

춘천시에서 발생한 산사태 유발강우의 특성 분석

김상욱* · 백경오**†

Characteristics of Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides at Chuncheon Province

Sang Ug Kim* · Kyong Oh Baek**†

†Corresponding Author

Kyong Oh Baek

Tel : +82-31-670-5141

E-mail : pko@hknu.ac.kr

Received : August 17, 2022

Revised : September 21, 2022

Accepted : October 18, 2022

Abstract : Every year, particularly during the monsoon rainy season, landslides at the Chuncheon province of South Korea cause tremendous damage to lives, properties, and infrastructures. More so, the high rainfall intensity and long rainfall days that occurred in 2020 have increased the water content in the soil, thereby increasing the chances of landslide occurrences. Besides this, the rainfall thresholds and characteristics responsible for the initiation of landslides in this region have not been properly identified. Therefore, this paper addresses the rainfall thresholds responsible for the initiation of landslides at Chuncheon from a regional perspective. Using data obtained from rainfall measurements taken from 2002 to 2011, we identify a threshold relationship between rainfall intensity and rainfall duration for the initiation of landslides. In addition, we identify the relationship between the rainfall intensity using a 3-day, 7-day, and 10-day antecedent rainfall observation. Specifically, we estimate the rainfall data at 8 sites where debris flow occurred in 2011 by kriging. Following this, the estimated data are used to construct the relationship between the intensity (I), duration (D), and frequency (F) of rainfall. The results of the intensity-duration-frequency (IDF) analysis show that landslides will occur under a rainfall frequency below a 2-year return period at two areas in Chuncheon. These results will be effectively used to design structures that can prevent the occurrence of landslides in the future.

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : landslides, rainfall intensity-rainfall duration, I-D-F analysis, Chuncheon province

1. 서론

2011년 서울시 서초구 우면산에서는 토석류의 발생으로 인해 인근 지역주민 15명이 사망하고 수많은 재산피해가 발생한 바 있으며, 춘천시 신북면 천전리에 서도 산사태의 발생으로 인해 13명이 사망하는 등 안타까운 인명피해가 발생한 바 있었다. 특히 2020년에는 높은 강우강도와 역대 최대기간의 장마기간이 발생하였는데, 이와 같은 기상적 특성은 토양의 함수비를 크게 증가시켜 산사태의 발생가능성을 크게 증가시킬 수 있다. 따라서 기후변화로 인한 집중강우 발생빈도

의 증대가 예측되는 시점에서 산사태나 토석류 발생과 같은 재해로부터 인명 및 재산의 피해를 방지하기 위한 연구 및 대책 마련이 필요한 시점이다.

산사태의 예측방법은 관측 자료를 이용한 통계적 분석을 통한 경험적 방법(empirical method)과 지반공학적 모델링(geotechnical modelling)을 이용한 수치해석적 방법(numerical method)로 구분해 볼 수 있다. 경험적 방법은 과거 산사태가 발생한 지점에 대한 강우정보, 지형 및 지질, 발생된 산사태의 규모 등을 통계적으로 분석하여 산사태가 발생할 수 있는 요인별 발생가능성을 제시하는 방법이다. 통계적 분석을 이용한 경험적 방

*강원대학교 건축토목환경공학부 교수 (Department of Civil Engineering, Kangwon National University)

**한경대학교 건설환경공학부 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hankyong National University)

법은 수치해석적 방법에 비해 측정된 자료 자체를 이용하므로 정확도 측면에서는 불확실성이 존재하지만, 특정한 물리적 모형을 구축하지 않으므로 측정된 자료를 이용하여 특정 기준을 작성함에 있어 편의성이 있고 모형구축에 따른 범위 등에 대한 제약조건이 없다는 장점이 있다.

Caine¹⁾은 산사태를 유발시키는 임계 강우강도(critical rainfall threshold)에 관한 비선형식을 최초로 제안한 바 있다. 이후 Caine이 제시한 비선형식의 계수를 다른 연구지역에 대해 추정하는 많은 연구(Innes²⁾, Crosta³⁾ Crosta and Frattini⁴⁾ Cannon and Gartner⁵⁾, Brunetti et al⁶⁾가 수행된 바 있으며, Guzzetti et al.⁷⁾은 기존의 연구결과를 요약하고 정규강우강도(normalized rainfall intensity)를 새로운 변수로 지속기간과의 관계를 Bayesian 통계적 방법으로 분석한 바 있다. 국내의 경우 산사태를 유발하는 강우강도와 강우 지속기간의 관계를 정확히 나타내는 연구는 진행된 바 없지만, Kim et al.⁸⁾은 우리나라 전체에 대한 산사태 유발강우를 3일 누적강우량, 일평균강우량 등의 자료로 산사태 발생기준을 제시한 바 있으며, 최경⁹⁾, 홍원표 등¹⁰⁾, 양인태 등¹¹⁾, 윤찬영 등¹²⁾, 유철상과 김기욱¹³⁾, 이승우 등¹⁴⁾, 오채연과 전계원¹⁵⁾의 연구자에 의해 유사한 연구가 수행된 바 있다.

수치해석적 방법은 산사태를 발생시키는 인자들의 관계를 물리적으로 규명하고 수학적으로 모형화함으로써 산사태의 발생을 예측한다. 이 방법은 산사태 발생 과정을 역학적으로 모형화할 수 있어 결과가 과학적이고 정확한 반면, 대규모 지역에서의 적용에 있어 불확실성이 포함될 수 있는 요소가 증가하고 복잡한 모형을 구축하여야 한다는 단점이 있다. 최근 모형으로는 SHETRAN, TRIGRS, PISA, GEOtop-FS, Kanako-

2D 등이 있으며, 관련 연구는 Salciarini et al.(2006)¹⁶⁾, Simoni et al.(2008)¹⁷⁾, Safaei et al.(2011)¹⁸⁾, Salciarini et al.(2012)¹⁹⁾, 이준선 등(2015)²⁰⁾, 이준선 등(2016)²¹⁾, 김영환과 전계원(2018)²²⁾이 있다.

본 연구에서는 통계적 분석에 기반한 경험적 방법에 따른 산사태 유발강우를 분석하였으며, 상대적으로 소규모 단위로 볼 수 있는 춘천시만을 대상으로 춘천시의 특성을 반영한 유발강우에 관한 특성을 분석하였다. 먼저 2002년부터 2011년까지의 강우자료를 사용하여 일일강우량, 3일 선행강우량, 7일 선행강우량, 10일 선행강우량과 산사태 발생의 관계를 규명하였다. 단, 2011년 이후 현재까지는 현장답사를 통한 조사 및 관측이 시행되지 못하였으므로 해당 기간은 본 연구의 분석에서 제외하고 결과를 도출하였다. 본 연구에서는 Caine (1980)이 제시한 강우강도와 강우지속기간의 관계식과 동일한 비선형식을 선정하였으며, 특히 토석류 발생지점에서의 강우량을 크리깅(kriging)방법으로 추정하고, 그 결과를 활용하여 강우강도-강우 지속기간-재현기간(Intensity-Duration-Frequency)곡선을 작성하였다.

2. 춘천시 산사태 유발강우의 강우강도-강우 지속기간 추정

2.1 2002년~2011년 산사태 발생 및 강우현황

본 연구를 위해 춘천시청으로부터 수집된 재해발생 자료의 시간적 수집범위는 2002년부터 2011년까지이며, 공간적 수집범위는 춘천시 행정구역이다. 2011년 이후는 본 연구를 위한 조사인력을 통한 현장 조사가 인력 부족 및 예산 부족으로 진행되지 못하였으므로 자료의 수집기간도 2011년까지로 한정하였다. 또한 암석보다는 주로 산사태의 형태가 토사(soil)가 미끄러짐

Table 1. Landslides at Chuncheon (2002 ~ 2011)

Year	Date	Number of landslides	Landslides sites
2002	8.04~8.13	27	Buksanmyeon(2), Shinbukeup(4), Sabukmyeon(13),Dongmyeon(2), Seomyeon(5), Sindongmyeon(1)
2003	8.23~8.28	2	Dongmyeon(2)
2004	7.12~7.17	3	Shinbukeup(1), Dongmyeon(1), Namsanmyeon(1)
2005	6.30~6.08	14	Dongsanmyeon(3), Sindongmyeon(4), Namsanmyeon(7)
2006	7.14~6.20	88	Dongsanmyeon(16), Dongmyeon(11), Buksanmyeon(27), Namsanmyeon(7), Seomyeon(14), Sabukmyeon(4), Chuncheon si district (9)
2009	7.11~7.15	112	Dongmyeon(29), Namsanmyeon(30), Buksanmyeon(3),Dongsanmyeon(12), Sindongmyeon(4), Sabukmyeon(1), Nammyeon(14), Seomyeon(5), Dongnaemyeon(7), Chuncheon si district(7)
2011	7.27	81	Seomyeon(18), Sabukmyeon(13), Namsanmyeon(9), Shinbukeup(8), Sindongmyeon(7), Dongmyeon(5), Buksanmyeon(4), Dongnaemyeon(2), Dongsanmyeon(1), Chuncheon si district(14)
Total		327	Buksanmyeon(36), Shinbukeup(13), Sabukmyeon(31),Dongmyeon(49), Seomyeon(42), Sindongmyeon(16), Namsanmyeon(54), Dongsanmyeon(33), Nammyeon(14), Dongnaemyeon(9), Chuncheon si district(30)

(sliding) 또는 흐름(flow)에 의해 발생된 경우가 많으므로, 토사의 미끄러짐에 의한 산사태와 토사의 흐름에 의한 토석류만을 분석의 주요 대상으로 하였다.

Table 1에는 수집된 산사태 자료를 년도 별로 구분하여 제시하였다. 자연사면에서 발생된 산사태는 발생 시각을 정확하게 알 수 없다는 단점이 있었으며, 10년 동안 춘천시에서 발생된 산사태는 모두 324건이었다. 2002년에는 태풍 루사의 영향으로 26개소에서 산사태가 발생된 것으로 보이며, 2006년 이후 산사태 발생건수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 행정구역별로 구분해 보면, 과거 10년간 가장 많은 산사태가 발생한 곳은 남산면(54건), 동면(49건), 서면(37건), 북산면(36건), 동산면(35건) 등의 순서로 나타났다.

2.2 과거 춘천시의 강우특성 분석

산사태의 발생인자는 강수량, 사면경사 및 방향, 토양의 종류, 유효토심, 토지피복의 상태 등이 있으나, 본 연구에서는 기상학적 요인인 강우량을 주요 원인으로 보고 수행한 Caine¹⁾, Guzzetti et al.⁷⁾ 등의 연구를 참조하여 강수량 중심의 연구를 수행하였다.

춘천시 지역에는 중앙부처 및 지방자치제에서 운영하고 있는 강우관측소가 있으나, 발생지점과 강우자료 간의 일관적인 분석을 위하여 춘천 강우관측소의 자료를 이용하였다. 또한 산사태의 정확한 발생시각을 자료로부터 알 수 없는 경우는 강우기간 동안의 최대일강우가 발생한 일자의 익일 00시 00분에 산사태가 발생한 것으로 가정하여 강우의 특성을 분석하였다. Fig. 1부터 Fig. 4에는 2002년부터 2011년까지 춘천강우관측소로부터 수집된 일일강우량, 3일 선행강우량, 7일 선행강우량 및 10일 선행강우량을 산사태 발생건수가 20회 이상인 일시와 함께 표시하였다. ‘○’는 20회 이상의 발생년도, ‘△’는 20회 미만의 발생년도, ‘+’는 재해가 발생하지 않았음을 나타낸다.

먼저 Fig. 1의 일일강우량을 보면, 20건 이상의 재해는 모두 150 mm를 초과하는 일일강우량의 조건하에

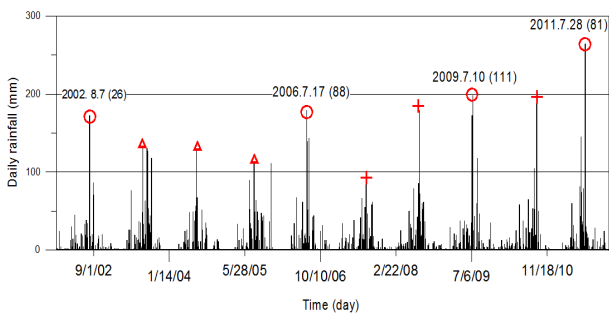


Fig. 1. Daily rainfall at Chuncheon rainfall gauge(2002~2011).

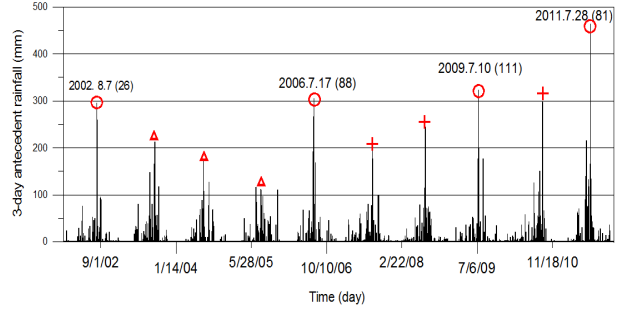


Fig. 2. 3-day antecedent rainfall at Chuncheon rainfall gauge (2002~2011).

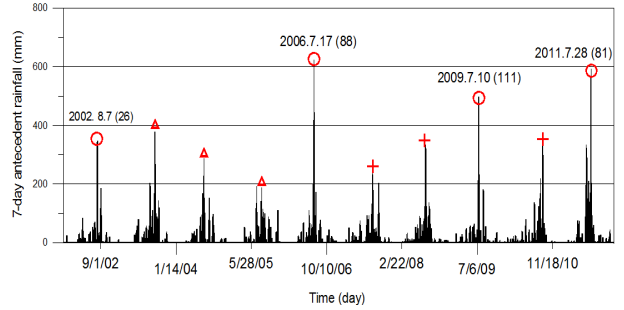


Fig. 3. 7-day antecedent rainfall at Chuncheon rainfall gauge (2002~2011).

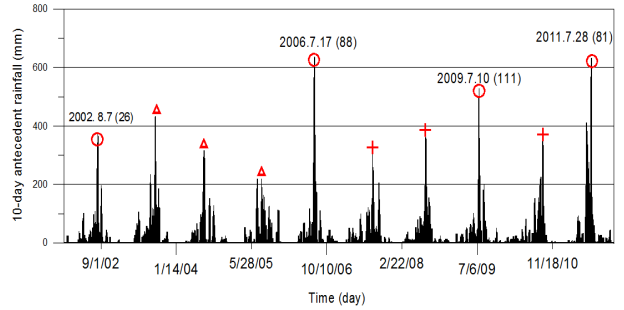


Fig. 4. 10-day antecedent rainfall at Chuncheon rainfall gauge (2002~2011).

발생하였음을 알 수 있다. 그러나 20회 미만의 재해가 발생한 2003년, 2004년, 2005년의 일일강우량은 150 mm를 초과하지 않았음에도 불구하고 산사태가 발생하였으며, 이와는 반대로 2008년과 2010년에는 일일강우량이 150 mm를 초과하였음에도 산사태가 발생하지 않았음을 알 수 있다.

이와 같은 양상은 Fig. 2의 3일 선행강우량에 대한 도표에서도 나타난다. 즉 다량의 재해발생은 3일 선행강우량이 300 mm에 인접한 강우량이 발생한 조건하에 나타났으나, 2003년, 2004년, 2005년은 200 mm에 인접하거나 이보다 적은 강우량의 조건하에서도 재해가 발생하였으며, 이와는 반대로 3일 선행강우량이 300 mm에 가깝게 발생했던 2009년에는 산사태가 발생하지 않

았다. 이와 같은 결과로부터 춘천시 지역은 일일강우량과 3일 선행강우량은 상관성이 높다는 점을 알 수 있다.

그러나 Fig. 3의 7일 선행강우량은 일일강우량이나 3일 선행강우량과는 상당히 다른 결과를 보여준다. 다량의 재해가 발생한 년도에는 7일 선행강우량이 400 mm에 인접하거나 이보다 큰 강우량에서만 발생한 것을 알 수 있으며, 2005년을 제외한 2003년과 2004년의 7일 선행강우량도 2002년의 7일 선행강우량에 근접함을 알 수 있다.

또한 Fig. 4의 10일 선행강우량은 7일 선행강우량과 형태뿐만 아니라 강우량에서도 상당히 유사한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 다만, 14건의 적지 않은 산사태가 발생한 2005년은 타 년도에 비해 상대적으로 강우량이 적었음에도 불구하고 산사태가 발생하였는데, 이로부터 2005년 재해가 발생한 동산면, 신동면, 남산면에서의 강우는 춘천 강우관측소에서 측정된 강우보다 훨씬 집중된 호우였던 것으로 추정할 수 있다.

현재 산사태 정보는 연속 강우량 200 mm 이상, 1일 강우량 150 mm 이상, 시간 강우량 30 mm 이상인 경우 발령되며, 주의보는 연속강우량 100~200 mm, 1일 강우량 80~150 mm, 시간 강우량 20~30 mm에서 발령된다(Table 2). 7일 선행강우량이 400 mm에 인접하거나 초과하면 춘천시에서는 다량의 토사 관련 재해가 발생할 수 있으므로 7일 선행강우량을 추가적인 기준으로 사용할 필요가 있다.

과거 10년 동안의 강우사상을 이용하여 현재의 국내 산사태 주의보 및 경보발령기준을 적용하면 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5에서와 같이 대부분의 과거 10년 동안 춘천시 지역의 강우관측소에서는 최대 시간강우량이 산사태 경보기준인 30 mm 이상에서 발생하였고, 일강우량 역시 경보기준이 150 mm 보다 많은 200 mm 이상이 발생하였다. 그러나 2개의 강우관측소에서 측정된 강우자료는 주의보 및 경보기준에 달하지 않는 강우의 발생에도 산사태가 발생하였음을 알 수 있다.

춘천시에서 다량의 산사태 발생은 여러 가지 강우량 중에서 7일 선행강우량과의 관계가 가장 중요하였다. 그러나 산사태의 발생은 발생의 개소 수 보다는 재해가 발생할 수 있는 최소 요건이 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 춘천시 지역에서의 강우자료로부터 일일강우량과 3일 선행강우량을 비교하여 어떤 강우량이 보다 중요한 역할을 할 수 있는지를 분석하였다. Fig. 6에는 산사태가 발생한 기록이 있는 7개년에 대해 산사태 발생기간 동안 내린 최대일일강우량과 3일 선행강

Table 2. Criteria for the pre-warning and warning of landslides

Rainfalls	Pre-warning	Warning
Cumulative rainfall(mm)	100~200	200 ~
Rainfall intensity(mm/hr)	20~30	30 ~
Daily rainfall(mm/day)	80~150	150 ~

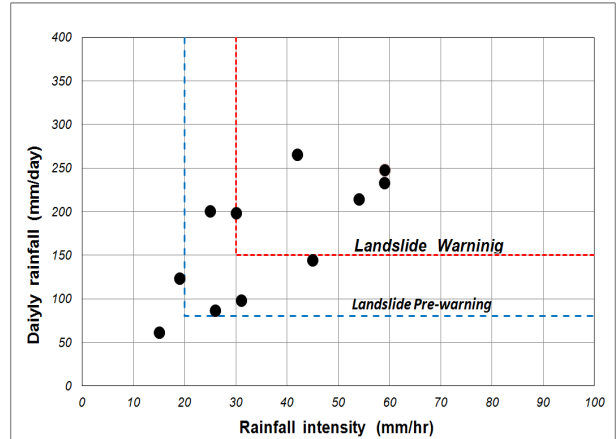


Fig. 5. Rainfalls(2002~2011) at Chuncheon and Criteria for landslides.

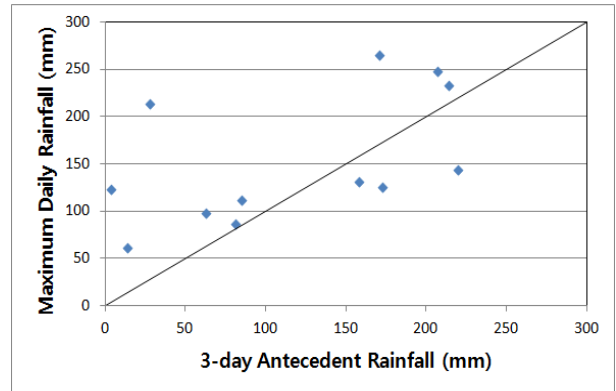


Fig. 6. Relationship of daily rainfall and 3-day antecedent rainfall at Chuncheon.

우량을 나타내었다. 여기서는 보다 세부적인 강우량간의 분석을 위하여 춘천강우관측소로부터 수집된 7개의 자료와 함께 추양강우관측소(북산면) 및 천전강우관측소로부터 수집된 5개의 자료를 추가하여 함께 분석하였다.

Fig. 6에서 나타낸 45°선은 일일강우량과 3일 선행강우량이 같은 점들을 연결한 선이며, 3개의 자료를 제외한 9개의 자료가 45°선의 윗부분에 표시됨을 알 수 있다. 이는 3일 선행강우량이 적어도 일일강우량이 크면 산사태가 발생할 수 있음을 뜻하는 것으로 춘천시의 경우는 3일 선행강우량보다 일일강우량에 의한 산

사태 발생 가능성이 높아질 수 있음을 시사한다. 특히 일일강우량이 100 mm를 초과하는 경우에 많은 산사태가 발생하였음을 알 수 있으며, 3일 선행 강우량이 4 mm에 불과한 경우라도 일일강우량이 100 mm를 초과하면 산사태가 발생했던 자료도 있어 일일강우량에 대한 자료의 관리 및 이를 활용한 산사태의 대비가 중요함을 알 수 있다.

2.3 산사태 유발강우의 강우강도-강우 지속기간 추정

산사태가 발생한 시점의 강우자료로부터 강우강도(rainfall intensity)와 강우 지속시간(rainfall duration) 사이의 관계를 알 수 있다면, 산정된 관계식을 이용하여 산사태에 관한 피해를 사전에 예측할 수 있다. Caine(1980)이 산사태를 일으키는 유발강우의 강우강도와 강우 지속기간 사이의 관계식을 수립한 이후 많은 연구자들에 의해 유사한 연구가 수행되었으며, 이중 대표적 연구결과를 요약하면 Table 3과 같다.

본 연구에서도 기존 연구자들이 제안한 강우강도-강우 지속기간의 관계식을 사용하고 춘천시에 적합한 계수를 추정하였다. 이를 위하여 최근 10년 중 산사태가 발생한 특정 7년의 강우자료와 복산면과 신북읍 강우 관측소 자료를 포함한 총 12개의 강우자료로부터 산사태가 발생한 기간의 강우강도와 지속시간을 산정하고, 산사태 유발강우에 대한 관계식을 다음과 같이 추정하고 이를 Fig. 7에 나타내었다.

$$I = 13.2644D^{-0.4519}, \quad 2 < D < 70 \quad (1)$$

식 (1)에서 I 는 강우강도로 mm/hr의 단위를 가지며, D 는 강우 지속시간으로 hr의 단위를 가진다. 또한 이 식은 2 hr에서 70 hr의 강우 지속시간에 대해 적용가능하였고, 산정된 결정계수는 0.76으로 유발강우의 76% 정도를 설명할 수 있는 관계식이다. 산정된 관계식의 계수는 Caine(1980)이 제시한 관계식의 계수와 상당히 비슷하는데 Caine은 관계식의 유도를 위하여 1980년 이전의 문헌에 나타난 73개의 세계 각 국가의 자료를 사용하였으므로, 이로부터 춘천시의 경우 산사태를 일으킨

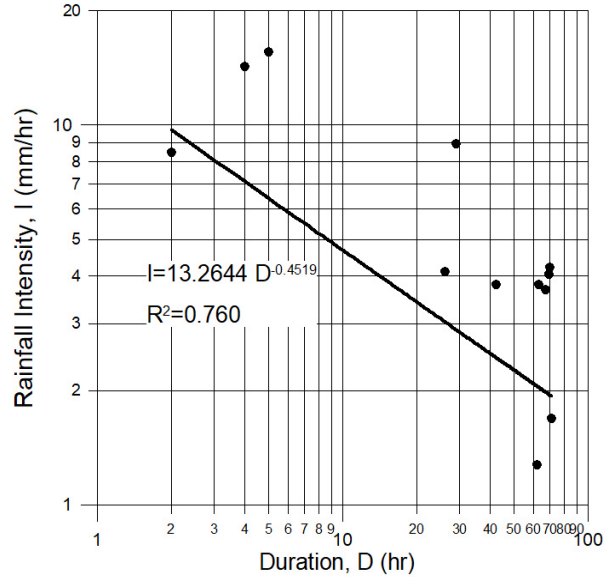


Fig. 7. Relationship between rainfall intensity and duration.

강우강도-강우 지속기간의 관계가 Caine이 사용한 각국의 자료와 유사했음을 간접적으로 추정할 수 있다. 특히 Fig. 7로부터 강우 지속시간이 2시간인 경우에는 강우강도가 약 9.5 mm/hr 이상이면 재해가 발생할 수 있고, 지속시간이 70시간인 경우에는 강우강도가 1.8 mm/hr만 되어도 재해가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

3. 2011년 춘천시 산사태 발생현황 및 강우현황

3.1 조사개요 및 지질학적 특성

2011년 7월 집중호우로 인해 피해를 입은 춘천시를 대상으로 하여 산사태 현장(81개소)을 조사하였다. Fig. 8에서 보면 춘천시청을 중심으로 남동쪽을 제외한 대부분의 지역에서 산사태가 발생되었음을 알 수 있다.

본 조사에서는 산사태의 종류를 ‘미끄러짐(soil slip)’에 의한 사면붕괴와 ‘토석류(debris flow)’로 구분하여 시행하였는데, 조사결과 인공사면 및 자연사면에서 발생한 사면붕괴가 72건, 토석류 발생이 9건으로 조사되었다. 이 중에서 사면붕괴는 자연사면에서 발생한 사면붕괴 46건, 인공사면에서 발생한 사면붕괴 26건이었

Table 3. Overview to the relationship of rainfall intensity and rainfall duration

Author	Landslide type	Equation	Range (hr)
Caine(1980)	Shallow landslides and debris flow	$I = 14.82D^{-0.39}$	$0.167 < D < 500$
Innes(1983)	Debris flow	$I = 4.93D^{-0.50}$	$0.1 < D < 100$
Clarizia et al.(1996) ²³⁾	Soil slip	$I = 10.00D^{-0.77}$	$0.1 < D < 1,000$
Crosta and Frattini(2001)	Shallow landslides	$I = 0.48 + 7.20D^{-1.00}$	$0.1 < D < 1,000$
Cannon and Gartner(2005)	Debris flow	$I = 7.00D^{-0.60}$	$0.1 < D < 3$

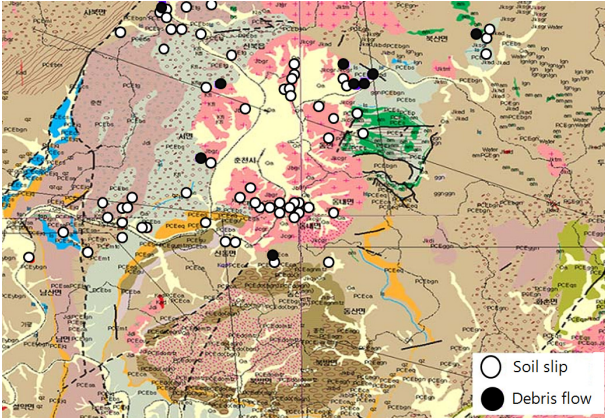


Fig. 8. 81 Landslides at Chuncheon (2011 year).

으며, 인공사면에서의 사면붕괴는 화성암과 변성암지역에서 골고루 발생하였으나, 자연사면의 경우에는 변성암지역에서의 사면붕괴가 화성암지역보다 약 3배정도 많이 발생하였다. 특히 토석류의 경우는 화성암지역에서는 1건에 불과하였지만, 변성암지역에서는 8건이 발생하여 토석류의 발생이 주로 변성암지역에서 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 강우 현황

본 절에서는 2011년 7월 27일 오전 1시경 발생한 춘천시 산사태에 대한 강우현황을 분석하였다. 먼저 춘천 강우관측소에서 측정된 일일강우량, 3일 선행강우량 및 7일 선행강우량을 Fig. 9에 나타내었다. 7월 한 달 동안의 강우현황을 보면 7월 23일 7 mm, 25일 3 mm의 강우가 존재하였으나, 이 강우로 인한 영향은 미미할 것으로 판단된다. 특히 산사태가 발생한 7월 27일의 3일 선행강우량과 7일 선행강우량이 매우 적은 값을 보이므로, 발생한 산사태는 선행강우에 의한 영향을 받은 것으로 보기 어렵다. 따라서 7월 27일 발생

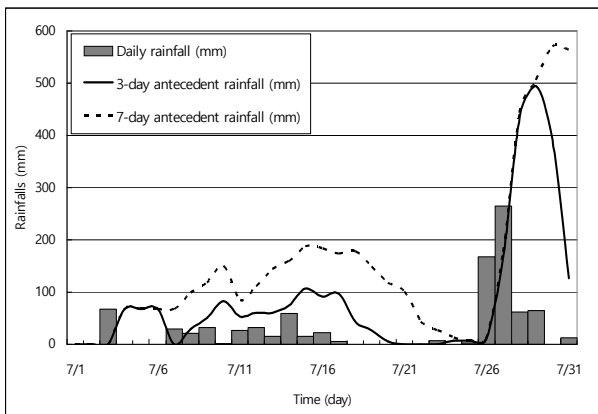


Fig. 9. Comparison with rainfalls during July 2011 at Chuncheon.

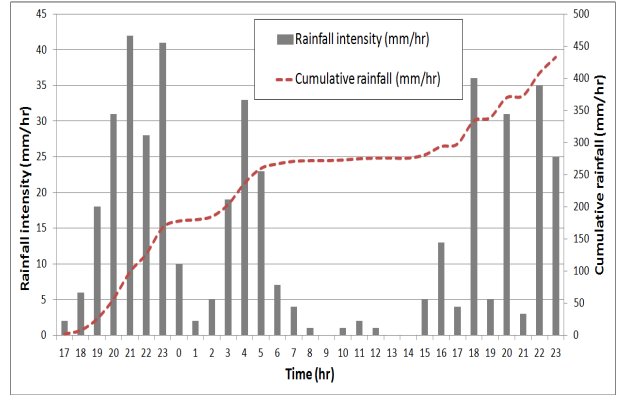


Fig. 10. Rainfall intensity and cumulative rainfall of landslides on July 2011.

한 산사태는 26일부터 발생한 강도 높은 강우 사상에 의해 발생되었다고 판단할 수 있으며, 7월 26일 오후 5시부터의 강우강도를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11을 보면 산사태가 발생한 것으로 추정되는 7월 27일 오전 1시를 기준으로 시간최대강우량이 42 mm/hr이고, 8시간(26일 오후 5시~27일 오전 1시) 누적강우량은 178 mm이다. 이와 같은 강우량은 시강우량 경보기준인 30 mm를 초과하고 연속강우량 주의보 기준인 100~200 mm에 포함된다. 또한 26일 일강우량은 168 mm로 이 역시 산사태 경보 기준에 해당되는 강우사상이 존재하였음을 확인할 수 있다.

4. 발생지점에 대한 I-D-F 분석

4.1 크리깅 방법에 의한 토석류 발생지점별 강우량의 추정 및 결과

본 절에서는 앞서 분석된 2011년 춘천시 산사태 발생 현황 및 강우분석 자료를 활용하여 발생지점에 대한 강우강도(intensity)-지속기간(duration)-발생빈도(frequency) 분석(I-D-F분석)을 수행하였다. I-D-F 분석을 위해서는 티센(Thiessen) 방법 등을 이용하여 몇 개의 강우관측소로부터 면적평균강우량을 구하는 것이 일반적이나, 강원 지역과 같은 산간지역에서는 강우의 공간적 변동성이 심하므로 본 연구에서는 면적평균강우량을 구하지 않고 크리깅(kriging)방법을 사용하여 산사태 발생지점에 대한 강우자료를 별도로 추정하였다. 이와 같은 크리깅 방법에 의해 추정된 발생지점에서의 강우량 자료는 산사태 발생지점 각각에 대한 I-D-F 분석이 가능하므로, 개발 지점에 대한 빈도개념의 분석이 가능한 장점이 있다.

다만, 2011년 춘천시 산사태 발생지점인 81개소에 대해 모두 크리깅 방법을 수행하기 위해서는 상당한 양의 자료를 처리해야 하는 한계가 있으므로, 큰 피해

를 유발할 가능성이 많은 토석류 발생지점 8개(1개 지점 중복)에 대해서만 개별적 분석을 수행하였다.

크리깅은 관측점이 불규칙한 경우에 등고선이나 곡면의 보간에 유용하며, 특정 지점에서의 어떤 값을 알고 있는 경우 이를 사용하여 알고자 하는 지점의 어떤 값을 식 2와 같은 가중선형조합으로 예측하는 방법이다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (2)$$

여기서, z^* 는 위치가 알려진 지점에서 크리깅을 이용한 예측치, z_i 는 이미 그 위치와 값을 알고 있는 주위의 자료값, λ_i 는 각 자료의 가중치, 그리고 n 은 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총개수이다. 크리깅 기법의 종류에는 모집단의 유무에 따라 단순크리깅(simple kriging), 정규크리깅(ordinary kriging), 범용 크리깅(universal kriging) 등의 방법이 있으나, 본 연구에서는 적용절차가 가장 간단한 단순 크리깅 방법을 사용하였다. 단순 크리깅은 예측오차를 최소로 하는 가중치를 구하여 사용하며, 이때의 예측오차는 다음과 식 3과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_{SK}^2 = E[(z_0 - z_0^*)^2] \quad (3)$$

여기서, z_0 은 예측하고자 하는 참값, z_0^* 은 단순크리깅에 의한 예측값이다. σ_{SK}^2 는 오차분산을 나타내며 이를 최소로 하는 가중치들을 최종적으로 결정한다. z_0 은 x_0 위치에서의 특성값으로 $z(x_0)$ 을 간단히 표시한 것이다. 여기서 x 는 위치를 나타내는 위치벡터로 기하학적 차원에 따라 위치성분을 모두 포함한다. 식 3을 전개하면 분산(variance)와 공분산(covariance)의 관계식을 유도할 수 있으며, 여기에 식 2를 대입하여 정리하면 최종적으로 다음의 식 4를 얻을 수 있다.

$$\sigma_{SK}^2 = \sigma^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \sigma_{ij}^2 \quad (4)$$

여기서 $\sigma^2 = Var(z_0)$, $\sigma_{0i}^2 = Cov(z_0, z_i)$, $\sigma_{ij}^2 = Cov(z_i, z_j)$ 이며, 식 4를 각각의 가중치에 대해 편미분하고 극값을 구함으로써 오차분산이 최소가 되는 각각의 가중치를 산정할 수 있다. 본 연구에서는 단순 크리깅 방법을 사용하기 위하여 먼저 11개의 강우관측소(춘천 강우관측소 및 10개 지자체 강우관측소)와 81개 산사태 발생지점 중 중복되는 지점을 제외한 65개 지점에 대한 거리를 GPS좌표값을 이용하여 산정하였다. 또한 2011년 7월

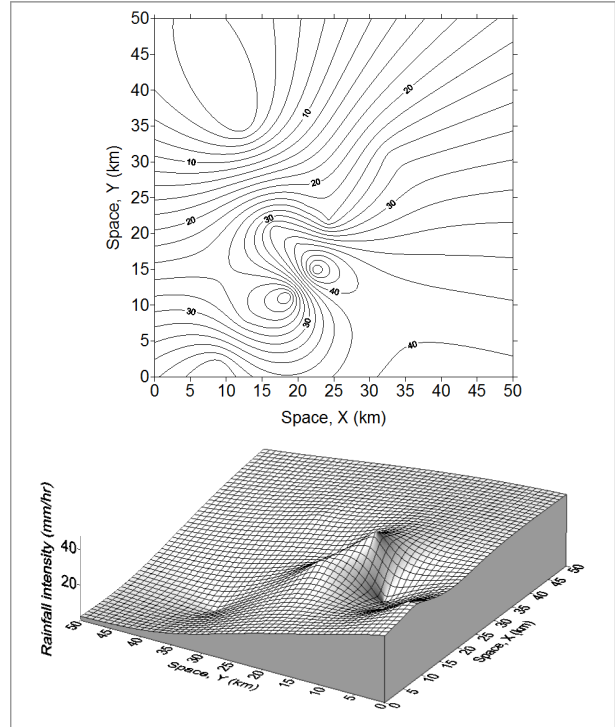


Fig. 11. Result of kriging using rainfall on July 2011.

26일 오후 5시부터 2011년 7월 27일 오전 10시까지 매 시간별로 단순 크리깅에 의한 지점별·시간별 강우량을 추정하였다. 예로써 Fig. 11에는 시간최대 강우가 발생한 2011년 7월 26일 오후 9시 강우사상에 대한 단순 크리깅 결과를 나타내었으며, 앞서 산정된 거리를 좌표화하여 8개 발생지점에 대한 강우자료를 단순크리깅 결과로부터 추출하였다.

이와 같은 크리깅 방법에 의한 산사태 발생지점에서의 강우량 추정은 전국 단위에서는 많은 시간이 소요되므로 현실적인 적용이 어려울 것으로 판단되나, 지방자치체의 관할 구역과 같은 작은 공간에서는 적용 가능성이 있고, I-D-F 관계의 규명을 위해서는 효율적으로 사용될 수 있다.

4.2 I-D-F 곡선의 작성 및 결과

발생빈도(frequency)가 같은 조건에서 강우의 지속시간이 증가하면 일반적으로 강우강도는 감소한다. 재현기간별 강우강도식은 이와 같은 강우강도, 지속기간 및 발생빈도의 관계를 나타내며, 도로의 암거, 도시지역의 우수관거, 배수관거 등을 설계함에 있어 이 식을 사용하여 설계강우량을 산정하게 된다. 즉 산사태 발생지점에 대한 I-D-F 관계식을 파악할 수 있다면, 이 지역에 필요한 각 중 수공구조물의 설계 및 토석류 발생에 대비하기 위한 구조물의 설계에 유용할 수 있다.

I-D-F 관계식은 일반적으로 Talbot형, Sherman형 등으로 구분되며 식에 존재하는 상수는 각각의 지역에 대해 확률적 방법으로 추정된다. 건설교통부²⁴⁾에서는 전국 22개 관측소 강우자료를 빈도분석(frequency analysis)하여 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$I(T, t) = \frac{a + b \times \ln(T/t^n)}{c + d \times \ln(\sqrt{T}/t) + \sqrt{t}} \quad (5)$$

여기서, T 는 재현기간(또는 발생빈도)이며, t 는 강우의 지속기간이다. 또한 a, b, c, d, n 은 통계적으로 추정된 지역적 특성을 나타내는 상수로서, 건설교통부는 춘천에 대한 상수값으로 $a = 172.6329, b = 82.6687, c = 0.0555, d = 0.1444, n = -0.0073$ 을 제시한 바 있다.

따라서 본 연구에서도 건설교통부가 제시한 식 5와 각각의 상수값을 활용하여 춘천지역에 대한 I-D-F 곡선을 작성하고, 이 곡선 위에 크리깅 방법에 의해 추정된 2011년 7월 26일부터 27일까지의 산사태 발생시간에 대한 곡선을 8개의 토석류 발생지점에 대해 나타내었다. Fig. 12의 서면 1은 서상리, 서면 2는 현암리이며, 신북읍 1은 천전리 산72-1, 신북읍 2는 천전리 산68-1, 신북읍 3은 유포리를 나타낸다. Fig. 12에서 보면 1시간 지속되는 강우로 볼 때, 2011년 발생한 강우는 대부분 2년~10년의 빈도를 가지고 있음을 알 수 있으며, 특히 서면 서상리와 신북읍 유포리의 경우는 2년 빈도도 되지 않는 강우임을 알 수 있다. 또한 일반적으로 홍수피해의 양상을 설명하는 데 사용되는 24시간을 기준으로 볼 때, 대부분의 지역에서의 발생빈도가 10년에서 70년 빈도를 가지고 있는 것으로 분석되었으나, 사북면과 신북읍 유포리의 경우는 2년 빈도의 강우를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 즉 이와 같은 분석결과로 볼 때, 사북면과 신북읍 유포리는 2년 빈도 미만의 강우에서도 토석류가 발생할 수 있으므로, 관련 시설의

설계빈도를 2년 미만으로 설계하여 산사태의 피해에 대응할 필요가 있으며, 나머지 지역에서도 각각의 지역에 적합한 10년에서 70년 빈도의 강우에 대해 관련 시설을 정비할 필요가 있음을 제시할 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 2011년 큰 재해가 발생한 바 있는 춘천시 지역을 중심으로 과거 2002년부터 2011년까지의 10년간의 강우자료를 활용하여 춘천시 지역에서 산사태를 발생시킬 수 있는 산사태 유발강우의 특성을 분석하였다. 특히 산사태의 유발강우를 분석함에 있어 물리적 방법이 아닌 통계적 기법을 활용하여, 춘천시 지역에 대한 강우강도-강우 지속기간 간의 관계를 도출하였다. 또한 2011년 산사태 발생지점에 대한 강우량을 추정하기 위하여 크리깅 방법을 사용하였으며, 그 결과를 활용하여 8개의 토석류 발생지점에 대한 I-D-F분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 몇 가지 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 산사태와 관련된 자료를 효과적으로 분석하기 위해 가장 기초가 되는 것은 신뢰도 높은 자료이다. 따라서 향후에는 산사태의 방지와 관련된 각 주무부처간 협업을 통하여 통합된 체계를 구축하고, 개별 연구사업이나 조사사업을 통해 수집되는 산사태 관련 자료를 표준화하여 관리할 필요가 있다.

둘째, 과거 10년 동안 춘천시의 강우특성을 분석한 결과, 7일 선행강우량이 400 mm에 인접하거나 초과하는 경우에는 춘천시 지역에서 다량의 산사태가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 7일 선행강우량을 현재의 기준과 함께 추가적인 기준으로 사용한다면, 다수의 재해에 사전에 대비할 수 있으며, 재해의 예방에 필요한 시간확보도 가능하다는 측면에서 상당히 유용할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 산사태는 발생 개소 수가 적어도 많은 인명피해를 발생시킬 수 있으므로, 현재의 단일한 산사태 주의보 및 경보기준에 대한 지역적 차별화를 위한 연구를 수행할 필요가 있다. 춘천시의 경우에는 과거 일부 지점에서 주의보와 경보 기준에 미치지 못하는 강우에도 불구하고 산사태가 발생한 바 있으며, 특히 3일 선행 강우량이 4 mm에 불과한 경우라도 일일강우량이 100 mm를 초과하면 산사태가 발생했던 자료도 있어 일일강우량에 대한 자료의 관리 및 이를 활용한 산사태의 대비가 중요함을 알 수 있었으며, 주의보 및 경보 기준을 일정 정도 하향조정하는 방안도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

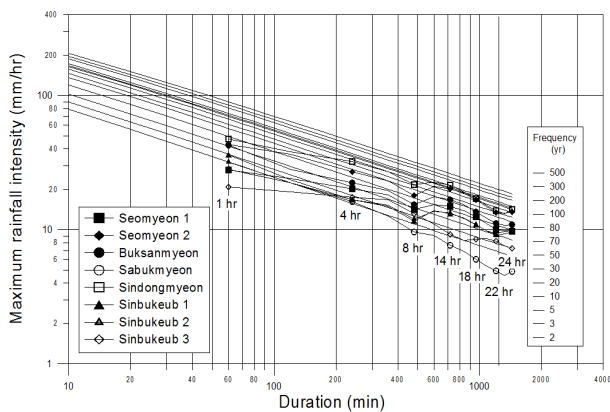


Fig. 12. Results of I-D-F analysis at Chuncheon.

넷째, 춘천시에서의 산사태를 유발시킬 수 있는 유발강우의 강우강도-강우 지속시간의 관계는 $I = 13.2644D^{-0.4519}$ 의 관계를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 이와 같은 강우강도-강우 지속시간의 관계를 활용한 산사태 경보기준을 마련하면, 현재의 기준이 반영하고 있지 못한 강우의 지속시간에 따른 재해위험을 판단할 수 있는 기회를 제공할 수 있을 것이다.

다섯째, 2011년 춘천에서 발생한 대규모 산사태는 선형강우보다는 재해 발생일의 일일강우량과 최대시간강우량에 의해 발생되었음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 크리깅 방법을 적용하여 2011년 토석류가 발생한 8개 지점의 개별적이 강우를 추정하고 이를 활용하여 I-D-F분석을 수행한 결과, 사북면과 신북읍 유포리에서는 2년 빈도 미만의 강우에서도 토석류가 발생할 수 있는 가능성이 높음을 알 수 있었으며, 그 외 지역에서는 10년에서 70년 사이의 빈도를 가지는 강우사상에 의해 산사태가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 향후 산사태 방지와 관련된 시설물의 계획에 있어 본 연구를 통해 분석된 I-D-F 분석 결과를 활용하면 시설물의 설계에 효율적으로 활용될 수 있음을 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 바탕으로 향후에는 산간지역의 강우자료 추정에 있어 인공신경망 분석(artificial neural network analysis)이나 클러스터 분석(cluster analysis)와 같은 최신의 방법을 적용하여 내삽의 정확도를 제고시킬 필요가 있으며, 통계적 방법의 적용에 따른 불확실성 분석을 추가로 수행할 필요가 있다. 또한 자료의 취득에 있어서도 춘천시 지역의 산사태 자료를 지속적으로 취득할 수 있는 체계를 구축함으로써 최신의 자료를 반영한 결과를 도출할 필요가 있다.

Acknowledgement: This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2021R1F1A1047623 and 2016R1D1A1B02012110). 이 연구는 한국연구재단의 2021년 기초연구사업(과제번호: 2021R1F1A1047623) 및 이공학 개인기초연구(과제번호: 2016R1D1A1B02012110)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사를 표합니다.

References

1) N. Caine, "The Rainfall Intensity-duration Control of Shallow Landslides and Debris Flow", *Geografiska Annaler*, 62A, pp. 23-27, 1980.

2) J. L. Innes, "Debris flow", *Prog. Phys. Geogr.*, Vol. 7, pp. 469-501, 1983.

3) G. B. Crosta, "Regionalization of Rainfall Thresholds: An Aid to Landslide Hazard Evaluation", *Environmental Geology*, Vol. 35, pp. 131-145, 1998.

4) G. B. Crosta and P. Frattini, "Rainfall Thresholds for Triggering Soil Slips and Debris Flow" *Proc. of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms: Publication CNR GNDICI*, Vol. 2547, pp. 463-487, 2001.

5) S. H. Cannon and J. E. Gartner, "Wildfire-related Debris of a Precipitation Threshold for Anticipating the Occurrence of Landslides in the Seattle", *Washington, USGS Open-file Report*, pp. 03-463, 2005.

6) M. T. Brunetti, S. Peruccacci, M. Rossi, S. Luciani, D. Valigi and F. Guzzetti, "Rainfall Thresholds for the Possible Occurrence of Landslides in Italy", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 447-458, 2010.

7) F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi and C. P. Stark, "The Rainfall Intensity-duration Control of Shallow Landslides and Debris Flow: An Update", *Landslides*, Vol. 5, pp. 3-17, 2008.

8) S. K. Kim, W. P. Hong and Y. M. Kim, "Prediction of Rainfall-triggered Landslides in Korea", *Landslides*, Vol. 2, pp. 989-994, 1991.

9) K. Choi, "Landslide Prevention and Measures", *Research Information of Korea Forestry Research Institute*, Vol. 27, pp. 1-3, 1989.

10) W. P. Hong, S. G. Kim, M. Kim, Y. W. Kim and J. G. Han, "Prediction of Slope Activity in Korea due to Rainfall", *Journal of the Korean Society of Soil Engineers, Korean Society of Soil Engineers*, Vol. 6, No. 2, pp. 55-63, 1990.

11) I. T. Yang, J. K. Park, W. H. Jeon and K. S. Chun, "An Evaluation of Landslide Probability by Maximum Continuous Rainfall in Gangwon, Korea", *Journal of The Korean Society for Geo-Spatial Information System*, Vol. 15, No. 4, pp. 11-20, 2007.

12) C. Y. Yune, K. J. Jun, K. S. Kim, G. H. Kim and S. W. Lee, "Analysis of Slope Hazard-Triggering Rainfall Characteristics in Gangwon Province by Database Construction", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 10, pp. 27-38, 2010.

13) C. S. Yoo, K. W. Kim, S. J. Kim and M. S. Lee, "Analysis on Characteristics of Sediment Produce by Landslide in a Basin 1. Simulation of Sediment Produce and its

- Verification”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 3, pp. 147-154, 2010.
- 14) S. W. Lee, G. H. Kim, C. Y. Yune, H. J. Ryu and S. J. Hong, “Development of Landslide-Risk Prediction Model thorough Database Construction”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 23-33, 2012.
 - 15) C. Y. Oh and K. W. Jun, “Analysis of Landslide and Debris Flow Hazard Area using Probabilistic Method in GIS-based”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 26, No. 6, pp. 172-177, 2012.
 - 16) D. Salciarini, J. W. Godt, W. Z. Savage, P. Conversini, R. L. Baum and J. A. Michael, “Modelling Regional Initiation of Rainfall-induced Shallow Landslides in the Eastern Umbria Region of Central Italy”, *Landslides*, Vol. 3, pp. 181-194, 2006.
 - 17) S. Simoni, F. Zanotti, G. Bertoldi and R. Rigon, “Modeling the Probability of Occurrence of Shallow Landslides and Channelized Debris Flows using GEOtop-FS”, *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 532-545, 2008.
 - 18) M. Safaei, H. Omar, B. K. Huat, Z. B. M. Yousof and V. Ghiasi, “Deterministic Rainfall Induced Landslide Approaches: Advantage and Limitation” *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 16, pp. 1619-1650, 2011.
 - 19) D. Salciarini, C. Tamagnini, P. Conversini and S. Rapinesi, “Spatially Distributed Rainfall Thresholds for the Initiation of Shallow Landslides”, *Natural Hazards*, Vol. 61, pp. 229-245, 2012.
 - 20) J. S. Lee, C. G. Song, H. T. Kim and S. O. Lee, “Effect of Land Slope on Propagation due to Debris Flow Behavior”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 30, No. 3, pp. 52-58, 2015.
 - 21) J. S. Lee, C. G. Song and S. O. Lee, “Analysis of Characteristics of Debris Flow with Angle of Slope”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 31, No. 2, pp. 49-56, 2016.
 - 22) Y. H. Kim and K. W. Jun, “Analysis of Debris Flow Disaster Area According to Location Change of Check Dam using Kanako-2D”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 33, No. 1, pp. 128-134, 2018.
 - 23) M. Clarizia, G. Gulla and G. Sorbino, “Sui meccanismi Di Innesco Dei Soil Slip” *International Conference Prevention of Hydrogeological Hazards: the Role of Scientific Research*, Vol. 1, pp. 585-597, 1996.
 - 24) Ministry Of Construction and Transportation, “Research Report on Water Resource Management Technique Development”, 2000.