 중앙정부 및 지자체의 예산을

재난지역에 할당하는 기초자료로 사용할 수 있다. 또한 복합재난 피해액 산정 방법을 피해 현황조사 자료에 적용하면 실제 복합재난 피해액을 산출할 수 있고 이는 재난의 복구 단계에서 한정된 자원을 효과적으로 배분하여 피해를 복구하기 위한 의사결정의 근거로 사용할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

강동호, 이석호, 김길호, 김병식, 2018, “건물군 인벤토리가 고려된 다차원법을 활용한 홍수피해액 산정,” 한국방재학회지, 18(7), 119-127.

강부식, 2012, “한국형 자연재난 피해추정 시스템의 필요성 및 구축방향,” 물과미래, 45(12), 58-62.

김광목, 김태승, 박태선, 김연진, 2001, 치수사업 경제성 분석 개선방안 연구, 건설교통부.

김경수, 송영석, 조용찬, 김원영, 정교철, 2006, “지질조건에 따른 강우와 산사태의 특성분석,” 지질공학회지, 16(2), 201-214.

김동영, 정일원, 2018, “복합재난 시나리오 개발을 위한 국내 재난 사례 인벤토리 구축 연구,” 복합신소재구조학회지, 9(4), 27-31.

김동영, 정일원, 박지연, 2018, “복합재난 시나리오 구축을 위한 재난간 연관성 분석 및 시나리오 활용,” 한국방재학회지, 18(6), 42-47.

김병일, 김두연, 2015, “자연재해로 인한 기반시설의 간접 피해액 예측 연구 동향,” 한국건설관리학회논문집, 16(2), 36-38.

김석우, 전근우, 김진갑, 김민식, 김민석, 2012, “2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성 분석,” 한국산림과학지, 101(1), 28-35.

김원영, 1998, “지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성: 연천-철원지역을 대상으로,” 지질공학회지, 8(2), 115-130.

나유경, 최진무, 2019, “객체기반법을 이용한 침수피해액 추정 방안 연구,” 대한지리학회지, 54(6), 637-649.

나유경, 박진홍, 최진무, 2019, “빅데이터를 이용한 복합재난의 발생 지역 및 유형 분석,” 국토지리학회지, 53(4), 375-384.

류주형, 이사로, 원종선, 2002, “인공신경망을 이용한 산사태 발생요인의 가중치 결정,” 자원환경지질, 35(1), 67-74.

양인태, 박재국, 박진, 2014, “산사태 위험지도를 이용한 강원도 지자체의 피해규모 산정,” 한국지형공간정보학회지,

22(4), 71-80.

오승희, 손진, 정우석, 이용태, 2018, “시나리오 기반의 복합재난 통합모델링 개발,” 한국통신학회논문지, 43(11), 1920-1928.

이근상, 2015, “공간정보와 Modified MD-FDA 기반의 침수피해액 산정시스템 구현,” 한국지적학회지, 31(1), 27-40.

이병진, 이병훈, 오승희, 이용태, 김경석, 2017, “주요 시설물 피해를 고려한 복합재난 피해 예측 시스템 방안 연구,” 한국위성정보통신학회논문지, 12(4), 18-25.

이자원, 2010, “기후변화 예측 하에 전개될 재난에 대한 적응기법 모델링을 위한 선진국 사례 연구,” 국토지리학회지, 44(2), 213-228.

이재은, 2005, 자연재난과 방재시스템, 정보통신정책연구원.

이재은, 이우권, 2014, “한국의 복합재난 대응과 위기관리체계 발전 방향,” 위기관리 이론과 실천, 10(9), 15-31.

정우영, 김성준, 2012, “자연재해에 따른 사유재산 예상 피해액 산정방안 연구,” 한국재난정보학회논문집, 8(4), 336-346.

정창삼, 2017, 시나리오 기반 대형 복합재난 확산 예측 기술개발, 국토연구.

추태호, 광길신, 안시형, 양다운, 손준근, 2017, “재해통계기반 서해 연안지역의 풍랑피해예측함수 개발,” 한국산학기술학회논문지, 18(2), 14-22.

최승안, 이충성, 심명필, 김형수, 2006, “다차원 홍수피해산정 방법 (1): 원리 및 절차,” 한국수자원학회논문집, 39(1), 1-9.

최천규, 2017, 홍수피해 영향인자 평가 및 손상함수 개발: 주거건물 및 건물내용물 중심으로, 인하대학교 박사학위논문.

한국감정원, 2019, 2019년 건물신축단가표, 한국감정원.

행정자치부, 2012, 2011년 재해연보, 행정자치부.

행정자치부, 2013, 2012년 재해연보, 행정자치부.

행정자치부, 2014, 2013년 재해연보, 행정자치부.

행정자치부, 2015, 2014년 재해연보, 행정자치부.

행정자치부, 2016, 2015년 재해연보, 행정자치부.

행정자치부, 2017, 2016년 재해연보, 행정자치부.

행정안전부, 2018, 2017년 재해연보, 행정자치부.

행정안전부, 2019, 2018년 재해연보, 행정자치부.

행정안전부, 2020, 풍수해 직접·간접피해를 고려한 피해 산정 및 예측 기술개발, 행정안전부.

Arosio, M., Martina, M. L. and Figueiredo, R., 2018, Natural hazard risk of complex systems-the whole is more than the sum of its parts: I. A holistic modelling

- approach based on Graph Theory, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-23.
  - Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardiczone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M. and Salvati, P., 2002, A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 57-72.
  - Federal Emergency Management Agency(FEMA), 2003, Flood Model: Technical Manual, Federal Emergency Management Agency.
  - Federal Emergency Management Agency(FEMA), 2018, HAZUS-MH Flood model Technical Manual, Federal Emergency Management Agency.
  - Fleming, R. W. and Taylor, F. A., 1980, Estimating the costs of landslide damage in the United States, 832. US Department of the Interior, Geological Survey.
  - Komendantova, N., Mrzyglocki, R., Mignan, A., Khazai, B., Wenzel, F., Patt, A. and Fleming, K., 2014, Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: Feedback from civil protection stakeholders. *International Journal of disaster risk reduction*, 8, 50-67.
  - Wills, C., Perez, F. and Branum, D., 2016, New method for estimating landslide losses from major winter storms in California and application to the ArkStorm scenario. *Natural Hazards Review*, 17(4), 1-13.
- 교신: 최진무, 02447, 서울시 동대문구 경희대로 26-6, 경희대학교  
지리학과(이메일: cjm89@khu.ac.kr, 전화: 02-961-0188, 팩스:  
02-961-0848)
- Correspondence: Jinmu Choi, 02447, Department of Geography,  
Kyung Hee University, 26-6, Kyungheedaero, Dongdaemun-gu,  
Seoul, Republic of Korea(e-mail: cjm89@khu.ac.kr, phone: +82-  
02-961-0188, fax: +82-02-961-0848)

최초투고일 2020. 8. 12

수정일 2020. 8. 31

최종접수일 2020. 8. 31