

## 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선 평가

# Assessment of Building Vulnerability Curve Subjected to Debris-Flow

최승훈\* · 함희정\*\* · 이승수\*\*\*

Choi, Seung Hun\*, Ham, Hee Jung\*\*, and Lee, Sungsu\*\*\*

### Abstract

In this study, the vulnerability curves for masonry and concrete frame buildings are assessed based on building fragility curves for the debris-flow caused by landslides on mountain slopes. The First-Order Second-Moment (FOSM) method is used to estimate the building fragility curve (expressed as probability of damage exceedance) subjected to debris-flow. In this method, the horizontal displacement of a building impacted by debris-flow and the statistics of resistance (i.e., building displacement) following four different damage states (i.e., slight, moderate, extensive, and complete) are utilized to estimate the building fragility curve. The building vulnerability curves (expressed as mean probability of damage) were evaluated based on the estimated building fragility curve and corresponding mean damage ratio for each damage state and were verified by calculating the root mean square error with datasets obtained from post-disaster damage assessment. In this study, the effects of structural material, type, and height on the building vulnerability curves were also studied. All vulnerability curves of buildings estimated in this study were fitted and databased using parameters of the log-normal cumulative distribution function and can be used to measure the performance of buildings in debris-flow prone areas as well as to provide information for risk and loss assessment.

**Key words** : Debris-Flow, Building, Vulnerability Curve, FOSM, Log-Normal Cumulative Distribution Function

### 요 지

본 연구에서는 산사면에서 붕괴로 발생하는 토석류에 대하여 조적과 콘크리트 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선(Vulnerability Curve)을 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선(Fragility Curve)을 기초하여 평가하였다. 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선은 신뢰도 지수 기반의 해석적 접근 방법인 First-Order Second-Moment (FOSM) 방법을 이용하여 평가하였다. 이 방법에서 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 도출하기 위하여 토석류로 인한 건축물의 최대 수평변위와 건축물의 손상상태별(Slight, Moderate, Extensive, Complete) 저항성능(건축물의 수평변위)에 대한 통계치가 적용되었다. 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선은 각 손상상태에 대한 초과손상확률 형태의 취약성 곡선과 평균 손상률(Mean Damage Ratio)을 이용하여 평가되었으며, 평가된 평균손상확률 형태의 취약성 곡선은 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error)를 이용하여 과거 토석류 피해자료와의 적합성을 검증하였다. 또한, 본 연구에서는 평가된 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선에 대하여 건축물의 구조 재료, 형태, 높이에 대한 영향성을 평가하였다. 본 연구에서 평가한 모든 취약성 곡선은 로그정규 누적분포함수의 형태로 곡선 맞춤 후 해당 모수의 형태로 데이터베이스화되었으며, 토사재해가 빈번한 지역에 있는 건축물의 구조적 성능을 평가하거나 위험도(Risk) 및 손실(Loss)을 평가할 시 활용될 수 있다.

**핵심용어** : 토석류, 건축물, 취약성 곡선, FOSM, 로그정규 누적분포함수

\*정회원, 강원대학교 건축공학과 박사과정(E-mail: krsh@hanmail.net)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

\*\*교신저자, 정회원, 강원대학교 건축·토목·환경공학부 교수(Tel: +82-33-250-6222, Fax: +82-33-259-5542, E-mail: heejham@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Kangwon National University

\*\*\*정회원, 충북대학교 토목공학부 교수

Member, Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

## 1. 서론

최근 도시화 및 과밀화 증가 등의 급격한 환경변화로 인하여 외곽에서만 존재하던 건축물은 산사면 인근까지 확장되고 있다. 또한, 기후 온난화로 인하여 빈번히 발생하는 국지성 집중호우로 산사면 붕괴 등이 발생함에 따라 인근 건축물에 토석류로 인한 피해 발생 가능성이 커지고 있다.

2011년 7월 서울 서초구 우면산 및 춘천 신북읍 인근 야산 등에 국지성 집중호우로 인한 산사면 붕괴가 발생하면서 건축물 6동(서울 1동, 춘천 5동)이 전파되고, 11동(서울 10동, 춘천 1동)이 반파되는 피해가 발생하였다. 그뿐만 아니라 산사태로 인하여 사망 29명(서울 16명, 춘천 13명), 부상 77명(서울 51명, 춘천 26명) 등의 인명피해가 발생하였다(Seoul Metropolitan Government, 2014; Kim et al., 2015).

미국 등과 같은 선진국에서는 산사면 붕괴 등과 같은 다양한 자연재해에 대한 피해평가 및 경감을 위하여 피해 대상물(건축물, 필수시설물, 사회기반시설 등)의 취약성 곡선을 개발하여 적용하고 있다(FEMA, 2010). 일반적으로 자연재해에 대한 피해를 평가하기 위하여 적용되는 취약성 곡선은 재해의 강도에 따른 피해 목적물의 손상상태(Damage State)에 대한 초과손상확률(Probability of Damage Exceedance)로 표현되는 취약성 곡선(Fragility Curve, 이하 초과손상확률 형태의 취약성 곡선)과 재해의 강도에 따른 피해 목적물의 평균손상확률(Mean Probability of Damage)로 표현되는 취약성 곡선(Vulnerability Curve, 이하 평균손상확률 형태의 취약성 곡선)으로 분류할 수 있다. 초과손상확률 형태의 취약성 곡선은 자연재해 발생 시 특정 건물군에 대하여 정의한 손상상태(예: 소파, 중파, 대파 등)에 대한 손실을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있으며, 평균손상확률 형태의 취약성 곡선은 해당 건축물의 평균적인 손실을 추정하는데 쉽게 적용할 수 있다(Pregolato et al., 2015).

국내에서는 Kang (2016), Choi (2013) 등의 연구에서 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선을 개발하였다. Kang (2016) 연구의 경우 국내 토석류 피해사례를 통하여 경험적 또는 수치적 방법에 기초한 해석적 접근법을 이용하여 보강 및 비보강 콘크리트로 구성된 건축물에 대하여 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 개발하였다. Choi (2013) 연구의 경우 손상확률 매트릭스(Damage Probability Matrix)를 통하여 국내 토석류 피해사례와 미국 FEMA (2010) 지진재해모형에서 개발한 HAZUS-MH의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 혼합하여 건축물에 대한 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 개발하였다. 하지만 이들 연구(Choi, 2013; Kang, 2016)는 특정 건축물에 대한 취약성 곡선만을 제시하거나 국내 건축물 구조 및 재료의 특성이 고려되지 않아 다양한 재료 및 구조시스템으로 구성된 국내 건축물에 대한 토석류의 피해를 평가하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 토석류에 대하여 국내 건축물의 약 60%

이상을 차지하는 조적 및 콘크리트 건축물을 중심으로 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 기초하여 건축물의 구조 재료, 형태, 높이별로 평가하고 검증하였다. 본 논문에서는 토석류에 대한 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선 평가방안, 그리고 손상상태별(Slight, Moderate, Extensive, Complete) 초과손상확률 형태의 취약성 곡선과 평균손상률(Mean Damage Ratio)을 이용한 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가하는 방안을 제시하고, 조적 및 콘크리트 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 건축물의 구조시스템과 높이에 따라 평가하였다. 또한, 본 연구에서는 평가된 토석류에 대한 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하여 과거 토석류 피해사례와의 적합성을 검증하였다. 개발된 평균손상확률 형태의 취약성 곡선은 토사재해가 빈번한 지역에서의 리스크를 평가할 시 사용할 수 있도록 로그정규 누적분포 함수의 모수 형태로 데이터베이스화하였다.

## 2. 토석류 취약성 곡선 평가 방법론

본 장의 2.1절에서는 자연재해에 대한 초과손상확률 및 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가할 수 있는 평가 방법론을 소개한 후 평가방법 중 First-Order Second-Moment (FOSM) 방법에 따라 토석류에 대한 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가하는 방법론을 제시한다. 2.2절과 2.3절에서는 토석류에 대하여 조적 및 콘크리트 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가하기 위한 건축물의 수평변위와 건축물의 손상상태에 따른 저항성능(건축물의 수평변위)의 통계치를 평가하는 방법을 보인다. 2.4절에서는 토석류에 대한 건축물의 손상상태별 초과손상확률 형태의 취약성 곡선과 평균손상률을 이용하여 평균손상확률 형태의 취약성 곡선으로 평가하는 방안을 제시한다. 마지막으로 2.5절에서는 임의의 토석류 하중에 대하여 건축물의 피해추정에 적용하기 위한 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 연속함수 형태의 데이터베이스화 방안을 보인다.

### 2.1 초과손상확률 형태의 취약성 곡선 평가방안

일반적으로 자연재해에 대한 취약성 곡선은 자연재해로 발생하는 임의의 강도에 대한 피해 목적물의 손상확률을 나타내는 함수이다(Yun et al., 2015). 이러한 자연재해 취약성 곡선은 1장에 전술한 바와 같이 초과손상확률 형태의 취약성 곡선과 평균손상확률 형태의 취약성 곡선으로 분류되며(Pregolato et al., 2015), Table 1과 같이 전문가적(Judgmental), 경험적(Empirical), 해석적(Analytical), 혼합적(Hybrid) 접근 방법을 통하여 평가할 수 있다(Schultz et al., 2010). Table 1과 같이 초과손상확률 및 평균손상확률 형태의 자연재해 취약성 곡선을 평가하기 위한 네 가지의

**Table 1.** Approaches for Developing Fragility and Vulnerability Curves (Schultz et al., 2010)

Classification	Definition
Judgmental Approach	Fragility and vulnerability curves based on some form of expert opinion is classified as judgmental.
Empirical Approach	Empirical fragility and vulnerability curves are based on observational data documenting the performance of structures under a variety of loads.
Analytical Approach	Analytical fragility and vulnerability curves are based on analytical or numerical models that characterize the performance limit state of the structure.
Hybrid Approach	A hybrid approach for developing fragility and vulnerability curves use a combination of two or more of the approaches described above in an attempt to supplement their various limitations.

접근 방법은 각기 상이한 특징을 가지며, 취약성 곡선 개발에 대한 소요 시간과 비용을 고려할 시 어느 한 접근 방법이 최선의 접근 방법이라 정의할 수 없다. 본 연구에서는 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선을 평가하기 위하여 해석적 접근 방법을 채택하였다.

초과손상확률 및 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가하기 위한 해석적 접근 방법은 Table 2와 같이 FOSM, FORM, SORM으로 분류될 수 있다(Schultz et al., 2010).

Table 2의 FOSM 방법은 임의의 하중과 건축물의 저항성을 기초로 신뢰도 지수(Reliability Index)를 계산하여 건축물의 손상확률을 산정하는 방법이다. 로그정규분포(Log-Normal Distribution) 형태의 토석류 영향성(Demand)과 건축물 저항성능(Capacity)의 통계치를 이용하여 신뢰도 지수를 계산할 경우, 구조물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선은 Eq. (1)을 통해 산정될 수 있다(Schultz et al., 2010).

**Table 2.** Analytical Method for Modeling Fragility and Vulnerability Curves (Schultz et al., 2010)

Classification	Definition
FOSM	- First-order second-moment - Method is based on well-known approximations.
FORM	- First-order reliability method - Extends first-order approximation methods to handle non-normal basic random variables.
SORM	- Second-order reliability method - Extends first-order approximation methods to address nonlinear limit state equations.

$$P_f(s) = \Phi(-\beta) = \Phi\left(\frac{\ln(s/m_R)}{\sigma_{\ln R}}\right) \quad (1)$$

여기서,  $P_f(s)$ 는 외력  $s$ 에 대한 피해 대상물의 손상확률,  $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포함수,  $\beta$ 는 피해 대상물의 신뢰도 지수,  $m_R$ 과  $\sigma_{\ln R}$ 은 손상상태 도달할 시 피해 대상물의 저항성능

에 대한 중앙값과 대수표준편차를 각각 의미한다.

Eq. (1)을 통하여 토석류에 대한 최대 수평변위 발생 시의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선은 Eq. (2)와 같이 평가될 수 있다.

$$P_f(u_{max}) = \Phi(-\beta) = \Phi\left(\frac{\ln(u_{max}/m_{BR})}{\sigma_{\ln BR}}\right) \quad (2)$$

여기서,  $P_f(u_{max})$ 는 토석류 충격으로 발생하는 최대 수평변위  $u_{max}$ 에 대한 건축물의 손상확률,  $m_{BR}$ 과  $\sigma_{BR}$ 은 건축물 손상상태 도달할 때의 건축물 수평변위에 대한 중앙값과 대수표준편차를 각각 의미한다.

Eq. (2)를 통하여 토석류에 대한 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가할 시 필요한 토석류에 의한 건축물의 최대 수평변위, 그리고 손상상태에 따른 건축물 저항성능의 통계치인 건축물 수평변위의 중앙값과 대수표준편차에 대한 평가방안은 2.2절과 2.3절에 각각 보인다.

## 2.2 토석류 충격으로 인한 건축물의 최대 수평변위

집중호우 등으로 인하여 발생하는 산사면 붕괴 등의 토석류는 경사면을 따라 이동하여 하류부에 위치한 건축물의 측면에 충격을 가한다. 이때 발생하는 건축물의 수평변위는 정적 하중과 동적 하중의 영향으로 나누어질 수 있다. 본 연구에서는 토석류 충격으로 발생하는 최대 수평변위를 산정하기 위하여 정적 하중에 의한 수평변위와 더불어 건축물 구조시스템의 동적 특성인 반응수정계수(Response Modification Coefficient)와 고유주기(Natural Period) 등을 고려하여 토석류 충격에 의한 동적 변위를 같이 평가하였다.

토석류의 충격으로 발생하는 건축물의 최대 수평변위는 Eq. (3)과 같이 건축물의 정적 하중으로 발생하는 수평변위와 동적 하중으로 발생하는 수평변위의 합으로 산정할 수 있다(Haugen and Kaynia, 2008; Choi, 2013).

$$u_{max} = u_{st} + u_{dy} \quad (3)$$

여기서,  $u_{max}$ 는 토석류에 의한 건축물의 최대 수평변위,  $u_{st}$ 는 정적 토석류 하중에 의한 건축물의 수평변위,  $u_{dy}$ 는 동적 토석류 하중에 의한 건축물의 수평변위를 각각 의미한다.

각각의 정적 및 동적 토석류 하중으로 인한 수평변위는 Eq. (4)와 Eq. (5)와 같이 발생하는 토석류의 밀도, 침수심, 유속과 건축물의 재료적 특성을 통하여 산정할 수 있다 (Haugen and Kaynia, 2008; Choi, 2013).

$$u_{st} = \frac{F_{st}}{k} = \frac{\rho g A h_f}{2k} \left( k = \frac{4\pi^2 m}{T_n^2} \right) \quad (4)$$

$$u_{dy} = R \frac{F_{dy}}{k} = \frac{\rho v^2 A}{k} \left( k = \frac{4\pi^2 m}{T_n^2} \right) \quad (5)$$

여기서,  $F_{st}$ ,  $F_{dy}$ 는 정적 및 동적 토석류 하중(MN),  $k$ 는 건축물의 강성(MN/m),  $R$ 은 건축물의 반응수정계수,  $\rho$ 는 토석류의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $g$ 는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>),  $A$ 는 건축물의 노출 면적(m<sup>2</sup>),  $h_f$ 는 토석류로 인한 침수심(m),  $v$ 는 토석류의 유속(m/s)을 각각 의미한다. 또한,  $m$ 은 건축물의 질량(kg),  $T_n$ 은 건축물의 고유주기를 의미한다.

건축물의 강성  $k$ 는 Eq. (4)와 Eq. (5)의 괄호 안에 식과 같이 건축물의 고유주기  $T_n$ 과 질량  $m$ 에 따라 상이하게 산정된다. 건축물의 고유주기는 Eq. (6)과 같이 철골, 콘크리트, 기타(그 외 구조물)로 분류되어 산정할 수 있으며, 건축물의 질량은 건축물의 면적 및 높이에 따라 상이하게 산정되기 때문에 본 연구에서는 소방방재청(NEMA, 2009)에서 지진취약도를 평가할 시 모델링된 건축물을 기초로 각각의 구조시스템별 층당 질량을 Table 3과 같이 산정하였다.

$$T_n = C_T h_n^{3/4} \quad (6)$$

여기서,  $C_T$ 는 각각의 구조시스템별 보정계수로써 0.085일 경우 철골, 0.073일 경우 철근콘크리트, 0.049일 경우 그 외 구조물을 의미하며,  $h_n$ 은 구조물의 높이를 의미한다.

**Table 3.** Approximated Mass of Structural Systems

Classification	Mass (kg) Per Story
Concrete	800
Masonry	670
Steel	620
Wood	220

건축물의 반응수정계수  $R$ 은 구조시스템의 초기 항복을 넘어 극한하중과 변위에 도달하기에 충분히 큰 변형상태에서의 구조물의 연성과 감쇠능력을 반영하는 계수로써 건축구조기준(Architectural Institute of Korea, 2016)에 각각의

구조물별로 제시되어 있다. 그러나 토석류에 의한 구조물의 응답을 평가하기 위해서는 보다 현실적인 반응수정계수의 값으로 평가될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 미국 연방재난관리청(FEMA, 1995)이 제시하고, 토석류 관련 선행연구 (Haugen and Kaynia, 2008; Choi, 2013)에서 적용된 바 있는 반응수정계수 2를 건축물의 동적변위를 추정하기 위한 값으로 적용하였다.

토석류의 밀도는 선행연구(Wang et al., 2018)에 의하면 토석류에 포함된 수분의 양에 따라 약 1,500 kg/m<sup>3</sup>~2,100 kg/m<sup>3</sup>의 범위를 가진다. 본 연구에서는 선행연구에서 분석된 토석류 밀도의 중앙값인 1,800 kg/m<sup>3</sup>를 적용하였다.

### 2.3 손상상태별 구조물 변위의 중앙값 및 대수표준편차

Eq. (3)을 통해서 산정된 건축물의 최대 수평변위만으로는 실제로 토석류로 인하여 건축물이 받는 영향이 어느 정도인지 파악하기 어렵다. 이를 파악하기 위해서는 토석류로 인한 건축물의 손상상태에 따른 수평변위의 통계치가 요구되지만, 국내외 토석류 관련 연구 중 건축물의 손상상태에 따른 수평변위의 통계치에 관한 연구가 부재한 상태이다. 이에 본 연구에서는 토석류의 충격하중과 유사하게 자연재해로 인한 건축물의 수평변위에 따른 손상 정도를 파악하기 위하여 국내외 수집 가능한 여러 문헌을 검토하였으며, 그 중 소방방재청(NEMA, 2009)에서 지진취약도를 평가할 시 적용한 건축물 손상상태에 따른 수평변위의 통계치(중앙값, 대수표준편차)를 이용하였다.

이 지진취약도 관련 연구(NEMA, 2009)에서 적용하고 있는 건축물은 구조의 재료, 형태, 높이 등을 고려하여 총 41종의 구조시스템(조적, 콘크리트, 철골, 목조 등)으로 분류되었으며, 이에 대하여 네 단계의 손상상태(Slight, Moderate, Extensive, Complete)에 따른 수평변위의 통계치를 제시하고 있다. 본 연구에서는 Table 4와 같이 국내 60% 이상의 비율로 가장 많이 분포된 조적(43.64%)과 콘크리트(19.09%)에 대한 건축물을 중심으로 손상상태에 따른 수평변위의 통계치를 분석하였다.

Table 5는 지진취약도 관련 연구(NEMA, 2009)에서 평가한 조적(URM)과 콘크리트(C1, C2, C3) 건축물에 대하여

**Table 4.** Distribution Ratio of Building Structure in South Korea (NEMA, 2009)

Classification	Ratio (%)
<b>Masonry</b>	<b>43.64</b>
<b>Concrete</b>	<b>19.09</b>
Steel	12.78
Steel Framed Reinforced Concrete	0.49
Wood	21.83
etc.	2.17

**Table 5.** Median Value and Log-standard Deviation of Building Displacement Used in Seismic Fragility Curves (NEMA, 2009)

Classification			Story	Median Value (mm) and Log-standard Deviation of Building Displacement Following Four Different Damage States			
				Slight	Moderate	Extensive	Complete
URM	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	1~2	12.0 (0.56)	24.0 (0.59)	40.0 (0.66)	60.0 (0.69)
	URMM		3+	18.0 (0.51)	36.0 (0.52)	60.0 (0.59)	90.0 (0.64)
C1	C1L1	Concrete Moment Frame	1~2	34.4 (0.71)	55.1 (0.72)	110.1 (0.77)	220.3 (0.81)
	C1L2		3~5	57.3 (0.66)	91.6 (0.71)	183.3 (0.75)	366.5 (0.80)
	C1M		6~15	121.1 (0.59)	193.8 (0.65)	387.5 (0.70)	775.0 (0.77)
	C1H		16+	148.1 (0.53)	237.0 (0.60)	473.9 (0.65)	947.8 (0.72)
C2	C2L1	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	1~2	8.7 (0.52)	17.5 (0.71)	116.4 (0.82)	232.8 (0.83)
	C2L2		3~5	15.0 (0.47)	30.0 (0.60)	200.0 (0.81)	400.0 (0.82)
	C2M		6~15	25.6 (0.54)	51.2 (0.64)	341.5 (0.80)	683.0 (0.83)
	C2H		16+	31.2 (0.54)	62.4 (0.51)	415.8 (0.81)	831.7 (0.82)
C3	C3L1	Concrete Shear Walls	1~2	9.8 (0.50)	19.5 (0.59)	39.0 (0.67)	78.0 (0.74)
	C3L2		3~5	19.5 (0.49)	39.0 (0.56)	78.0 (0.62)	156.0 (0.74)
	C3M		6~15	39.0 (0.52)	78.0 (0.52)	156.0 (0.62)	312.0 (0.70)
	C3H		16+	47.6 (0.53)	95.1 (0.49)	190.2 (0.56)	380.5 (0.69)

손상상태에 따른 구조물 변위의 중앙값 및 대수표준편차를 보인 것이다. Table 5에서 조적은 무보강 조적전단벽 (URM)으로 구성된 건축물을 의미하며, 콘크리트는 콘크리트 모멘트 골조(C1), 무보강 조적채움벽이 있는 콘크리트 모멘트골조(C2), 콘크리트 전단벽(C3)으로 구성된 건축물을 의미한다.

Table 5에 제시된 건축물에 대한 손상상태에 따른 건축물 변위의 중앙값 및 대수표준편차 값은 Eq. (3)의 토석류에 의한 건축물의 최대 수평변위의 손상 정도를 파악할 시 이용되었다.

#### 2.4 평균손상확률 형태의 취약성 곡선 평가방안

Eq. (3)의 토석류로 인한 건축물의 최대 수평변위와 Table 5의 손상상태에 따른 건축물 변위의 통계치를 이용하여 도출된 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선은 각각의 손상상태(Slight, Moderate, Extensive, Complete)에 따라 도출된다. 초과손상확률 형태의 취약성 곡선은 토석류에 대하여 손상상태에 따른 건축물의 손상확률을 확인할 수 있으나, 실제 토석류에 의한 각각의 손상상태에 따른 건축물 피해 데이터가 많지 않아 과거 피해 데이터와 비교 및 검증하기가 용이하지 않으며, 재해로 인한 평균적인 손실을 평가할 시 적용하기 쉽지 않다(Choi, 2013).

본 연구에서는 토석류에 대한 건축물의 평균 손실 및 리스크 평가에 적용할 수 있는 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 앞서 기술한 방법론에 의한 손상상태별 초과손상확률 형태의 취약성의 차를 계산하여 손상상태별 발생확률을 계산하고, Table 6의 손상상태별 평균 손상률(Mean Damage

Ratio)과 곱한 후 그 값들의 합을 계산하여 Fig. 1과 같이 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 평가하였다. Table 6은

**Table 6.** Mean Damage Ratios to Convert to Vulnerability Curve from Fragility Curve

Damage State	Mean Damage Ratio	Definition
Complete	1.0	- Partly or totally destroyed - Evacuation necessary - Complete reconstruction
Extensive	0.8	- Partly destroyed - Loss of parts of external and internal walls - Failure of building openings - Evacuation necessary - Reconstruction of destroyed parts
Moderate	0.5	- Affected by structural stability - Cracks in the external walls - Partial failure of building openings - Infiltration of mud-water mixture or water - Damage to internal contents of the building
Slight	0.1	- Not affected by structure stability - Abrasion of the external walls - Partial crack of building windows - Infiltration of fine mud-water mixture or water - Damage to some internal contents of the building
None	0.0	- No damage

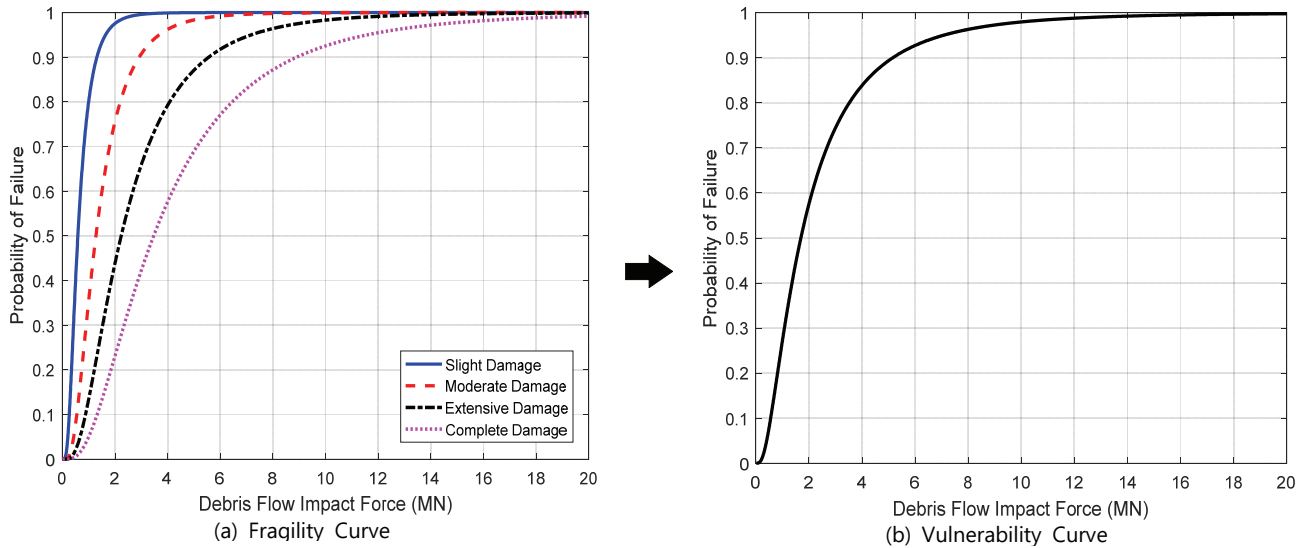


Fig. 1. Assessment Process for Converting the Vulnerability Curve at the Fragility Curves

평균손상확률 형태의 취약성 평가에 적용된 손상상태 (Slight, Moderate, Extensive, Complete)에 따른 평균 손상률과 손상의 정도를 보인다.

## 2.5 토석류 취약성 곡선 데이터베이스 구축방안

2.4절에서 제시한 방법론에 따라 평가된 평균손상확률 형태의 취약성 곡선은 토석류 하중 0 MN~20 MN 범위의 간격으로 이산함수(Discrete Function)의 형태를 보이며, 향후 발생할 수 있는 임의의 토석류 하중으로 인한 건축물의 손실편가에 적용하기 위해서는 이산함수 형태의 취약성 곡선을 연속함수의 형태로 변환할 필요가 있다. 일반적으로 자연재해에 대한 구조물의 취약성 곡선은 로그정규 누적분포함수를 이용하여 2개의 모수로 데이터베이스화될 수 있다 (Yun et al., 2015). 또한, 2.3절에서 이용된 소방방재청 (NEMA, 2009)에서 지진취약도를 평가할 시 적용된 건축물 손상상태에 따른 수평변위의 통계치(중앙값, 대수표준편차)는 로그정규분포에 대한 통계치이기 때문에 본 연구에서 평가된 평균손상확률 형태의 취약성 곡선이 로그정규 누적분포함수의 형태를 보인다.

이에 본 연구에서는 임의의 토석류 하중에 대한 건축물의 손상확률을 평가하기 위하여 Eq. (7)과 같이 로그정규 누적분포함수의 형태로 곡선 맞춤하였으며, 해당 분포의 모수 형태로 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선을 데이터베이스화하였다. 로그정규 누적분포함수의 함수로 곡선 맞춤하는 방법으로는 Eq. (8)의 최소자승법(Least Square Method)이 이용되었다(Baker, 2015).

$$F_r(x) = \Phi \left[ \frac{\ln(x) - m_R}{\xi_R} \right] \quad (7)$$

$$\widehat{m}_R, \widehat{\xi}_R = \min \sum_{x=1}^n [P_f(x) - F_r(x)]^2 \quad (8)$$

여기서,  $F_r(x)$ 는 최소자승법으로 곡선 맞춤된 토석류 하중에 대한 연속함수 형태의 취약성 곡선,  $x$ 는 토석류 하중(MN),  $m_R, \xi_R$ 은 로그정규분포의 모수를 각각 의미한다. 또한,  $P_f(x)$ 는 2.4절에서 제시한 방법론에 따라 평가된 토석류에 대한 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 의미한다.

## 3. 토석류 취약성 곡선 평가결과 및 검증

본 장에서는 2장에서 전술된 평가 방법론에 따라 평가된 각각의 건축물(URM, C1, C2, C3)에 대한 평균손상확률 형태의 취약성 곡선 평가결과를 보인다. 또한, 이들 취약성 곡선의 타당성을 검증하기 위하여 과거 토석류 피해 데이터와의 비교 결과를 보인다.

### 3.1 토석류에 대한 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선 평가결과

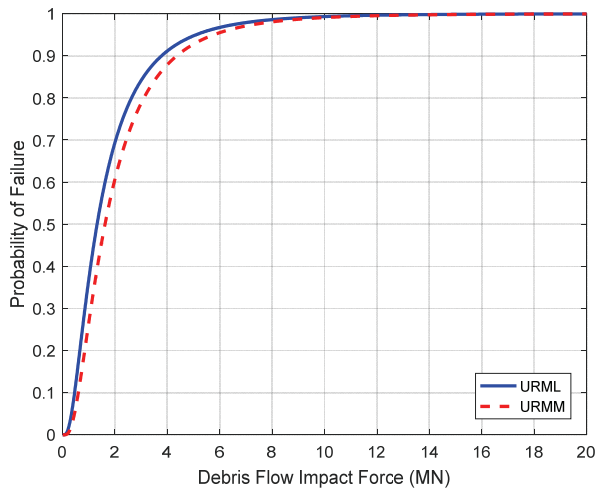
Table 7은 2장에서 전술된 평가 방법론에 따라 Eq. (8)의 최소자승법을 통해 로그정규 누적분포함수의 모수로 구축한 결과이다. 또한, Figs. 2~5는 Table 7의 로그정규 누적분포함수의 모수를 통하여 토석류에 대한 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 도출한 결과를 정리한 것이다. 각각의 건축물에 대한 토석류 취약성 곡선의 평가결과와 다음과 같다.

#### 3.1.1 조적 건축물의 취약성 곡선

Fig. 2는 토석류에 대한 무보강 조적전단벽(URM)으로

**Table 7.** Parameters of Log-Normal Cumulative Distribution Function for Building Vulnerability Curves Subjected to Debris-Flow

Classification	Story	Parameters of Log-normal Cumulative Distribution Function		
		$m_R$	$\xi_R$	
URM	URML	1~2	0.277	0.822
	URMM	3+	0.485	0.772
C1	C1L1	1~2	1.513	1.051
	C1L2	3~5	1.683	1.038
	C1M	6~15	1.947	0.957
	C1H	16+	1.947	0.957
C2	C2L1	1~2	0.921	1.726
	C2L2	3~5	1.100	1.780
	C2M	6~15	1.100	1.780
	C2H	16+	1.100	1.780
C3	C3L1	1~2	0.698	0.990
	C3L2	3~5	1.057	0.927
	C3M	6~15	1.264	0.928
	C3H	16+	1.264	0.928

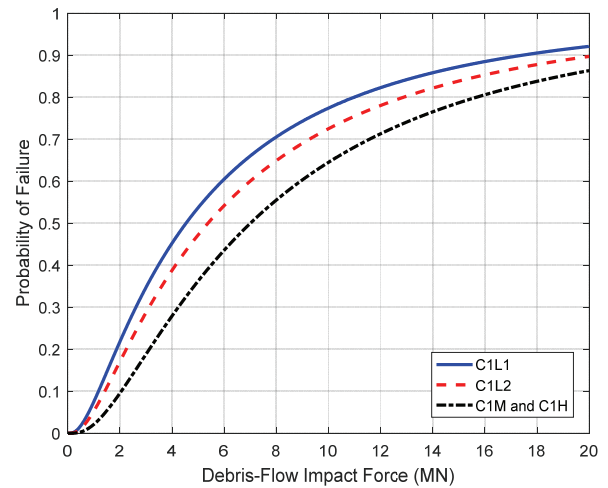


**Fig. 2.** Building Vulnerability Curves of Unreinforced Masonry Bearing Walls (URML and URMM)

구성된 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 토석류 하중이 2 MN일 경우 2층 이하인 URML 건축물은 약 69%, 3층 이상인 URMM 건축물은 약 61%의 손상확률을 보인다. 반면, 토석류 하중이 6 MN일 경우 URML 건축물은 약 97%, URMM 건축물은 96%로 유사한 손상확률을 보인다. 이를 통하여 무보강 조적전단벽(URM)으로 구성된 건축물은 토석류 하중이 6 MN 이하일 경우 URML이 URMM보다 취약한 것을 확인할 수 있으며, 토석류 하중이 6 MN 이상일 경우에는 층수 관계없이 손상확률이 유사해짐을 확인할 수 있다.

### 3.1.2 콘크리트 건축물의 취약성 곡선

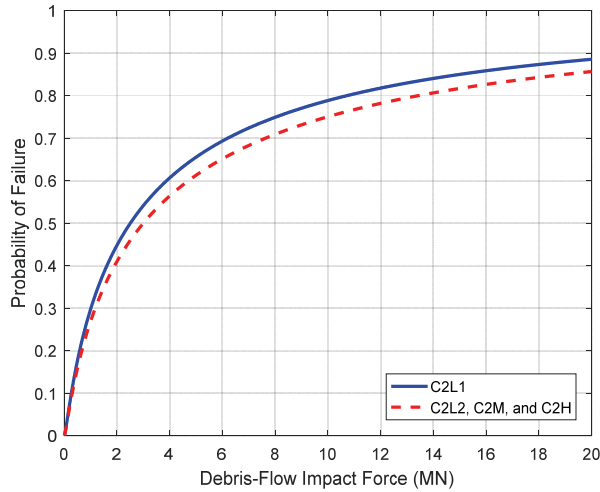
Fig. 3은 토석류에 대한 콘크리트 모멘트골조(C1)로 구성된 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 3과 같이 토석류 하중이 2 MN일 경우 C1L1, C1L2, C1M과 C1H 순으로 층수가 높아짐에 따라 약 22%, 17%, 10%의 손상확률을 보임에 따라 건축물이 저층일수록 토석류에 대하여 취약한 것을 확인할 수 있다. 그뿐만 아니라 토석류 하중이 6 MN일 경우 약 60%, 54%, 43%로 하중의 증가와 함께 손상확률이 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.



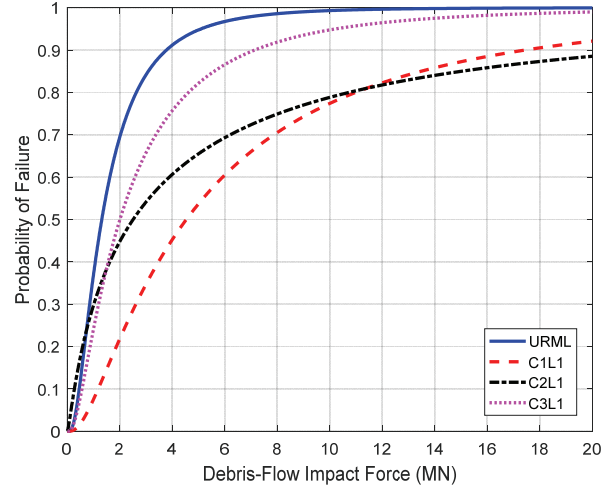
**Fig. 3.** Building Vulnerability Curves of Concrete Moment Frame (C1L1, C1L2, C1M, and C1H)

Fig. 4는 토석류에 대한 무보강 조적 채움벽이 있는 콘크리트 모멘트골조(C2)로 구성된 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 나타낸 것이다. 토석류 하중이 1 MN 이하일 경우 2층 이하인 C2L1 건축물과 3층 이상인 C2L2, C2M, C2H 건축물은 거의 동일한 손상확률을 보인다. 반면, 토석류 하중이 2 MN 이상일 경우 C2L1 건축물은 약 69%, C2L2, C2M, C2H 건축물은 약 65%의 손상확률을 보인다. 이를 통하여 무보강 조적채움벽이 있는 콘크리트 모멘트골조(C2)로 구성된 건축물의 경우 토석류 하중이 증가할수록 2층 이하와 3층 이상의 건축물에 대한 손상확률이 상이해지는 것을 확인할 수 있다.

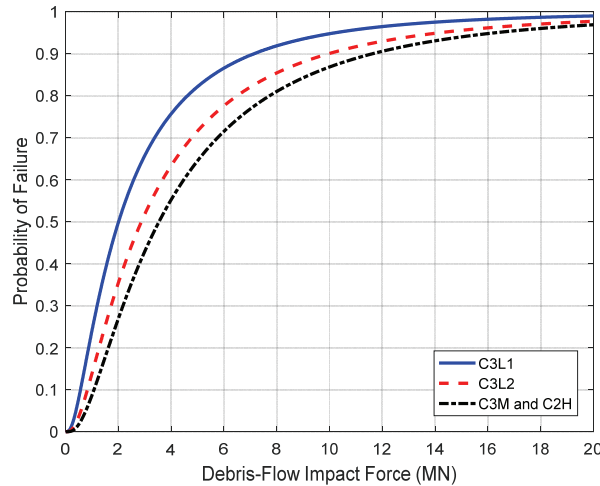
Fig. 5는 토석류에 대한 콘크리트 전단벽(C3)으로 구성된 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 5와 같이 토석류 하중이 2 MN일 경우 C3L1, C3L2, C3M과 C3H 순으로 층수가 높아짐에 따라 약 50%, 35%, 30%의 손상확률을 보임에 따라 콘크리트 모멘트골조(C1)로 구성된 건축물의 취약성 곡선과 유사하게 건축물이 저층일수록 토석류에 대하여 취약한 것을 확인할 수 있다. 또한, 토석류 하중이 6 MN일 경우 약 87%, 78%, 72%의 손상확률을 보이며, 토석류 하중 12 MN 이상부터는 손상확률이



**Fig. 4.** Building Vulnerability Curves of Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls (C2L1, C2L2, C2M, and C2H)



**Fig. 6.** Comparison of Vulnerability Curves for Different Types of Building Structures



**Fig. 5.** Building Vulnerability Curves of Concrete Shear Walls (C3L1, C3L2, C3M, and C3H)

90% 이상으로 유사한 것을 확인할 수 있다.

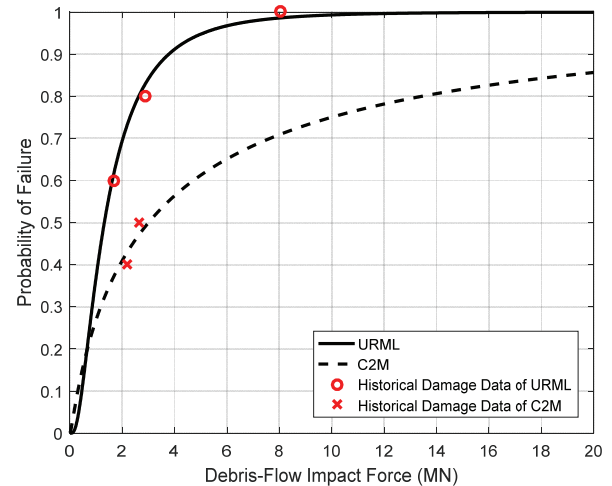
### 3.2 건축물 구조별 취약성 곡선 비교 결과

본 연구에서는 Figs. 2-5의 건축물 구조 재료에 따른 토석류 취약성을 비교하기 위하여 Fig. 6과 같이 건축물 구조별 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 같이 나타내었다. 건축물은 각각의 구조별로 저층에 해당되는 URML, C1L1, C2L1, C3L1을 대표적으로 선정하여 비교하였다.

Fig 6에 보이는 바와 같이 토석류 하중 4MN일 경우 URML, C3L1, C2L1, C1L1 순으로 약 91%, 76%, 61%, 45%의 손상확률을 보인다. 이러한 결과는 Eq. (4)와 Eq. (5)에서 제시된 바와 같이 각각의 건축물의 재료적 특성 및 구조시스템, 그리고 Eq. (2)에서 산정된 건축물의 최대 수평변위에 따라 손상 정도의 차이에 기인하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선 검증

본 연구에서는 평가된 토석류에 대한 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선을 Fig. 7과 Table 8과 같이 평균 제공근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 평가하여 과거 토석류 피해 데이터와의 적합성 및 타당성을 검증하였다. 과거 토석류 피해자료는 2011년 국지성 집중호우로 인하여 피해가 심각했던 서울 우면산과 춘천 신복읍 인근 야산에서 발생한 산사태 피해 데이터를 이용하였다(Choi, 2013; Kang, 2016).



**Fig. 7.** Validation of Building Vulnerability Curves with Historical Damage Data

서울 우면산 및 춘천 신복읍 인근 야산의 산사태로 인하여 토석류 피해가 심각했던 무보강 조적전단벽(URML)과 무보강 조적채움벽이 있는 콘크리트 모멘트골조(C2M)로 구성된 건축물은 Fig. 7과 같이 ‘○’, ‘×’의 붉은색 심별로 각각 표시하였다. Fig. 7로부터 피해를 발생시킨 토석류



**Table 8.** Comparison of the Probability of Failure of Building Vulnerability Curve and Historical Damage Data

Classification	Vulnerability Curve Assessed in This Study		Historical Damage Data (Choi, 2013; Kang, 2016)		RMSE (%)
	Debris-Flow Impact Force (MN)	Probability of Failure	Debris-Flow Impact Force (MN)	Damage Ratio	
URML	1.67	0.61	1.67	0.60	0.19
	2.90	0.83	2.90	0.80	
	8.00	0.99	8.00	1.00	
C2M	2.19	0.43	2.19	0.40	0.30
	2.67	0.47	2.67	0.50	

하중에 대하여 본 연구에서 평가한 토석류에 대한 건축물의 손상확률과 피해자료의 손상치가 유사한 것을 파악할 수 있다. 또한, Table 8로부터 동일한 토석류 하중에 대하여 해당 건축물에 대한 과거 피해 데이터와 본 연구의 손상 추정치가 약 1%~3%의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 평균 제공근 오차는 무보강 조적 전단벽(URML)은 약 0.19%, 콘크리트 모멘트골조(C2M)은 약 0.30%의 차이를 보임에 따라 본 연구에서 평가된 건축물의 취약성 곡선이 향후 토석류 손실추정을 위해 사용되기 적합하다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 집중호우 등에 의한 산사면 붕괴로 발생하는 토석류에 대하여 평균손상확률 형태의 건축물 취약성 곡선을 초과손상확률 형태의 취약성 곡선에 기초하여 개발하는 방법을 제시하고, 조적과 콘크리트 건축물을 중심으로 취약성 곡선을 개발하고 과거 피해자료와 비교하여 검증한 후 향후 손실평가에 적용할 수 있도록 데이터베이스화하였다.

본 연구에서는 신뢰도 지수 기반의 해석적 접근법인 FOSM 방법을 기초하여 토석류로 발생하는 건축물의 최대 수평변위와 건축물의 손상상태별 변위의 통계치를 평가하여 건축물의 초과손상확률 형태의 취약성 곡선을 도출하는 방법을 적용하였다. 또한, 손상상태별 초과손상확률의 취약성 곡선으로부터 손상상태별 발생확률을 계산하고, 각 손상상태에 대한 평균 손실률과 곱한 후 평균손상확률 형태의 건축물 취약성 곡선을 평가하는 방법을 제시하였다.

평가된 토석류에 대한 조적과 콘크리트 건축물의 평균손상확률 형태의 취약성 곡선은 해당 건축물의 구조 재료, 형태, 높이 등에 따라 상이한 손상확률을 보이며, 평균 제공근 오차 평가를 통하여 과거 피해 데이터와 매우 유사한 양상 및 손상확률을 보임을 확인하였다.

본 연구에서 평가된 토석류에 대한 건축물의 취약성 곡선은 로그정규분포의 형태로 곡선 맞춤 후 모수를 데이터베이스화되었으며, 향후 발생할 수 있는 토사재해에 대한 건축물

의 정량적인 위험도(Risk) 및 손실(Loss)을 분석할 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Architectural Institute of Korea. (2016). *2016 Korean building code and commentary*. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- Baker, J.W. (2015). Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No. 1, pp. 579-599.
- Choi, W.I. (2013). *A study on development of vulnerability functions based on characteristics of debris flow and structure in Korea*. Ph.D. dissertation, University of Seoul.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1995). *Engineering principles and practices for retrofitting flood prone residential buildings*. FEMA P-259.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2010). *Multi-hazard loss estimation methodology: Technical manual*.
- Haugen, E.D., and Kaynia, A.M. (2008). Vulnerability of structures impacted by debris flow. In Z. Chen, J. Zhang, Z. Li, F. Wu, and K. Ho (Eds.), *Landslides and engineered slopes* (pp. 381-387). CRC Press.
- Kang, H.S. (2016). *Physical vulnerability assessment of buildings considering rheological properties of debris flow and rainfall return period*. Ph.D. dissertation, Pukyong National University.
- Kim, K.N., Kim, S.W., Jang, S.J., Lee, K.Y., Seo, G.B.,

- and Kim, B.S. (2015). Development of criteria for zoning of debris flow hazard area (II). *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 197-203.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2009). *Development of seismic fragility functions for building structure in Korea.*
- Pregnoiato, M., Galasso, C., and Parisi, F. (2015). *A compendium of existing vulnerability and fragility relationships for flood: Preliminary results. Proceedings of 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP 2012, Vancouver, Canada.*
- Schultz, M.T., Gouldby, B.P., Simm, J.D., and Wibowo, J.L. (2010). *Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability.* ERDC SR-10-1, U.S. Army Corps of Engineers.
- Seoul Metropolitan Government. (2014). *Additional causes and supplemental investigation of the Mt. Umyeon landslide.*
- Wang, B., Li, Y., Liu, D., and Liu, J. (2018). Debris flow density determined by grain composition. *Landslides*, Vol. 15, No. 6, pp. 1205-1213.
- Yun, W.S., Ham, H.J., Kim, H.J., and Lee, S. (2015). Evaluation of extreme wind fragility of balcony window systems in apartments. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 31, No. 4, pp. 3-11.

---

<b>Received</b>	August 11, 2020
<b>Revised</b>	August 12, 2020
<b>Accepted</b>	August 21, 2020