

가용자료가 제한된 경우 화산재 피해 예측을 위한 손상함수 구축

유순영¹ · 윤성민^{2,*} · 강주화³ · 최미란¹

¹국가수리과학연구소 계산수학연구부, 305-811, 대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 70

²부산대학교 경제학부, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

³부산대학교 사회급변현상연구소, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Building Damage Functions Using Limited Available Data for Volcanic Ash Loss Estimation

Soonyoung Yu¹, Seong-Min Yoon^{2,*}, Zhuhua Jiang³, and Miran Choi¹

¹Division of Computational Sciences in Mathematics, National Institute of Mathematical Sciences, Deajeon 305-811, Korea

²Department of Economics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³Research Institute for Social Criticality, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: Catastrophe risk models require the damage functions of each vulnerable item in inventory to estimate volcanic ash losses. The damage functions are used to represent the relation between damage factors and damage and also widely used in engineering and natural hazard studies to calculate the vulnerability. In most cases, damage functions are constructed as fragility or vulnerability curves, and researchers are confused by the similarities between them particularly when they perform interdisciplinary research. Thus, we aim to explain the similarities and differences between fragility and vulnerability curves and their relationship by providing case studies to construct them. In addition, we suggest a simple method to construct the damage functions between damage ratio and volcanic ash thickness using limited damage data. This study comes from the fact that damage functions are generally constructed using damage data. However, there is no available volcanic ash damage data in Korea, and not even enough volcanic disaster data to construct damage functions in the world, compared to other hazards. Using the method suggested in the study and the limited damage data from Japan and New Zealand, we construct Weibull-type functions or linear functions dependent of available data to calculate volcanic ash loss estimation, which we think need to be corrected to make it more suitable for inventory characteristics and environmental conditions in Korea.

Keywords: catastrophe risk model, damage function, vulnerability curve, volcanic ash

요약: 재난 리스크 모델을 활용하여 화산재 손실을 평가하기 위해서는 목적물별 손상함수가 정의되어야 한다. 손상함수란 목적물의 재해취약도를 정량화한 함수로, 공학 및 자연재해 연구 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 손상도, 취약성 곡선 등으로 연구되고 있는데, 학제간 연구를 수행하는 과정에서 혼란을 주기도 한다. 이에 본 연구는 손상함수의 유형을 정리하고, 손상함수를 구축한 사례를 소개하고자 한다. 손상함수는 일반적으로 과거 피해사례를 기반으로 구축된다. 국내에 화산재 피해사례가 없음을 고려할 때, 남한지역의 화산재 손상함수를 구축하기 위해서는 해외사례를 참고하여야 할 것이다. 한편 국외에서도 화산재에 대한 손상함수 연구는 다른 재난에 비해 적는데, 화산 피해사례도 적은

*Corresponding author: smyoon@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2557

Fax: +82-51-581-3143

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

편이다. 이에 본 연구는 극소수 피해자료를 활용하여 손상합수를 구축할 수 있는 방안을 제시하고, 뉴질랜드와 일본에서 보고된 실제 피해사례를 바탕으로 와이블함수 혹은 선형함수의 취약성 곡선을 구축하였다. 본 연구가 해외사례를 기반으로 손상합수를 구축하였음을 고려할 때, 본 연구에서 제시하는 손상합수를 이용하여 남한지역의 화산재 손실을 평가하기 위해서는 국내 목적물 특성 및 환경 조건에 맞게 손상합수를 보정할 필요가 있다.

주요어: 재난 리스크 모델, 손상합수, 취약성곡선, 화산재

서론

전 세계적으로 백두산 화산 폭발에 대한 관심이 높아지고 있다. 화산 폭발이 임박해지고 있음을 알리는 증후들이 관찰되고 있고(Yun and Lee, 2012), 2010년 아이슬란드의 에이야프랄라요쿨(Eyjafjallajökull) 화산 폭발을 통해 대규모 화산 폭발이 막대한 지구촌 문제를 야기할 수 있음을 경험했기 때문이다. 분화 역사를 볼 때(Yun and Cui, 1996), 백두산 화산 폭발은 아이슬란드 화산 폭발보다 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다.

화산 폭발은 용암류(lava flows), 화산이류(lahars), 화쇄류(pyroclastic flow), 테프라(tephra) 등 다양한 형태의 재난을 야기한다(USGS, 2009). 테프라 가운데 직경이 2 mm 이하인 입자를 화산재(volcanic ash)라고 부르는데, 화산재는 대기흐름장의 상태에 따라 화산으로부터 수백에서 수천 km 떨어진 곳까지 이동하여 피해를 입힐 수 있다(Langmann, 2013; Lee and Yun, 2011). 이로 미루어 보아, 백두산이 분화하

면 남한지역은 특히 화산재로 인한 직접피해를 입게 될 것으로 보인다. Lee et al. (2012)에 따르면, 백두산 분화로 인해 한반도에 유입되는 강하화산재의 크기는 대부분 0.05 mm 이하일 것으로 예상되는데, 이에 백두산 화산 폭발 시나리오를 기반으로 0.05 mm 이하의 화산재가 남한지역에 미치는 경제적 영향을 평가하고, 대응책 마련에 활용할 필요가 있다. 화산재에 의한 피해는 주로 인체 피해 및 토양 오염 등에서 두드러질 것으로 보이며, 산업분야의 경우 농림축산 분야 및 정밀기계분야에서 두드러질 것으로 보인다(Table 1). 이외에도 화산재 세척 비용이 많이 요구될 것으로 보이는데, 이는 국내 황사 피해 유형과 매우 유사하다(KIGAM, 2009).

화산재에 의한 경제적 영향을 평가하기 위해 재난 손실을 평가하는데 널리 사용되는 재난 리스크 모델링 기술을 활용할 수 있다. 재난 리스크 모델은 재난 강도(예, 화산재 두께)에 대한 피해목적물의 손상비율을 설명하는 손상합수를 필요로 하는데, 대개 과거 피해 자료를 바탕으로 구축된다. 그러나 국내에 화산

Table 1. Impacts of ash fall (after GNS Science, 2012)

Ash thickness	Home	Industry	Infrastructure	Health and environment
Less than 1 mm	Minor damage to vehicles, houses and equipment by fine abrasive ash.	Potential damage to aircraft.	Dust affects road visibility and traction.	Irritant to lungs and eyes. Contamination of water supplies
1-5 mm	Minor damage to houses if fine ash enters buildings.	Possible crop damage. Some livestock affected. Damage to electrical equipment and machinery.	Electricity cut. Water supplies cut due to failure of electricity to pumps. Sewage systems blocked by ash, or disrupted by loss of electrical supplies.	Contamination of water supplies by chemical leachates
5-100 mm	Weaker roof structures may collapse at 100 mm ash thickness, particularly if the ash is wet. Cars may stop.	Most pastures killed by over 50 mm of ash.	Road transport halted due to the build up of ash on roads. Rail transport forced to stop due to signal failure.	Burial of pasture and low plants.
100-300 mm	Buildings will run the risk of roof collapse.		Loss of electrical reticulation.	Severe damage to trees.
>300 mm	Major collapse of roofs due to ash loading.	Livestock and other animals killed or heavily distressed.	Loading and possible breakage of power and telephone lines. Roads unusable.	Heavy kill of vegetation. Complete burial of soil horizon. Kill of aquatic life.

재 피해사례가 없고, 국외의 경우에도 보고된 화산재해 피해사례가 많지 않음을 고려할 때, 화산재의 손상합수를 구축하는 것은 쉽지 않을 것으로 판단된다. 이에 본 논문은 화산재로 인한 손상합수를 구축한 해외사례를 소개하고, 손상합수를 구축하는데 활용할 수 있는 해외 화산재 피해사례를 소개하고자 한다. 또한 이들 소수의 자료를 이용하여 손상합수를 구축하는 방법을 소개하고, 구축 결과를 보이고자 한다.

이론적 배경

재난 리스크 모델

재난 리스크 모델이란 GIS와 컴퓨터 기반의 재난 손실 평가 소프트웨어로, EQECAT, AirWorldwide, RMS와 같은 영리기관의 모형과 Hazus-MH, FPHLM, RiskScape, CAPRA, PCRAFI 등의 비영리 모형이 있다(Table 2). 그러나 이들 중 화산재해를 다루는 모형은 RiskScape와 CAPRA 두 가지이고, 화산재해에 대한 목적물(inventory)의 취약도(vulnerability) 정보를 활용하여 손실(loss)까지 평가할 수 있는 모형을 고려한다면 RiskScape뿐이다. 즉, 지진, 홍수, 태풍 등으로 인한 손실을 평가한 연구는 많으나, 화산재해로 인한 손실을 평가하는 연구는 상대적으로 적은 편인데, 이는 화산 폭발 가능성이 높은 지역에는 사람이 거주하지 않고 그 때문에 직접피해 사례가 많

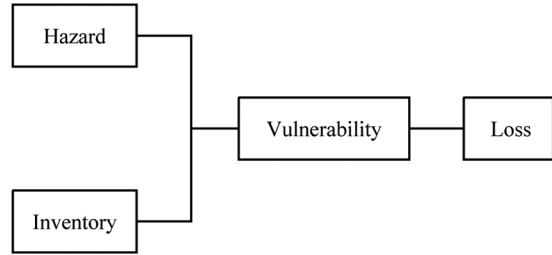


Fig. 1. Structure of catastrophe risk models.

지 않기 때문으로 보인다.

재난 리스크 모델의 기본 구조는 Fig. 1과 같다. 재난 리스크 모델은 재난(hazard)의 강도(intensity)와 빈도를 분석하고, 목적물의 데이터베이스를 구축한 후, 재난에 대한 각 목적물의 취약도 정보를 바탕으로 손실을 평가한다. 즉 화산재해의 영향 범위 및 영향 강도가 평가되고, 이로 인한 목적물의 취약도 정보가 구축된다면 현재 개발된 재난 리스크 모형을 활용하여 화산재해로 인한 손실을 평가할 수 있다. 실제 Table 2의 Hazus-MH의 경우, 기존의 홍수 또는 지진 모형을 활용하여 화산재해로 인한 노출 규모를 개략적으로 평가하는데 사용된 바 있다(DOGAMI, 2012). 이는 백두산 화산 폭발로 인한 남한지역의 손실을 평가하는데도 재난 리스크 모델이 사용될 수 있음을 시사한다.

그러나 재난 리스크 모델을 이용하여 화산재해로

Table 2. Catastrophe risk models and hazards

AIR Worldwide	EQECAT	RMS	HASUZ-MH	RiskScape
Earthquakes	Earthquakes	Earthquakes	Earthquakes	Earthquakes
Extratropical cyclones (winter storms)	Winter storm, Windstorm	Winter storm, Windstorm		
Flood	Flood	Flood	Flood, Storm surge	Flood, Storm surge, Tsunami
Multiple Peril Crop Insurance				
Severe thunderstorm (tornado, hail, straight-line wind)	Tornado, Hail	Severe convective storm		
Tropical cyclones (hurricanes, typhoons)	Tropical cyclones (Hurricane, Typhoon)	Tropical cyclone (Hurricane, Typhoon, Cyclones)	Hurricanes	Wind
Wildfire	Wildfire			
	Offshore energy			
		Longevity & Mortality		
Pandemic influenza		Pandemic		
Terrorism	Terrorism	Terrorism		
				Landslide
				Volcanic ashfall

인한 손실을 평가하기 위해서는 재난에 대한 목적물의 취약도 평가가 선행되어야 하는데, 전술한 바와 같이 화산재해로 인한 취약성 연구는 많지 않다. 이에 본 논문은 취약성 평가기법을 설명하고, 기존 연구사례를 소개한 후, 백두산 화산 폭발로 인한 한반도 손실 평가를 위한 취약성 평가방법을 고찰해보고자 한다. 한편 취약성이란 재난 강도 이외에도 목적물의 피해 특성에 따라 달라지며, 이에 목적물을 피해 유형에 따라 분류하는 것도 재난 리스크를 모델링하는 중요한 과정이나, 본 연구에서는 고려하지 않기로 한다.

취약성 평가방법

목적물의 재해 취약도는 지수(index) 또는 손상함수(damage functions) 형태로 표현될 수 있다. 지수 형태의 취약성 평가방법 중 가장 대표적인 것이 Cutter et al. (2003)에 의해 개발된 사회취약성지수(social vulnerability index, SoVI)인데, 세인트빈센트(St. Vincent) 섬의 화산재해 취약성 분석에 사용된 바 있다(Lowe, 2010). 그러나 지수 형태의 취약성 분석 결과는 지역 간의 취약도를 비교하고 취약도의 시계열 변화 양상을 평가하는 데는 사용될 수 있으나, 리스크 관리에 있어 실제 필요로 되는 손실량을 계산하는 데는 활용될 수 없다. 이는 취약도 지수의 절대적 숫자 그 자체는 특별한 의미를 가지지 못하기 때문이다.

한편 확률론적 안정성 평가(probability safety assessment, PSA)는 재해 규모(magnitude)와 특정 규모의 재해가 발생할 확률 정보를 이용하여 리스크를 평가하고, 예상되는 총 손실량으로 총 리스크를 계산하는 방법으로, 재난 강도(intensity)에 따른 목적물의 취약도를 취약성(vulnerability), 손상도(fragility), 손상곡선(damage curves), 손상상태곡선(damage state curves) 등의 곡선을 활용하여 다룬다. 이들 취약도 곡선은 연구 분야 또는 사용자마다 조금씩 다르게 정의되고 사용되어 혼동을 주기도 하는데, 이들 곡선을 비교 정리하면 아래와 같다.

PSA 과정을 통해 리스크를 평가하기 위해서는 먼저 목적물이 본 기능을 수행하지 못하는 상태(limit state, LS)를 정의하고(Wen et al., 2004), 목적물이 LS 상태에 놓일 확률 P[LS]을 계산한다. LS는 목적물의 특성에 따라 경미한 손상, 완전파괴 등 다양하게 정의될 수 있다.

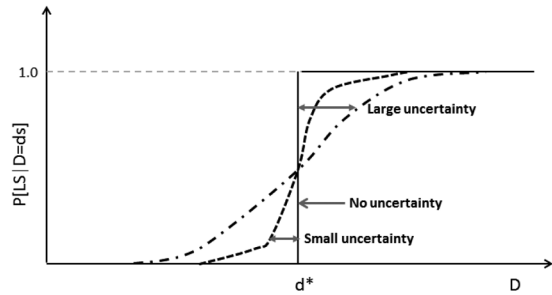


Fig. 2. Fragility curve and capacity uncertainty.

$$P[LS] = \sum_{s=0}^{\infty} P[LS|D=d_s]P[D=d_s] \tag{1}$$

여기서 D 는 요구 파라미터(engineering demand parameter, EDP)로, 목적물이 재난에 반응하는 정도를 측정하기 위한 매개변수이다. 직접적으로 관측되는 EDP(direct EDP)와 관측된 자료를 가공하여 얻게 되는 EDP(processed EDP)로 크게 나뉘는데, 특히 손상지수(damage index)와 같은 processed EDP가 LS 를 정의하는데 활용될 수 있다(Whittaker et al., 2004). EDP 개념은 지진학에서 널리 사용되는 개념으로, 본 논문에서는 이를 일반화하여 재난 강도를 의미하는 확률변수(random variable)로 본다. 즉 $P[D=d_s]$ 는 특정 강도 d_s 의 재난이 발생할 확률이다. 지진의 경우, 상보(complementary) 누적분포, $P[D>d_s]$ 를 사용하기도 한다. 식 (1)에서 $P[LS|D=d_s]$ 는 특정 강도 d_s 에서의 확률로, 손상도(fragility, F_s)로 불리며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = P[LS|D=d_s] \tag{2}$$

식 (2)의 손상도함수는 목적물이 재난 강도 D 에도 불구하고 LS 상태에 도달하지 않고 버틸 수 있는 역량(capacity, resistance)과 그 역량의 불확실성으로 이루어진 함수로, Fig. 2와 같이, 역량(capacity)은 곡선의 중심 위치(d^*)를, 이 역량의 불확실성은 곡선의 형태(분산)를 각각 좌우한다.

손상도함수를 알면 식 (1)과 같이 LS 확률을 계산할 수 있는데, 목적물의 LS 진단 변수를 X 라고 하고, 시간 $(0, t)$ 구간에서 재난 강도의 확률밀도함수를 f_D 라고 하면, 식 (1)은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ 는 m 개 변수로 구성된 벡터이다.

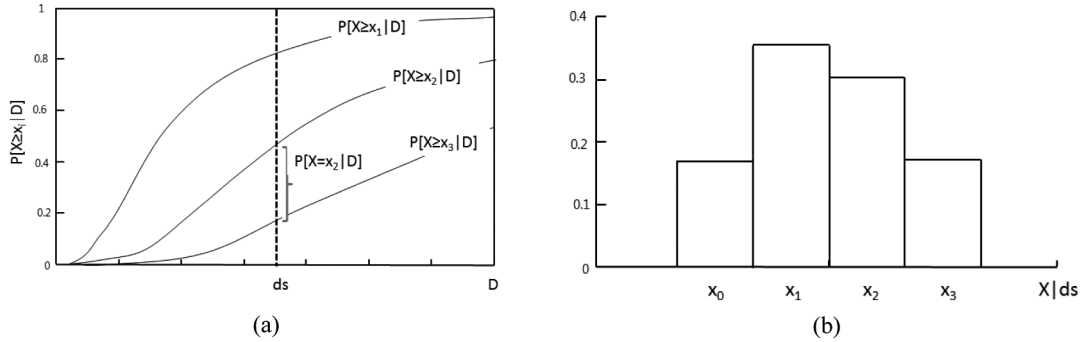


Fig. 3. (a) Fragility curves with three damage states, (b) DPM for intensity (modified after Rossetto et al., 2013).

$$P_i[X \geq x_i] = \int_0^\infty P[X \geq x_i | D = d_s] f_D(r) dr \quad (3)$$

식 (3)은 X 가 문턱값(threshold), x_i 를 초과할 경우를 LS 로 정의하고 있다. 이 때 문턱값을 변화시키면(예, 10, 50, 100% 손상 등) 다양한 LS 가 정의되는데, Fig. 3a는 세 가지 LS (x_1, x_2, x_3)에 대한 각각의 손상도 곡선을 보여준다. 식 (3)에서

$$F_s = P[X \geq x_i | D = d_s] \quad (4)$$

로, 식(2)의 손상도함수를 재난 강도(D)에서 손상상태(X)가 특정 손상 상태(x_i)를 초과할 확률로 표현하고 있다.

Fig. 3과 같이 LS ($X > x_i$)는 손상상태(damage state)로도 불리는데, 목적물의 손상상태를 구분하는 데는 전문가의 판단이 크게 요구된다. 예를 들면, 미국은 지진으로 인한 구조물의 손상 정도를 “피해 없음(none), 경미한 손상(slight), 반파(moderate), 심각한

손상(extensive), 완전파괴(complete)”의 5등급으로 나누고 있고, 목적물의 특성(예, 건축자재)에 따라 손상상태를 평가하는 X 도 달라진다(FEMA, 2003; Shinozuka et al., 2001). 또한 Vickery et al. (2006)는 허리케인으로 인한 지붕, 창문, 벽체의 손상 정도에 따라 유사한 방법으로 손상상태를 구별하고 있는데, 목적물에 따라 등급 개수는 달라질 수 있다. 우리나라의 경우, 풍수해 평가 기준으로 손해를 전파/반파/소파로 구분하고 있는데(KDPA, 2011), 손상상태와 유사한 개념이다.

목적물마다 Fig. 3a의 손상도 곡선이 평가되면 재난 강도 d_s 에서의 손상확률행렬(damage probability matrices, DPM)을 계산하고(Fig. 3b), 이를 손실평가에 활용한다. DPM는 목적물이 재난 강도 d_s 에서 손상정도 x_i 의 손실을 입을 확률로 구성되는데, 식 (4)의 손상도 함수와는 식 (5)의 관계를 가진다(Rossetto et al., 2013).

$$P[X = x_i | D = d_s] = \begin{cases} (1 - P[X \geq x_i | D = d_s]) & i = 0 \\ P[X \geq x_i | D = d_s] - P[X \geq x_{i+1} | D = d_s] & 0 < i \leq n - 1 \\ P[X \geq x_i | D = d_s] & i = n \end{cases} \quad (5)$$

Fig. 3은 식 (4)와 식 (5)의 관계를 보여준다. Table 2의 Hazus-MH 지진 모델은 손상도곡선이 대수정규분포를 따른다고 가정하고, d^* (Fig. 2)의 중앙값(median)과 대수정규분포의 표준편차로 손상도곡선을 정의한다. FEMA (2003)의 Fig. 5와 6은 목적물이 구조물일 경우, 목적물의 역량곡선(capacity curves)를 이용하여 d^* 의 중앙값이 정의되는 과정을 보여준다. 한편, Hazus-MH 허리케인 모형은 식 (4) 및 Fig. 3a를 손상상태(damage state) 곡선으로 부른다(Vickery

et al., 2006). Hazus-MH 허리케인 모형은 목적물의 저항도(resistance, R) 정보를 이용하여 손상상태곡선, 즉 손상확률을 얻는데, 이에 LS 확률, 즉 손상확률은 아래 식 (6)과 같이 정의된다.

$$P[LS] = P[R - D < 0] \quad (6)$$

여기서 목적물의 저항도(R)는 Fig. 2의 역량(capacity)와 유사한 개념이다. 저항도의 불확실성을 확률밀도함수 f_R 로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

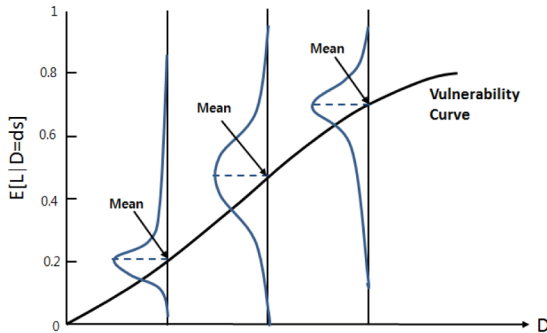


Fig. 4. Uncertainty in loss functions (L) and vulnerability curve.

$$P[LS] = \int_0^{\infty} F_R(r) f_D(r) dr \quad (7)$$

여기서 $F_R(r)$ 은 재난 강도가 r 보다 작을 때 손상을 입을 누적확률분포로, 식 (2) 또는 식 (4)의 손상도곡선에 해당한다. 이렇게 연구 분야마다 역량(capacity), 저항도(resistance) 등 다른 용어를 사용하고 있으나 궁극적으로는 동일한 손상도곡선을 활용하고 있다.

한편, 목적물의 취약도는 취약성함수로도 나타낼 수 있다. 취약성함수란 목적물의 손상(damage) 또는 손실(loss) 정도(L)를 재난 강도의 함수로 표현한 식으로, 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$P[L > I | D = d_s] = \sum_{i=0}^n P[L > I | x_i] P(X = x_i | D = d_s) \quad (8)$$

여기서 $P[L > I | D = d_s]$ 는 재난 강도 d_s 에서 L 의 상보(complementary) 누적분포이며, $P[L > I | x_i]$ 는 목적물의 손상상태 x_i 에서 L 의 상보 누적분포이고, $P(X = x_i | D = d_s)$ 는 DPM이다. L 의 불확실성을 고려하지 않고, L 의 평균을 택한다면 식 (8)은 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$E[L | D = d_s] = \sum_{i=0}^n E[L | x_i] P(X = x_i | D = d) \quad (9)$$

즉 취약성곡선은 Fig. 4와 같이 기대값으로 표현될 수 있다. 취약성곡선과 손상도곡선과의 관계는 NIDP (2007)의 그림 4.2와 4.3을 통해서도 확인할 수 있다.

Table 2의 Hazus-MH 홍수는 침수심(재난 강도)과 손상율(L)간의 관계를 표현하는 손상곡선(damage curves)를 이용하여 홍수 손실을 평가한다(예, Fig.

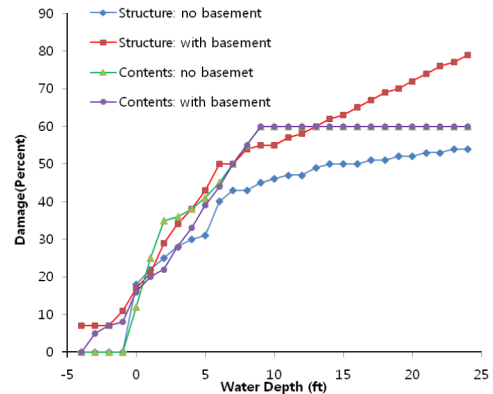


Fig. 5. Depth-damage curves for one-story buildings in Hazus-MH Flood (Yu and An, 2013).

5). Fig. 4의 L 이 물리적인 손상비율(damage, percent)이 되고, D 가 홍수심(water depth, ft)이 되는 것이다. 즉 Hazus의 지진과 허리케인 모형은 손상도곡선 형태로 취약성을 다루는 반면, 홍수 모형은 취약성곡선 형태로 취약도를 다루고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 손상도 또는 취약성 함수를 통틀어 손상함수(damage functions)로 부르기로 한다.

손상함수 구축 방법

손상함수는 특정 분포를 가정하지 않고, 자료의 분포를 그대로 사용하면서 미계측값은 주변값을 이용하여 보간하는 방법(예, Fig. 5)과 특정 분포를 가정하고 매개변수를 추정하는 방법으로 나눌 수 있다 (Table 3). 여기서 자료는 대개 과거 피해 자료이나, 경우에 따라 실험(Vickery et al., 2006) 및 모의 결과(Shinozuka et al., 2001)를 활용하기도 한다. Table 3에 따르면, 손상함수는 주로 대수정규분포(lognormal) 또는 와이불(Weibull) 분포로 가정되는데, 특히 와이불 분포는 생존률, 실패율, 불량률 등과 관련하여서도 자주 활용되고 있다(Wikipedia, 2013).

화산재해로 인한 손상함수 연구 사례

화산재해의 경우 정량적인 피해 관측치가 많지 않고, 손상함수를 연구한 사례도 거의 없다. Table 3의 화산재해 사례에서도 관측치를 이용하여 손상도곡선을 직접 생성한 연구는 Spence et al. (2005) 뿐이다. 그러나 화산 폭발로 인한 피해사례는 어느 정도 보고되어 있으므로(Cabinet Office of Japan, 2002;

Table 3. Study of damage functions

Curves	Hazard	Inventory	Distribution	Data
Fragility	Earthquake (Shinozuka et al., 2001)	Bridge	Lognormal	damage data, numerical simulation
	Earthquake (FEMA, 2003)	Buildings and lifeline systems	Lognormal	damage data, numerical simulation
	Hurricane (Vickery et al., 2006)	Residential building	Lognormal Normal Weibull Deterministic	numerical simulation
	Debris flow (Haugen and Kaynia, 2008)	Buildings	Normal	damage data
	Tephra fall (Spence et al., 2005)	Residential building (roof)	Lognormal	damage data
Vulnerability	Flood (Scawthorn et al., 2006)	Buildings and infrastructure	None	damage data
	Water shortage (Yi et al., 2006)	Water allocation	None	damage data
	Debris flow (Quan Luna et al., 2011)	Building	None	damage data, numerical simulation
	Debris flow, fluvial sediment transport (Totschnig and Fuchs, 2013)	Building	Weibull Exponential Frechet Logistic	damage data
	Volcanic ash (Wilson and Kaye, 2007)	Agricultural commodity	Weibull Linear	damage data
	Pyroclastic flows (Baxter et al., 2005)	Building	None	damage data

Japan Meteorological Agency, 2013), 이에 이들 보고서 정보를 바탕으로 손상상태($X=x_i$)를 정의하고 취약성곡선의 분포를 가정하면 재난 강도와 손상확률 사이의 관계식을 유추할 수 있을 것으로 보인다.

예를 들면, Wilson and Kaye (2007)은 Table 3의 취약성곡선이 와이블 분포를 따른다고 가정하고, 1, 20, 90% 손상을 야기하는 화산재의 두께를 찾은 후 (Table 4), 와이블 분포의 매개변수를 추정하는 방법으로 손상함수를 구축한 바 있다(Fig. 6a). Table 4의 화산재 두께는 문헌을 통해 확인된 값으로, 가축과 농작물마다 각기 다른 화산재 두께에서 1, 20, 90% 손상이 야기됨을 알 수 있으며, 생산물과 자산의 유형에 따라 다른 취약도 특성을 나타내는 것을 보여 준다. Wilson and Kaye (2007)는 1, 20, 90% 손상상태를 야기하는 화산재의 두께를 찾는데 참고한 피해 사례 및 근거가 된 문장을 화산재 두께와 함께 제공하고 있다.

또한 Table 4은 90% 손상상태를 야기할 수 있는 화산재 두께를 세 가지 경우로 나누어 제시하고 있

다. 이는 문헌만을 가지고 손상상태를 정의하고, 손상상태 x_i 를 야기하는 재난 강도를 찾는 과정에서, 화산재 두께의 불확실성을 고려하기 위한 것으로, 화산재 두께 이외의 영향 인자(예, 화산재 영향 기간, 화산재 성분, 우기/건기 등)의 변화를 고려하는데도 활용될 수 있다. Fig. 6a는 90% 손상상태를 야기할 수 있는 평균(average) 화산재 두께를 활용한 것으로, 앞서 언급한 Table 2의 Riskscape가 이들 손상함수를 활용하고 있다. 이외에도 Wilson and Kaye (2007)은 화산분출 시기가 미치는 효과를 고려하기 위해 계절성계수(seasonality coefficient)를 활용하여 손상확률을 조정하였다. 즉 수확기에는 Fig. 6의 손상 확률을 그대로 적용하나, 그렇지 않은 시기에는 손상확률을 1/4까지로 줄인다. 한편 재해 정보가 극히 적은 때는 선형의 손상곡선을 가정할 수도 있다(Wilson and Kaye, 2007). 즉 두 가지 손상상태만으로도 손상곡선을 구축할 수 있는데, 이 경우, Fig. 6b와 같이, 재해 발생 시점에서 목적물의 리질리언스를 고려하지 못하는 단점이 있다. Fig. 6b는 Table 3의 1% 손상상태

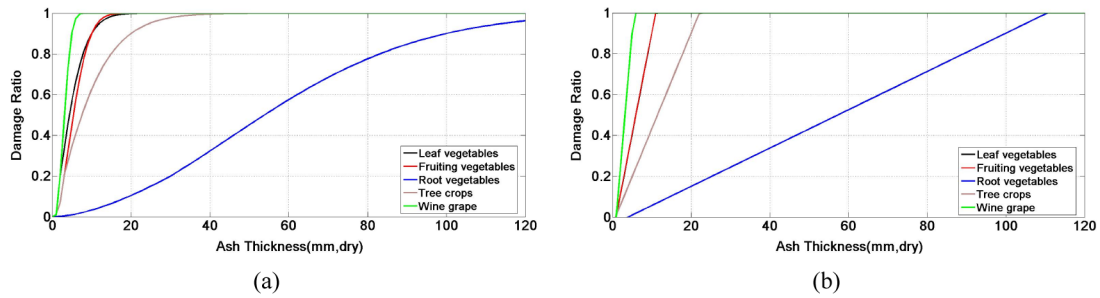


Fig. 6. Vulnerability curves for horticulture production in Table 4. (a) Weibull distribution using three damage states (1%, 20%, 90%) (b) linear regression using two damage states (1%, 90%).

와 90% 손상상태 정보를 이용하여 구축된 선형의 손상함수를 보여준다.

화산재 손상함수 구축 결과 및 비교

선행연구들을 조사해 본 결과, 가용한 피해사례는 Table 4 및 Table 5와 같으며, 이용할 수 있는 국내 자료는 없다. Table 4는 문헌조사, 뉴질랜드 내 농업 및 화산 전문가의 의견 수렴, 2006년 인도네시아 머라빠(Merapi) 화산분화 후 현장조사 및 실내의 실험을 바탕으로 구성되었으며, Table 5는 문헌조사 및 증언, 전문가 의견 등을 통해 추정된 결과이다. Table 4와 비교하였을 때, Table 5는 농경지나 산림이 100% 손상되는 화산재의 두께를 Table 4의 최소값(low)과 최대값(high) 사이에서 보고하고 있다. 이외

에도 Table 5는 비가 내리는 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여, 손상상태를 야기하는 화산재 두께를 달리 추정하고 있다. 일반적으로 비가 오면, 적은 화산재 두께에서도 더 큰 피해가 초래된다. 예를 들면, 도로의 경우, 비가 내리지 않으면 화산재 두께가 하루 5 cm 이상을 초과해야 도로의 통행이 불가능하다고 추정하지만, 비가 내릴 때에는 화산재 제거 차량이 움직일 수 없게 되므로 5 mm의 얇은 화산재 두께에서도 도로나 철도의 이용이 불가능해진다고 추정한다. Table 4 및 Table 5 이외에도 많은 보고서가 산업분야 중에서 특히 농림축산업 분야가 화산재에 매우 취약함을 보여주고 있다(Cabinet Office of Japan, 2002; Japan Meteorological Agency, 2013). 화산재로 인한 농축산분야의 피해는 강우 유무와 상관없이 크게 나타나는데, 화산재로 인해 작물이 말라

Table 4. Ash damage state and volcanic ash thickness (mm, dry) (from Wilson and Kaye, 2007)

Damage state	Inventory	1%	20%	90%		
				Low	Average	High
Pastoral farming production	Dairy	1	5	100	125	200
	Beef	1	10	100	175	300
	Sheep and deer	1	7	90	150	250
Pastoral farming asset	Farm assets	5	70	200	300	400
Horticulture production	Leaf vegetables	1	2	5	10	30
	Fruiting vegetables	1	3	5	10	20
	Root vegetables	5	30	50	100	150
	Tree crops	1	3	10	20	50
	Wine grape	1	2	1	5	20
Horticulture asset	Seasonal crop assets	5	100	200	300	400
	Permanent crop assets	3	75	100	250	350
	Viticulture assets	10	50	100	250	400
Forestry production	Tree harvest	1	5	50	100	150
Forestry asset	New planting	20	50	50	100	200
	Tree aged 2-10 years	50	80	100	300	500
	Tree aged > 10 years	100	500	500	1500	2000

Table 5. Volcanic ash damage state (Cabinet of Japan, 2002)

Inventory	Damage state	Ash thickness	
Frame house	30%	40-60 cm/day	dry
	60%	>60 cm/day	
	30%	30-45 cm/day	wet
	60%	>45 cm/day	
Road	100%	>5 cm/day	dry
	100%	>5 mm/day	wet
Electricity	18%	>1 cm	wet
Agricultural field	100%	>2 cm	
Rice-field	100%	0.5 mm	
Pasture	100%	>2 cm	
Forestry	50%	>1 cm	
	100%	>10 cm	

죽고, 상품가치가 떨어지기 때문이며, 또한 토양질이 악화되어 일정기간 수확이 없을 수도 있기 때문이다 (Cabinet Office of Japan, 2002). Lee et al. (2012)는 백두산 화산분출로 인해 화산재가 남한지역에 유입되면, 특히 강릉 지역이 큰 피해를 입힐 것으로 보고하고 있다. 이 지역은 타 산업에 비해 농림축산업의 비중이 큰 지역으로 농림축산업 분야의 손상함수가 먼저 구축되어야 함을 시사한다.

Table 4 이외에도 화산재해로 인한 피해사례가 보고되어 있긴 하지만(Cabinet Office of Japan, 2002; Japan Meteorological Agency, 2013), 피해사례를 묘사한 문헌정보만을 가지고 손상상태를 정의하고, 손상도곡선을 추정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 위에 언급한 Wilson and Kaye (2007)과 같이, 취약도곡선의 분포를 가정하고 일부 손상상태 정보를 활용하여 분포를 추정하는 방법이 현실적으로 가장 타당한 방법으로 판단된다. 특히 피해가 보고되기 시작되는

(1% 손상) 재난 강도와 완전파괴(100% 손상)와 같이 눈에 띄는 손상 상태가 정확히 판단 가능한 재난 강도를 통해 선형의 곡선을 추정하는 방법이 가장 현실적일 것으로 보인다.

선형곡선 적용의 타당성을 검증하기 위해, Fig. 6a와 6b의 차이를 Fig. 7과 같이 살펴보았다. 즉 세 개의 손상상태를 활용하여 와이블 분포를 구축한 경우와 두 개의 손상상태를 활용하여 선형함수를 구축한 결과의 차이인데, 정보 한 개 차이로 인해 -10%에서 20% 정도의 손실확률 차이가 발생하고 있다. 그러나 이러한 차이는 90% 손상 확률을 야기하는 재난 강도의 불확실성, 즉 Table 4의 최소값과 최대값으로 인한 확률 차이보다는 훨씬 작다(Fig. 7b). Fig. 7b는 Table 4의 최소값과 최대값을 이용하여 와이블 분포를 추정하고 그 차이를 계산한 것으로 80% 까지 손실확률의 차이를 발생시키고 있다. Fig. 7b에서 포도의 경우, 최소값을 사용하여 분포를 추정하기 위해 20% 손상상태를 야기하는 화산재 두께를 1mm로 추정하였다(Table 4). 그 결과, Fig. 7b는 Table 5와 같이 극히 제한된 정보만 존재할 경우, 불확실한 정보를 이용하여 한 개의 손상상태를 더 정의하기 보다는 선형의 손상함수를 사용하는 것이 더 적합함을 알 수 있었다. 그래서 본 연구는 Table 4의 자료를 이용하여 와이블 분포의 손상함수를 계산하였으며, Table 5의 자료를 이용하여 선형의 손상함수를 계산하였다.

와이블 함수 이용 방법

와이블 누적분포 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$F[x] = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right) \tag{10}$$

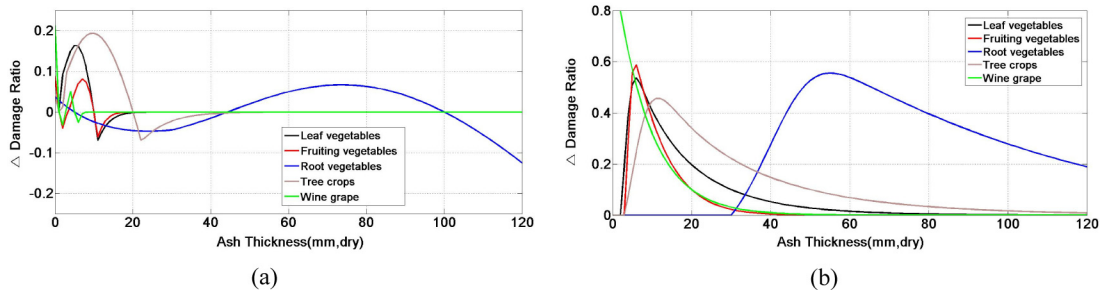


Fig. 7. (a) Probability difference between Weibull distribution in Fig. 6(a) and linear regression in Fig. 6(b) with the average value for 90% damage state in Table 4, (b) probability difference between Weibull distributions with low and high values for 90% damage state in Table 4.

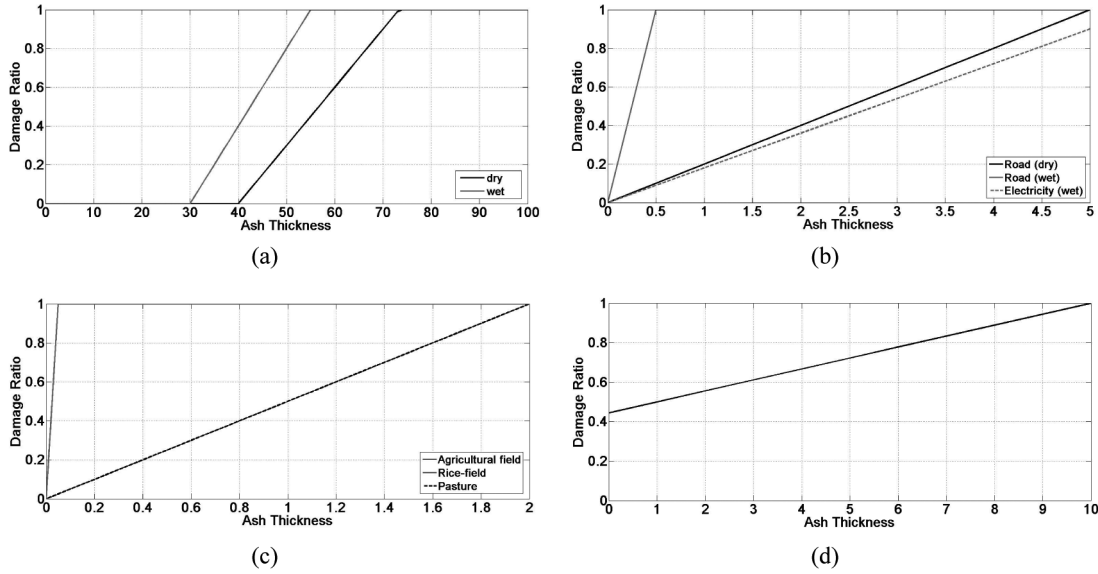


Fig. 8. Damage functions for each inventory in Table 5: (a) frame house (b) road/electricity (c) agriculture (d) forestry.

매개변수 β (shape parameter)와 η (scale parameter)를 추정하는 방법으로는 크게 그래픽 방법(graphical method)와 분석적 방법(analytical method)가 있다. 분석적 방법 중 대표적인 것으로 최대우도추정법(maximum likelihood estimator, MLE)가 널리 사용되는데, 표본의 수가 적을 경우에 편의(bias)를 가진다는 단점이 있다. 이 때문에 Fig. 6a는 그래픽 방법 중 와이블 확률 플롯팅(Weibull probability plotting) 기법을 사용하였다(AI-Fawzan, 2000). 와이블 확률 플롯팅 기법을 이용하여, 계산된 매개변수는 식 (11)과 같으며, Table 4에서 90% 손상상태를 야기하는 화산재의 평균 두께를 활용하면 손상함수는 Table 6과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &DR \leq DR_{20}, \\
 &\eta_1 = \frac{D_{20}}{\ln(1-DR_{20})^{\frac{1}{\beta_1}}}, \quad \beta_1 = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-DR_{20})}{\ln(1-DR_1)}\right)}{\ln\left(\frac{D_{20}}{D_1}\right)} \\
 &DR > DR_{20}, \\
 &\eta_2 = \frac{D_{90}}{\ln(1-DR_{90})^{\frac{1}{\beta_2}}}, \quad \beta_2 = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-DR_{90})}{\ln(1-DR_{20})}\right)}{\ln\left(\frac{D_{90}}{D_{20}}\right)}
 \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)에서 D_1, D_{20}, D_{90} 은 1, 20, 90% 손상상태

를 유발하는 화산재 두께이고, DR_1, DR_{20}, DR_{90} 은 각각 D_1, D_{20}, D_{90} 에서의 손상을 이다.

선형함수 이용 방법

Table 5의 피해사례를 통해 만들어진 손상함수는 Fig. 8과 같다. 손상상태 정보가 한 개인 경우에는 화산재에 대한 목적물의 역량(capacity)을 0이라고 가정하고, 화산재가 전혀 없는 경우 손상이 0인 점, 즉 (0,0)을 추가하여 선형식을 구축하였다. 화산재 피해의 경우, 대개 눈에 띄는 피해사례만 보고됨을 고려할 때, 피해가 시작되는(예, 1%) 손상상태는 국내 황사 피해사례를 통해 보정할 수 있을 것으로 생각된다. 황사와 화산재의 유사성과 차이점에 대해서는 Langmann (2013)을 참고할 수 있다.

결론

재난 리스크 모델링 기술을 이용하여 백두산 화산 폭발로 인한 남한지역의 손실을 예측하기 위해서는 재난별 피해목적물 정보를 구축함은 물론 재난별 피해목적물별 손상함수를 구축할 필요가 있다. 백두산 화산 폭발은 다양한 형태의 재난을 초래할 수 있지만 남한에 직접적인 영향을 미칠 것으로 보이는 재난은 화산재이므로, 본 연구에서는 화산재와 관련된 손상함수만을 연구하였다. 또한 손상함수는 피해목적

Table 6. Damage functions of agricultural productions from Table 4

Inventory	Damage state				
Pastoral farming production	Dairy	10.90	1.93	39.57	0.73
	Beef	30.47	1.35	62.93	0.82
	Sheep and deer	17.95	1.59	50.17	0.76
Pastoral farming asset	Farm assets	250.97	1.17	178.35	1.60
Horticulture production	Leaf vegetables	2.80	4.47	5.63	1.45
	Fruiting vegetables	5.10	2.82	6.50	1.94
	Root vegetables	71.38	1.73	65.04	1.94
	Tree crops	5.10	2.82	10.15	1.23
	Wine grape	2.80	4.47	3.60	2.55
Horticulture asset	Seasonal crop assets	426.05	1.03	202.59	2.12
	Permanent crop assets	355.97	0.96	162.59	1.94
	Viticulture assets	108.93	1.93	140.66	1.45
Forestry production	Tree harvest	10.89	1.93	34.28	0.78
Forestry asset	New planting	77.89	3.38	78.06	3.37
	Tree aged 2-10 years	100.43	6.60	187.07	1.77
	Tree aged >10 years	1.89e+03	1.93	1.01e+03	2.12

물의 특성에 따라 달라지는 것으로, 재난 리스크 모델링을 위해서는 목적물의 데이터베이스 구축도 중요한 연구주제이나 본 연구에서는 고려하지 않았다.

피해요인과 피해율 사이의 관계를 정량적으로 표현하는 손상함수는 주로 과거 피해사례를 바탕으로 구축된다. 그러나 국내 화산재 피해사례는 보고된 바 없고, 이에 국외 자료를 사용할 수밖에 없다. 그런데 국외에서도 손상상태 및 손상함수에 대한 연구가 드물어, 피해사례를 묘사한 문헌에 의존하여 손상상태를 정의하고 손상상태를 유발하는 화산재 두께를 추정할 수밖에 없고 이 경우 극히 제한된 정보만이 손상함수 구축에 활용될 수 있다. 본 연구는 적은 정보를 활용하여 손상함수를 구축하는 방법을 제시하고, 일부 사례를 통해 와이블 형태 또는 선형의 손상함수를 구축하였다.

그러나 본 연구에서 개발된 취약성곡선 형태의 손상함수를 화산재로 인한 남한지역의 손실을 평가하는데 직접 사용하는 데는 한계가 있을 것으로 보인다. 참고한 피해사례가 모두 해외사례이기 때문이며, 우리나라 피해목적물의 고유 특성(예, 농작물의 종류, 가축의 종류, 건축형태 등)으로 인해 같은 화산재 두께이더라도 다르게 반응할 수 있기 때문이다. 자연조건(예, 토질) 또한 손상함수에 영향을 미칠 수 있다. 이에 해외 자료를 바탕으로 생성된 손상함수를 국내용으로 보정하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로

보이는데, 국내 황사 피해사례 및 미세먼지 피해사례를 활용할 수 있을 것으로 보인다. 또한 본 연구는 극히 일부 목적물에 대한 손상함수만을 구축하였다. 국내 산업에서 미세먼지에 민감한 정밀기계부문의 비중이 큰 것을 감안할 때, 정밀기계부문의 손상함수 구축이 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 ‘화산재해 피해예측 기술개발’[NEMA-백두산-2012-1-3] 과제의 지원으로 수행되었음.

References

- Al-Fawzan, M.A., 2000, Methods for estimating the parameters of the Weibull distribution. <http://interstat.statjournals.net/YEAR/2000/articles/0010001.pdf> (October 6th 2013)
- Cabinet Office of Japan, 2002, Damage estimation of a historic eruption of Mount Fuji. Cabinet Office of Japan, 7-7 p. (in Japanese)
- Cutter, S.L., Boruff, B.J., and Shirley, W.L., 2003, Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84, 242-261.
- DOGAMI (Oregon Department of Geology and Mineral Industries), 2012, Mount Hood Multi-Hazards Risk

- Study. <http://www.oregongeology.org/pubs/fs/mthood-factsheet.pdf> (October 6th 2013)
- FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2003, Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model Hazus[®]MR4 technical manual. Federal Emergency Management Agency, 17-3p.
- GNS Science, 2012, Volcanic hazards: ash fall. <http://gns.cri.nz/Home/Learning/Science-Topics/Volcanoes/Volcanic-Hazards/Ash-fall> (October 6th 2013)
- Haugen, E.D. and Kaynia A.M., 2008, Vulnerability of structures impacted by debris flow. In Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F., and Ho, K. (e.d.), Landslides and Engineered Slopes. Taylor & Francis Group, London, UK, 381-387.
- Japan Meteorological Agency, 2013, Impacts and countermeasures of volcanic ash. Japan Meteorological Agency, 27p. (in Japanese)
- KDPA (Korea Disaster Prevention Association), 2011, Study on the natural hazard loss estimation methodology. Korea Disaster Prevention Association, 138p. (in Korean)
- KIGAM (Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2009, Assessment and countermeasure for asian dust hazard. National Emergency Management Agency, 708p. (in Korean)
- Langmann, B., 2013, Volcanic ash versus mineral dust: atmospheric processing and environmental and climate impacts. Atmospheric Sciences, 2013, 1-17.
- Lee, S.-H. and Yun, S.-H., 2011, Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. Journal of Korean Earth Science Society, 32, 360-371. (in Korean)
- Lee, S.-H., Jang, E.-S., and Lee, H.-M., 2012, A case analysis of volcanic ash dispersion under various volcanic explosivity index of the Mt. Baegdu. Journal of Korean Earth Science Society, 33, 280-293. (in Korean)
- Lowe, C.J., 2010, Analyzing vulnerability to volcanic hazards: application to St. Vincent. Ph.D. dissertation, University College London, London, UK, 383 p.
- NIDP (National Institute for Disaster Prevention), 2007, Development of the fragility functions of industrial buildings due to wind hazard in Korea. National Institute for Disaster Prevention, 230 p. (in Korean)
- Quan Luna, B., Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S., van Asch, T.W.J., and Akbas, S.O., 2011, The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. Natural Hazards Earth System Sciences, 11, 2047-2060.
- Rossetto, T., Ioannou, I., and Grant, D.N., 2013, Existing empirical vulnerability and fragility functions: compendium and guide for selection. GEM Foundation, 63 p.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C., and Lawrence, M., 2006, Hazus-MH flood loss estimation methodology II. damage and loss assessment. Natural Hazards Review, 7, 72-81.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda, T., 2001, Statistical analysis of fragility curves. <http://shinozuka.eng.uci.edu/Pdf/RepFrag.pdf> (October 6th 2013)
- Spence, R.J.S., Kelman, I., Baxter, P.J., Zuccaro, G., and Petrazzuoli, S., 2005, Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 477-494.
- Totschnig, R. and Fuchs, S., 2013, Mountain torrents: quantifying vulnerability and assessing uncertainties. Engineering Geology, 155, 31-44.
- USGS (United State Geological Survey), 2009, Types of Volcano Hazards. <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/index.php> (October 6th 2013)
- Vickery, P.J., Skerlj, P.F., Lin, J., Twisdale, L.A., Young, M.A., and Lavelle, F.M., 2006, Hazus-MH hurricane model methodology. II: damage and loss estimation. Natural Hazards Review, 7, 94-103.
- Wen, Y.K., Ellingwood, B.R., and Bracci, J., 2004, Vulnerability function framework for consequence-based engineering. Mid-America Earthquake Center, 101p.
- Whittaker, A., Deierlein, G., Hooper, J., and Merovich, 2004, Engineering demand parameters for structural framing systems. Applied Technology Council, ATC-58 Project Task Report, 19p.
- Wikipedia, 2013, Weibull distribution. http://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution (October 6th 2013)
- Wilson, T.M. and Kaye, G.D., 2007, Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards. GNS Science, Report 2007/37, 51p.
- Yi, C.S., Park, K., Choi, S.A., and Shim, M.P., 2006, Water allocation by estimation of damage function in a water-deficit situation. Journal of Korea Water Resources Association, 39, 431-440. (in Korean)
- Yu, S. and An, H., 2013, Study of flood loss estimation using Hazus-MH 2.1. Journal of Risk Management, 24, 29-57. (in Korean)
- Yun, S.H. and Cui, Z.X., 1996, Historical eruption records on the cheonji caldera volcano in the Mt. Paektu. Journal of Korean Earth Science Society, 27, 376-382. (in Korean)
- Yun, S.H. and Lee, J.H., 2012, Analysis of unrest signs of activity at the Baegdusan volcano. Journal of Petrological Society of Korea, 21, 1-12. (in Korean)

2013년 9월 23일 접수

2013년 10월 7일 수정원고 접수

2013년 10월 10일 채택