

토석류의 거동 특성 및 유발강우에 관한 연구

A Study on Behavior Characteristics and Triggering Rainfall of Debris Flow

장 창 봉¹⁾ · 최 영 남²⁾ · 유 남 재[†]

Changbong Jang · Youngnam Choi · Namjae Yoo

Received: September 29th, 2016; Revised: October 13th, 2016; Accepted: November 30th, 2016

ABSTRACT : In this study, the behavior characteristics and triggering rainfall of debris flow were investigated on the basis of DB constructed by performing field investigation and collecting the rainfall data at the sites where debris flow occurred around the west of Gangwon and adjacent areas during the last 10 years. For hill slope and channelized type of debris flow, its behavior characteristic was analyzed through runout channel of debris flow divided into zone of initiation, transportation and deposition and its magnitude was estimated by considering erosion at zones of initiation and transportation. Some considerations related to establishment of landslide forecasting criterion were raised by comparing the analyzed results of analysis of rainfall at the time of debris-flow occurrence with the previous researches about the triggering rainfall of debris flow. In addition, an ID curve of inducing debris flow adequate to the investigated site was proposed and compared with results of previous study.

Keywords : Debris flow, Field investigation, Types of debris flow, Behaviour characteristics, Magnitude, Triggering rainfall, ID curve

요 지 : 본 연구에서는 최근 10년 동안 강원도 영서와 인접지역에서 토석류가 발생한 지역에 대해 현장조사를 실시하고 강우자료를 수집하여 구축한 D/B를 바탕으로 토석류의 거동 및 강우특성을 조사하였다. 사면형과 계곡형의 토석류 종류에 따라 발생부, 유하부, 퇴적부로 구별되는 토석류 진행구간에 대해 토석류 거동특성을 분석하였으며 발생부 및 유하부의 침식 상태를 고려하여 토석류 규모를 산정하였다. 토석류 발생 당시의 강우자료 분석을 통해 토석류 유발 강우 기준에 대한 선행연구와 비교·분석하여 예경보 기준 정립에 고려할 사항을 제시하였다. 또한, 조사지역에 적합한 토석류 유발강우 ID 곡선을 제안하여 기존의 연구결과와 비교·분석하였다.

주요어 : 토석류, 현장조사, 토석류 종류, 거동 특성, 규모, 유발강우, ID 곡선

1. 서 론

기후변화로 인한 집중호우 및 국지성호우의 증가로 2002년부터 2014년까지 우리나라의 연평균 산사태 피해면적은 666ha이며, 사망 9명, 905억 원(피해복구액 기준)의 재산피해로 인해 국가적으로 큰 손실을 입고 있다(Korea Forest Service, 2016). 특히, 2011년부터 2014년까지 발생한 사면재해 185개소를 유형별로 분석한 결과, 토석류는 77개소(41.6%)로 나타나 사면재해에 있어 토석류에 의한 피해가 큼을 알 수 있다(Jun & Yune, 2015).

토석류 재해에 관한 본격적인 연구는 2011년 우면산 산사태 이후로 토석류 발생 예측 및 대책수립이 주요사항이다. 토석류 발생을 예측하기 위해서는 발생 지역에 대한 현

장조사를 통해 토석류 유발조건들을 파악하여 발생원인에 대한 규명이 필요하다. 토석류의 진행경로 발생부, 유하부 그리고 퇴적부의 특성은 토석류 예방 대책수립에 있어 중요한 자료가 되지만, 토석류 발생 시 응급복구로 인하여 현장 현황의 보전이 쉽지 않기 때문에 토석류 진행 전 구간에 대한 현장 정밀조사에 의한 의미 있는 자료의 확보가 어려운 것이 현실이다.

사면재해 현장조사를 통해 발생지역의 지형적 특성 및 강우특성을 분석한 연구는 Yoo et al.(2012), Yune et al.(2010) 그리고 Jun & Yune(2015) 등과 같이 많은 사례들이 있지만, 토석류와 산사태는 Kang et al.(2015)의 연구에서처럼 발생지역의 지형적 특성이 다르기 때문에 조사 및 분석에 있어 서로 구분되어야 한다.

1) Administrator Sam Kyung Co., Ltd.

2) Civil Engineering, Kangwon National University

† Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : njyoo@kangwon.ac.kr)

국내에서 토석류를 대상으로 수행한 연구는 Kim(2008)이 고속도로에 피해를 유발한 토석류에 대한 연구와 Jun et al.(2013)이 2002년부터 2006년까지 강원도 영서지역에서 발생한 토석류로 현장조사를 통해 발생부 및 유역의 특성과 재해 당시의 경우자료를 수집하여 분석하였다.

본 연구에서는 2006년 이후 강원도 영서지역 및 인근지역에서 발생한 토석류 현장의 발생부, 유하부 그리고 퇴적부를 조사하여 토석류의 거동특성에 대한 DB를 구축하고 분석을 실시하였다. 또한, 토석류 유발강우의 특성에 대하여 토석류 발생 당시의 경우자료 분석을 통하여 토석류 산사태 유발 예·경보 기준에 대한 고려 사항을 제안하였으며 조사지역에 적합한 토석류 유발강우 ID 곡선을 제안하고 기존의 연구결과와 비교·검토하였다.

2. 조사대상지 현황 및 특성

본 연구는 2006~2013년까지 여름철 집중호우와 태풍으로 인하여 발생한 토석류 발생지역을 대상으로 토석류 발생 및 진행된 전 구간에 대한 조사를 실시하였다. 조사대상지는 총 45개소로 Table 1과 같이 지역별로 정리하였다. 조사대상지는 강원도 영서지역, 경기도 동부지역, 충청북도 북부지역에 분포한다.

토석류의 형태는 사면형 토석류(Hill slope debris flow)와 계곡형 토석류(Channelized debris flow)로 구분할 수 있다. 사면형은 자연사면이나 인공사면에서 토석류가 시작되어 진행하다가 비탈면의 경사가 급격히 완화되면서 퇴적되는 토석류를 의미하며, 계곡형은 계곡의 하상이나 측면을 침식 및 세굴시키거나 사면형 토석류가 퇴적되지 않고 계곡으로 유입되어 진행되는 토석류를 의미한다(Evans, 1982). 토석류가 사면형으로 발생하더라도 토석류가 계곡으로 유입되

Table 1. The status of debris flow occurrence and field investigation area

Occurrence year	Area	Number of occurrence	Type	
			Channelized	Hill slope
2006	Inje	15	14	1
2009	Jecheon	4	2	2
2010	Yangpyeong	1	1	-
	Yeosu	1	1	-
2011	Chuncheon	9	3	6
2013	Chuncheon	7	4	3
	Hongcheon	5	2	3
	Hoengseong	2	2	-
	Gapyeong	1	-	1
Total		45	29	16

기 때문에 사면형보다는 계곡형이 더 많이 관찰되었으며, Kim (2008)이 2002~2006년까지 고속도로에 피해를 입힌 토석류를 조사한 결과에서도 48개소 중 46개소가 계곡형으로 나타났다. 본 연구지역에서도 계곡형 토석류가 사면형 토석류보다 2배 정도 많이 발생한 것으로 나타났다.

3. 토석류 거동 분석

3.1 발생부 사면경사

국내에서 발생하는 토석류 대부분은 기반암 상부 풍화암 내의 토사 지층이 파괴되어 발생하므로 암반사면의 파괴형태와는 차이를 보인다.

사면 경사는 사면파괴의 가장 중요한 요소 중 하나로 자연사면의 경사 40° 이상 급경사면은 암반노두가 발달되어 있고, 토사층의 심도도 깊지 않기 때문에 심한 풍화암반이 아닌 경우를 제외하고 토석류는 거의 발생하지 않는다(Kim et al., 2000).

발생부의 사면경사는 Fig. 1과 같이 연구지역 중 73%가 40° 이하에서 발생하였으며, 토석류 발생 평균경사는 37°로 나타나 Jun et al.(2013)이 분석한 강원도 영서지역의 토석류 발생부 경사의 평균값 34.3°와는 다소 차이를 보지만, 38°에서 가장 높은 빈도가 나타나는 결과와는 유사하여 토석류는 30~40° 사이의 경사에서 주로 발생하는 것으로 판단된다.

3.2 유하부

토석류가 발생하면 일반적으로 계곡으로 이루어진 유하부를 따라 이동하며, 유하부의 경사가 6~12° 이하의 완만한 경사가 되면 퇴적되기 시작한다(Ikeya, 1989). 본 연구에서는 유하부를 따라 이동하며 조사한 경사, 침식 폭, 심도 등을 통해 이동 특성 및 토석류 발생규모를 조사하였다.

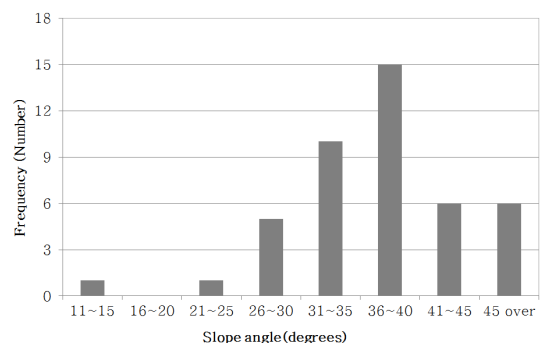


Fig. 1. Occurrence frequency of slope angle at initiation zone

3.2.1 경사

토석류 유하부의 평균경사는 24°로 조사되었으며, 발생 형태별로 계곡형은 평균 26°, 사면형은 평균 22°로 나타나 계곡형이 사면형에 비해 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, Fig. 2와 같이 유하부 경사는 10~59°의 범위를 가지고 10~20° 범위의 경사에서 약 40%, 20~30°의 범위도 약 38%로 나타나 유하부는 주로 10~30°의 경사를 가지는 것으로 나타났다.

3.2.2 이동거리

토석류의 이동거리 예측을 위한 수학적 모형은 퇴적지형과 토석류 양을 이용한 모형이 있으며(Hungr et al., 1984; VanDine, 1996; Rickenmann, 1999, 2005), 토석류의 유속, 유로경사, 마찰경사, 토석류 수심 등을 고려한 동력학적 모형이 있다(Cannon & Savage, 1988; Takahashi, 1991; Lo, 2000). 이러한 모형은 수치해석기법에 기반한 S/W를 사용하여야 하지만 본 연구에서는 지형적 특성만을 이용하고 특별한 고려사항이 없어 적용이 간편한 Sled 모형(Sassa, 1988)을 적용하여 연구대상지의 토석류 이동거리 특성을 분석하였다.

Sled 모형은 토석류의 수평이동거리(L)에 대한 토석류 발생점과 퇴적점의 표고차(H)의 비로 순효율(Net efficiency)을 산정하여 시작점과 퇴적점의 좌표만을 이용한다. 따라서 토석류의 시작점과 퇴적이 시작되는 위치의 고도차, 수평이동거리 그리고 실제이동거리를 측정된 결과를 통해 순효율을 산정하고 이들의 관계를 분석하였다.

Fig. 3은 고도차를 나타낸 것으로 계곡형은 평균 153m, 사면형은 평균 50m의 고도차를 보이고 계곡형이 사면형에 비해 약 3배 정도 큰 것으로 나타났다. Fig. 4는 수평이동거리를 나타낸 것으로 계곡형은 평균 499m, 사면형은 평균 155m를 이동하였으며, 고도차와 유사하게 계곡형이 사면형에 비해 약 3.2배 높게 나타났다.

Fig. 5는 실제이동거리를 나타낸 것으로 계곡형은 평균 527m, 사면형은 평균 166m로 나타나 수평이동거리 보다 각각 28m, 11m의 차이를 보였으며, 계곡형과 사면형의 차

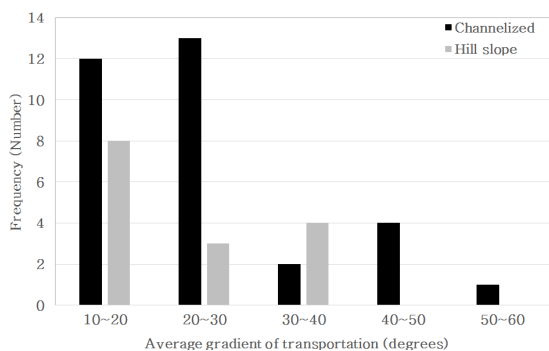


Fig. 2. Occurrence frequency of average gradient of transportation

이는 수평이동거리와 유사한 약 3.2배의 차이를 보였다.

순효율 분석결과는 Fig. 6과 같으며 주로 2에서 9 사이에 분포하고 대푯값은 3.6으로 나타났다. 사면형은 3.5, 계곡형

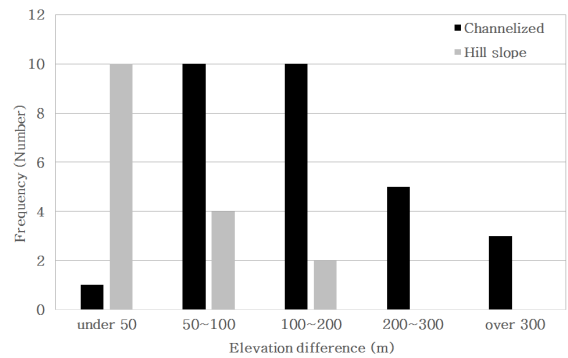


Fig. 3. Occurrence frequency of elevation difference

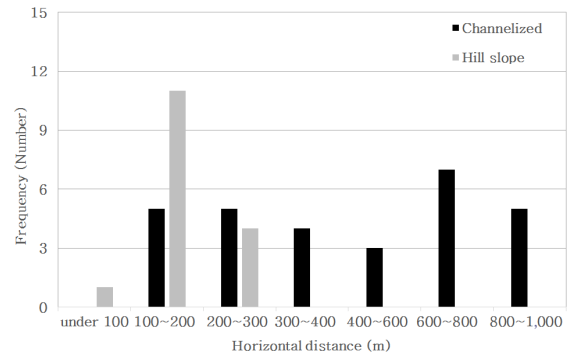


Fig. 4. Occurrence frequency of horizontal distance

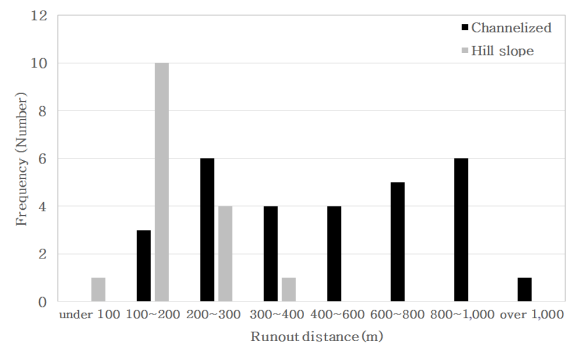


Fig. 5. Occurrence frequency of runout distance

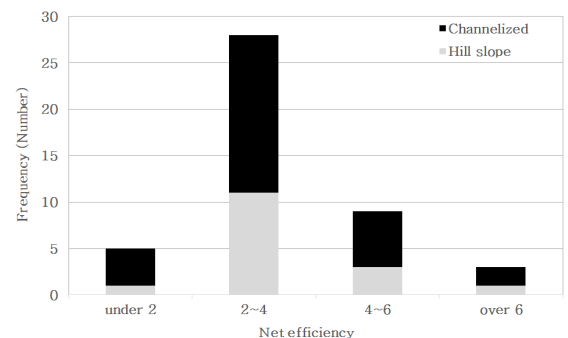


Fig. 6. Occurrence frequency of net efficiency

은 3.6으로 나타나 발생형태에 따른 순효율의 차이는 적은 것으로 판단된다.

Choi & Paik(2012)은 순효율을 지역별로 제안하여 춘천은 1~4, 인제는 4~9의 범위에서 분포한다 하였으며, Yu(2015)는 홍천지역의 사면형 토석류에 대한 순효율이 1.5~3.5의 범위를 가지며 평균 2.4라 하였다. 본 연구의 춘천, 인제, 홍천지역도 선행연구자들이 제시한 값과 유사한 범위로 나타났다지만, 좀 더 많은 데이터를 바탕으로 지역, 지형 그리고 지질 등과 같은 요인과의 상관성 분석을 통한 대푯값 산정이 필요할 것으로 생각된다.

3.2.3 규모

토석류의 발생 규모는 임의의 지점을 통과한 유출량(discharge)과 임의의 지점에 퇴적된 토석량 그리고 피해규모 등과 같이 서로 다르게 정의되지만, 일반적으로 퇴적된 토석류의 부피로 토석류의 발생 규모를 정의한다(Jakob, 2005; D'Agostino & Marchi, 2001).

Kim et al.(2008)은 침식을 개념을 적용하여 토석류 규모를 산정하여 발생인자들의 상관성을 분석하였다. 침식률은 토석류가 발생한 계곡의 길이, 폭, 침식 깊이 및 퇴적깊이를 위치별로 적용하여 토석류의 양을 추정하는 방법이다(Hungr et al., 1984). 본 연구에서도 토석류 발생부에서 유하부를 따라 침식된 길이, 폭, 깊이를 측정하여 토석류 발생 규모를 추정하였다.

토석류 규모는 Fig. 7과 같이 2,000m³ 이하의 규모가 가장 많았으며, 10,000m³의 규모도 상당부분 차지하고 있다. 또한, 계곡형 토석류는 평균 6,345m³, 사면형 토석류 평균 874m³로 나타나 계곡형이 사면형에 비해 약 7배 정도 큰 것으로 나타났다. 계곡형의 경우 토석류의 진행 길이가 사면형에 비해 크고 사면에서 사면활동에 의해 소규모로 발생하더라도 토석류가 계곡에 진입하면서 계상 및 양안부를 침식하면서 규모가 급격히 증가하여 계곡형의 규모가 월등히 큰 것으로 판단된다. 하지만 2011년 춘천시 천전리에서 발

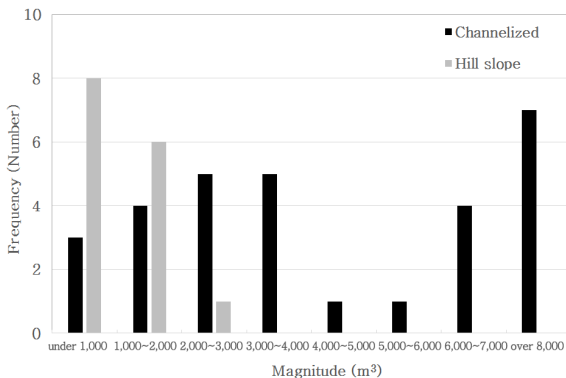


Fig. 7. Occurrence frequency of debris flow magnitude

생한 사면형 토석류의 경우 발생규모는 작지만 토석류의 이동거리가 짧고 순식간에 발생하기 때문에 많은 인명피해가 발생하여 사면형 토석류에 대한 관리도 필요하다.

3.3 퇴적부

3.3.1 퇴적 경사

VanDine(1996)는 토석류 퇴적 시작경사를 10°로 제안하였으며, 본 연구 지역의 퇴적경사는 Fig. 8에 보인 바와 같이 평균 10.1°로 나타나 VanDine(1996)이 제안한 퇴적경사와 유사한 것으로 나타났다. Hungr et al.(1984)는 토석류 형태를 구속수로와 개방형 수로로 구분하여 구속수로는 8~12°, 개방형수로는 10~14°로 제안하였다. Fig. 8은 연구지역에서의 구속수로와 개방형수로의 퇴적경사를 비교한 것으로 구속수로의 범위는 5~12°, 평균 9°로 나타났고 개방형수로의 범위는 8~17°, 평균 11°로 Hungr et al.(1984)가 제안한 범위에 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 수로경사비

Ikeya(1976, 1981)는 선상지의 경사가 10° 미만일 때 하향에 대한 상향 수로의 경사비(θ_u/θ_d)가 2보다 크면 토석류의 퇴적이 시작되고, 일반적인 수로경사비는 4로 제안하였다. 연구지역 중 퇴적경사가 10°도 미만일 경우의 수로경사비를 Fig. 9에 보인 바와 같이 나타낸 결과 Ikeya(1976)가

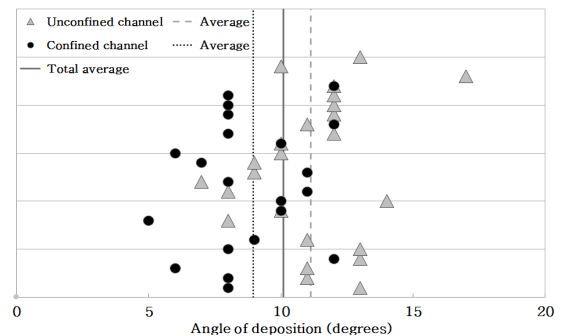


Fig. 8. Distribution of deposition angle

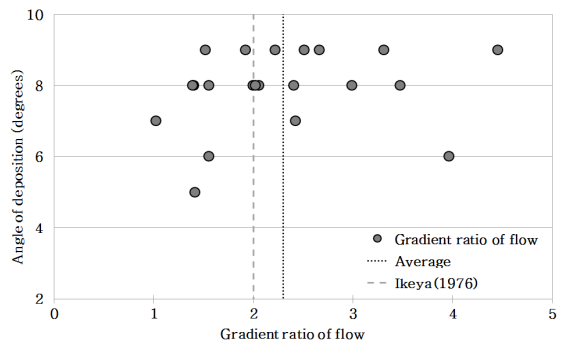


Fig. 9. Distribution of gradient ratio

제한한 2보다 다소 큰 2.3으로 나타났지만 일반적인 경우의 수로경사비 4보다는 작은 값으로 나타났다.

3.3.3 암종별 퇴적 경사

Fig. 10은 편마암과 화강암의 평균 퇴적경사를 도시한 것으로 편마암의 퇴적경사는 6~13° 범위로 측정되었으며, 평균 9.3°로 나타났다. 화강암의 퇴적경사는 7~17° 범위로 편마암의 퇴적경사보다 다양한 분포가 나타났으며, 평균 10.5°로 편마암에 비해 평균 퇴적경사가 약 1.2° 크게 나타났다. 편마암과 화강암의 평균 퇴적경사는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나 퇴적경사는 기반암의 분포와 같은 지질학적 차이보다는 지형 및 강우사상에 의한 원인이 더 큰 것으로 판단된다.

4. 유발강우

우리나라는 1988년부터 산사태 주의보 및 경보 기준을 산림청에서 Table 2와 같이 제시하여 활용하였으며, 2013년부터는 강우분포와 지질분포에 따라 11개의 권역으로 나누어 각 권역별 토양함수지수에 따라 주의보와 경보를 발효하는 것으로 개선되어 제시하였다.

국내의 산사태 유발강우에 대한 기존의 연구를 Table 3에 정리하였다. 연구지역 및 기상에 따라 차이를 보이며 시간강우량과 함께 선행강우량이 토석류 발생에 있어 중요한 인자로 제시되고 있다.

선행강우와 관련하여 Ham & Hwang(2014)은 개선된 산림청 기준을 평가한 결과 단기간 기록적인 폭우로 인한 산

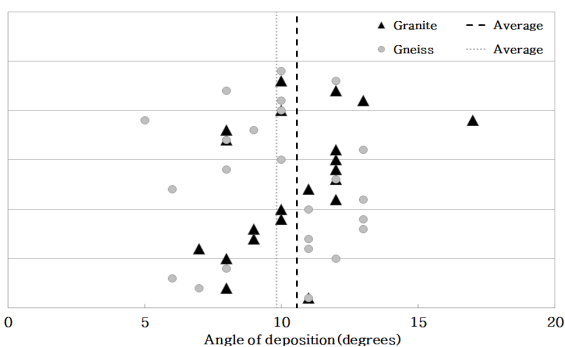


Fig. 10. Distribution of deposition angle with rock

Table 2. Landslide forecasting of Korea Forest Service (before 2013)

Division	Landslide warning	Landslide alert
Continuous rainfall	100~200 mm	200 mm 이상
Maximum hourly rainfall	20~30 mm	30 m
Daily rainfall	80~150 mm	150 mm 이상

사태 및 복합호우로 인한 산사태를 고려하기 위해서는 1일 강우량 기준은 다소 미흡한 점이 있음을 제안하였으며, Jun et al.(2013)은 발생 당일의 강우도 중요하지만 발생이전의 장기강우가 토석류 발생과 밀접한 관련이 있음을 제시하였다. 또한, Yoo et al.(2012)는 산사태 발생 당시 강우량과 발생 이전의 누적강우량(1일, 3일, 7일) 간의 상관성을 분석한 결과 3일 동안의 누적강우량이 산사태 발생에 밀접한 관계가 있다고 하였다.

이처럼 토석류 유발강우는 누적강우량과 최대강우 강도를 기준으로 분류하고 있으며, 본 연구에서는 산림청에서 제시한 예·경보 기준과 선행연구자들이 제시한 강우기준을 바탕으로 비교·분석하였다.

Table 3. Literature review for triggering rainfall of landslide

Year	Resear- chers	Areas	Contents
1989	Choi	Korea	<ul style="list-style-type: none"> • Continuous rainfall : 200 mm or more • Maximum hourly rainfall : 30 mm or more
1990	Hong et al.	Central, Yeongdong, Yeongnam, Honam	<ul style="list-style-type: none"> - Maximum hourly rainfall-Cumulative rainfall with magnitude • Small : 10 mm/h - 40 mm or more • Medium : 15 mm/h - 80 mm or more • Large : 35 mm/h - 140 mm or more
1991	Lee	Gangwon, Gyeonggi	<ul style="list-style-type: none"> • Daily rainfall : 200 mm • Rainfall intensity : 10 mm/h
1998	Kim	Yeoncheon, Cheorwon	<ul style="list-style-type: none"> • Landslides caused by torrential rain than the cumulative rainfall
2000	Kim & Jang	Daejeon, Chungcheongnam	<ul style="list-style-type: none"> • Hourly rainfall : over 25 mm • Daily rainfall : over 180 mm
2001	Han	Busan	<ul style="list-style-type: none"> • 90% or more of the landslide within 3 hours after recording maximum rainfall intensity
2006	Kim	Yangju, Pohang, Sangju	<ul style="list-style-type: none"> • Large amount of accumulated rainfall induces landslide • Correlation between accumulated rainfall and frequency of landslide occurrence
2007	Yang et al.	Gangwon	<ul style="list-style-type: none"> • Possible landslides at 200 mm rainfall or more
2008	Kim	Debris flow caused damages to the highway	<ul style="list-style-type: none"> • 24 hr continuous rainfall of 100 mm or more and maximum hourly rainfall of 30mm or more
2010	Yune et al.	Gangwon	<ul style="list-style-type: none"> • Analysis of the landslide triggering rainfall at 108 sites
2011	Kim et al.	Gyeongsangnam	<ul style="list-style-type: none"> • Hourly rainfall 70 mm or more and accumulated rainfall of 230 mm or more
2012	Kim et al.	Gangwon, Gyeonggi, Seoul, Gyeongsangnam	<ul style="list-style-type: none"> • Rainfall intensity 30 mm/hr during 1~3 days or accumulated rainfall of 200 mm or more
2012	Yoo et al.	West area of Gangwon	<ul style="list-style-type: none"> • Correlation between frequency of landslide occurrence and accumulated rainfall during 1, 3, 7 days
2013	Jun et al.	West area of Gangwon	<ul style="list-style-type: none"> • Accumulated rainfall analysis (daily, 2~3days, 4~28days)
2014	Ham & Hwang	Gangwon, Gyeonggi, Seoul	<ul style="list-style-type: none"> • Applicability of the revised landslide forecast criteria by Korea Forest Service in 2013

4.1 선행연구자들이 제안한 강우기준

산림청 기준과 같이 강우기준을 최대시간강우량과 연속 강우량을 기준으로 제안한 사례는 Ikeya(1981), Choi(1989) 그리고 Kim et al.(2011)이며, 각 유발강우는 Table 4와 같다. Ikeya(1981)와 Choi(1989)의 최대시간강우량에 대한 유발강우량은 유사하지만 Kim et al.(2011)은 2배 더 큰 값을 제안하였으며, 본 연구지역의 강우자료를 통해 Table 4와 비교하였다.

Fig. 11은 연구지역의 강우분석과 선행연구자들이 제안한 최대시간강우량-연속강우량에 대한 토석류 유발강우량을 도시화한 것으로 Choi(1989)이 제안한 토석류 유발강우량은 모두 만족하는 것으로 나타났으며, Ikeya(1981) 또한 45개소 중 43개소(96%)가 유발강우량을 만족하는 것으로 나타났다. Kim et al.(2011)이 제안한 유발강우량은 45개소 중 1개소(2%)만이 만족하는 것으로 나타났다. Kim et al.(2011)은 2002년 태풍 루사와 2006년 태풍 예위니아와 같은 30년 평균보다 3배 더 많은 강우량을 기록한 초대형 태풍에 의해 발생된 산사태를 대상으로 강우량을 분석하였으며, 연구 대상지역이 고도 500m 이상의 산악지역으로 지형성 집중호우 발생 지역이기 때문이라 판단된다.

4.2 산림청 기준에 따른 유발강우

Fig. 12는 연구지역의 강우자료를 수집하여 산림청 산사태 주의·경보 기준인 1일 누적강우량-최대시간강우량 기준에 도시화한 것으로 45개소 모두 산사태 주의보 단계였으며, 이 중 28개소(60%)는 산사태 경보 수준이었다. 산사태 주의

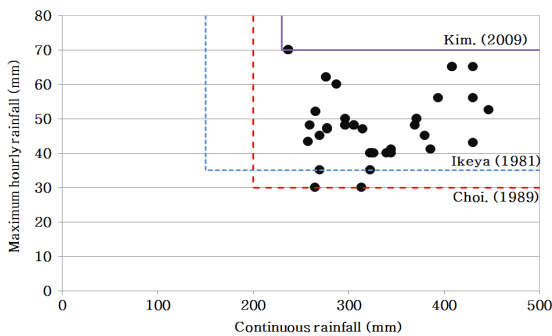


Fig. 11. Comparison of triggering rainfall with previous researches

Table 4. Landslide triggering rainfall by researchers

Researcher	Maximum hourly rainfall (mm)	Continuous rainfall (mm)
Ikeya (1981)	35	150
Choi. (1989)	30	200
Kim et al. (2011)	70	230

보를 산사태 경보수준으로 하향조정하여 1개의 기준으로 설정하는 방안이 필요하다.

Fig. 13은 1일 누적강우량-토석류 발생시간강우량으로 도시화한 것으로 1일 누적강우량-발생시간강우량으로 정리하였을 때 7개소(15%)에서 산림청이 제시한 산사태 주의보 기준에 미치지 못하는 것을 나타냈으며 최대시간강우량 보다 전체적으로 낮게 분석되었다. 산림청 기준에 의한 주의보 및 경보 발령 시점과 토석류 발생시각에 오차가 있을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 최대시간강우량으로 결정되어진 산사태 예보기준으로는 토석류 발생시점을 정확히 예측하기에는 한계가 있다.

최대강우 강도를 기준으로 산림청 산사태 경보·주의보 발령시점과 실제 토석류가 발생한 시점과 차이를 분석하기 위해 연구지역의 강우자료를 토대로 최대시간강우량이 발생한 시간과 토석류 발생시간과의 차이를 Fig. 14와 같이 나타내었다. 최대시간강우량이 발생한 시점에 토석류가 발생한 경우는 36%(16회)이고 토석류가 발생하고 난 후 최대시간강우량이 발생한 경우는 44%(20회), 토석류가 발생하기 이전에 최대시간강우량이 발생한 경우는 20%(9회)로 나타나 최대시간강우량이 발생하더라도 50% 이상에서 발생시간과 최대시간강우량의 차이는 나타났다. 따라서 토석류는 반드시 강우강도가 가장 큰 시점에서 발생한다고는 볼 수

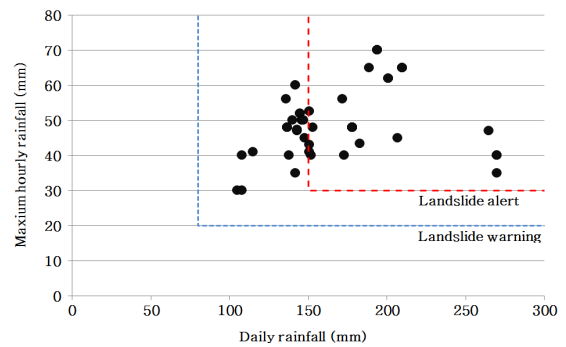


Fig. 12. Comparison of triggering rainfall with landslide forecasting of KFS (based on rainfall at maximum hourly rainfall)

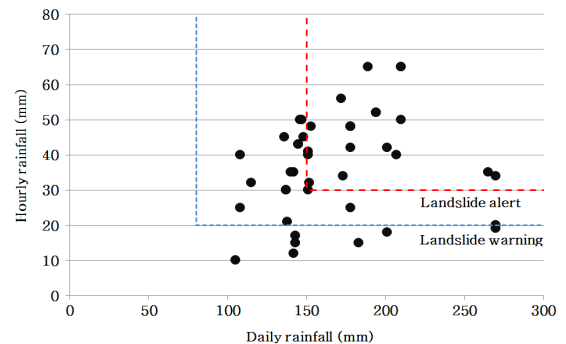


Fig. 13. Comparison of triggering rainfall with landslide forecasting of KFS (based on rainfall at landslide occurrence)

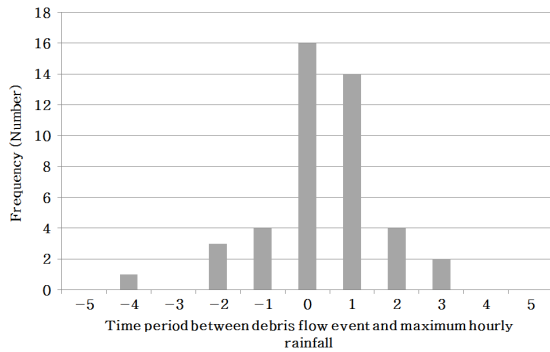


Fig. 14. Time period between debris flow event and maximum hourly rainfall

없으며, 최대시간강우량과 함께 누적강우량을 적용하여 예·경보 기준을 설정하는 것이 더 바람직할 것이다.

4.3 토석류 유발강우 ID curve 제안

토석류 발생에 대한 강우기준은 강우강도, 누적강우량, 강우지속기간 등 다양한 인자들을 활용해 설정할 수 있다. Caine(1980)은 산사태 및 토석류를 발생시키는 유발강우의 강우강도-강우 지속시간 사이의 관계식을 수립하였으며, Dahal & Hasegawa(2008)는 히말라야지역의 강우와 산사태 발생과의 관계 정립을 위해 1951년~2006년 사이의 산사태 자료 193건을 활용하여 강우강도-지속시간에 관한 경험적 관계식을 하였으며 일강우의 영향을 분석하였다. 국내에서도 Oh & Park(2014)은 전국을 5개 권역(경기도, 경상도, 강원도, 전라도, 충청도)으로 구분하여 지역별 산사태 유발강우 기준을 제안하였다. Hong et al.(2016)은 강우 사상 간 시간(Inter event time definition:IETD)을 고려하여 ID curve를 제안하였다.

본 연구에서는 유발강우 ID curve를 구하기 위해 연구지역의 강우자료를 수집하여, 총 30개의 강우자료를 통하여 ID curve를 다음 Eq. (1)과 같이 제안하였으며 Fig. 15에 도시한 바와 같다.

$$I = 38.843 \times D^{-0.552}, \quad 2 < D < 74 \quad (1)$$

여기서, I 는 강우강도(mm/hr), D 는 강우지속시간(hr)을 가리키며, 강우지속시간(2hr~74hr)에 대하여 적용 가능하다.

연구지역에서의 강우자료를 토대로 산정된 관계식의 결정계수는 0.8812로 지속시간이 2시간의 경우에는 강우강도가 26.5mm/hr 이상이면 토석류가 발생할 수 있고, 지속시간이 73시간인 경우에는 강우강도가 3.6mm/hr 이상이면 토석류가 발생할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 16에서 Hong et al.(2016)은 전국을 대상으로 산사태

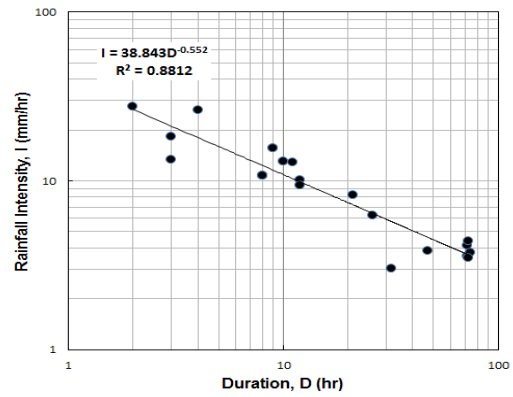


Fig. 15. ID curve of triggering rainfall threshold

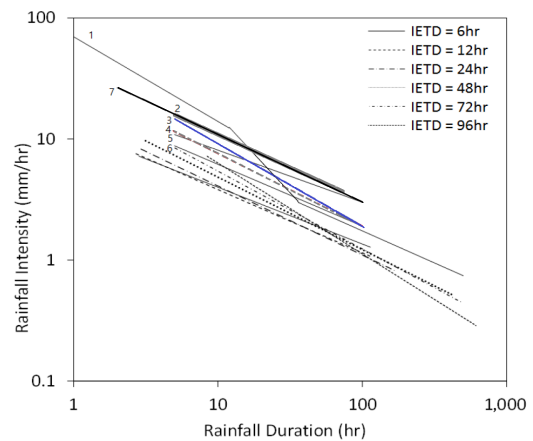


Fig. 16. Comparative analysis of ID curves with previous study by Hong et al. (2016)

발생 시 강우자료를 분석하여 제시한 ID curve로 선행강우를 고려하기 위해 IETD를 6시간에서 96시간으로 구분하였다. IETD가 증가할수록 선행강우의 영향이 커지므로 ID curve의 기울기가 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 16의 ID curve 1~6은 Oh & Park(2014)이 제안한 것으로 2는 경기도, 4는 강원도의 ID curve이며, 본 연구에서 제안한 Fig. 15의 ID curve는 7에 해당한다.

본 연구결과의 ID curve는 연구 대상지가 주로 강원 영서, 인접한 경기 동부 지역이기 때문에 2(경기도)와 매우 유사한 경향을 보인 반면 4(강원도)는 영동과 영서를 하나의 지역으로 분석하였기 때문에 다소 차이를 보이는 것으로 판단된다. 강원도는 태풍의 이동경로 상에 위치하며, 산악지역으로 국지성 집중호우의 강우량의 편차가 영동과 영서가 크기 때문에 별개의 권역으로 구분하여 ID curve 제시하는 것이 타당하다.

5. 결 론

본 연구는 2006년부터 2013년 동안 강원도 영서지역과

인근지역에서 발생한 토석류 피해지역에 대한 정밀현장조사 결과와 강우자료를 통해 구축한 D/B를 이용하여 토석류의 거동 특성 및 강우조건을 분석하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 연구지역에서는 계곡형 토석류가 사면형 토석류보다 상세하게 관찰되었으며 토석류 발생지점의 경사는 30~40° 범위에 분포하였다.
- (2) 유하부는 10~30°의 경사를 가지는 것으로 조사되었으며, 평균 24°로 나타났다. 또한, Sled 모형의 순효율 산정 결과 2~9 사이 범위에 분포하며 대푯값은 3.8로 산정되었다.
- (3) 발생부와 유하부의 길이, 폭, 침식 깊이 및 퇴적깊이를 위치별로 조사하여 토석류 규모를 산정한 결과 사면형 토석류의 평균 발생규모는 874m³이며, 계곡형은 6345m³로 약 7배의 차이가 나타났다.
- (4) 퇴적시작점의 평균경사는 10°이며, 퇴적부의 경사는 구속수위가 5~12°로 평균 9°, 개방형수위가 8~17° 평균 11°로 나타났다. 또한, 선상지 경사가 10° 미만인 토석류 발생개소 중 하향에 대한 상향의 경사비는 2.3으로 Ikeya(1981)가 제안한 2와 유사하였다.
- (5) 산림청 예·경보 기준으로 강우를 분석한 결과 최대시간 강우량일 때 토석류 발생은 36%로 나타났으며, 최대시간강우량 발생 이전과 이후에도 많은 토석류가 발생하여 예·경보 설정시점에 대한 검토가 필요하다.
- (6) 토석류 발생지역의 강우자료를 수집하여 연구대상지에 대한 토석류 유발강우 ID curve를 제시하고, 최근 연구된 ID curve와 비교·분석한 결과 ID curve는 지역별 기후 및 지형적 특성을 고려하여 제안되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였습니다(관리번호-520150075).

References

1. Caine, N. (1980), The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska Annaler*, 62A, pp. 23~27.
2. Cannon, S. H. and Savage, W. Z. (1988), A mass-change model for the estimation of debris-flow runout, *Journal of Geology*,

- Vol. 96, pp. 221~227.
3. Choi, D. Y. and Paik, J. C. (2012), Characteristics of runout distance of debris flow in Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3B, pp. 193~201 (in Korean).
4. Choi, K. (1989), *Landslide prediction methods and prevention*, KFRI Research Information Report, No. 27, pp. 1~3 (in Korean).
5. D'Agostino, V. and Marchi, L. (2001), Debris flow magnitude in the eastern Italian Alps : data collection and analysis, *Physical Chemistry Earth(C)*, Vol. 26, No. 9, pp. 657~663.
6. Dahal, R. K. and Hasegawa, S. (2008), Representative rainfall thresholds for landslide in the Nepal Himalaya, *Geomorphology*, Vol. 100, pp. 429~443.
7. Evans, S. G. (1982), Landslides and surficial deposits in urban areas of British Columbia: A review, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 269~288.
8. Ham, D. H. and Hwang, S. H. (2014), Review of landslide forecast standard suitability by analysing landslide-inducing rainfall, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 3, pp. 299~310 (in Korean).
9. Hong, M. H., Kim, J. H., Jung, G. J. and Jeong, S. S. (2016), Rainfall threshold (ID curve) for landslide initiation and prediction considering antecedent rainfall, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 4, pp. 15~27 (in Korean).
10. Hungr, O., Morgan, G. C. and Kellerhals, R. (1984), Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp. 663~677.
11. Ikeya, H. (1976) *Introduction to sabo works: The preservation of land against sediment disaster*, The Japan Sabo Association, Toyko, pp. 168.
12. Ikeya, H. (1981), A method of designation for area in danger of debris flow, In *erosion and sediment transport in pacific rim steeplands*, Proc. of the Christchurch Symp., Int. Assoc. Hydrol. Sci., Publ., No. 132, pp. 576~588.
13. Ikeya, H. (1989), Debris flow and its countermeasures in Japan, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 40, pp. 15~33.
14. Jakob, M. (2005), A size classification for debris flow, *Engineering Geology*, Vol. 79, pp. 151~161
15. Jun, K. J., Kim, G. H. and Yune, C. Y. (2013), Analysis of debris flow type in Gangwon province by database construction, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 171~179 (in Korean).
16. Jun, K. J. and Yune, C. Y. (2015), Analysis of slope hazard triggering factors through field investigation in Korea over the past four years, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 5, May 2015, pp. 47~58 (in Korean).
17. Kang, S. H., Lee, S. R., Nikhil N. V. and Park, J. Y. (2015), Analysis of differences in geomorphological characteristics on initiation of landslides and debris flows, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 249~258 (in Korean).
18. Kim, K. H., Jung, H. R., Park, J. H. and Ma, H. S. (2011), Analysis on rainfall and geographical characteristics of landslides in Gyeongnam Province, *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 33~45 (in Korean).
19. Kim, K. S. (2008), Characteristics of basin topography and rainfall triggering debris flow, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 263~271 (in Korean).

20. Kim, K. S., Jang, H. I. and Lee, S. Don. (2008), Analysis of debris flow magnitude, Korean Society of Civil Engineers Conference, Korean Society of Civil Engineers, pp. 3015~3018 (in Korean).
21. Kim, W. Y., Kim K. S., Chae B. G. and Cho, Y. C. (2000), Case study of landslide types in Korea, Korean Society of Engineering Geology, Vol. 10, No. 2, pp. 18~35 (in Korean).
22. Korea Forest Service (2016), <http://www.forest.go.kr>.
23. Lo, Dok (2000), Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design. GEO Report No. 104, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, The Government of Hong Kong Special Administrative Region, pp. 27~29.
24. Oh, J. R. and Park, H. J. (2014), Analysis of landslide triggering rainfall threshold for prediction of landslide occurrence, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 2, pp. 115~129 (in Korean).
25. Rickenmann, D. (1999), Empirical relationships for debris flows, Natural Hazards, Vol. 19, pp. 47~77.
26. Rickenmann, D. (2005), Runout prediction methods. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), Debris-flow hazards and related phenomena. Praxis, Chichester, UK, pp. 305~324.
27. Sassa, K. (1988), Special lecture: geotechnical model for the motion of landslides, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, pp. 37~55.
28. Takahashi, T. (1991), Debris flow, IAHR Monograph, Balkema, pp. 165.
29. VanDine, D. F. (1996) Debris flow control structures for forest engineering, Working Paper 22/1996, BC Ministry of Forests, Victoria, BC, Canada, pp. 4~10.
30. Yoo, N. J., Yoon, D. H., Um, J. K., Kim, D. G. and Park, B. S. (2012), Analysis of rainfall characteristics and landslides at the west side area of Gangwon province, Journal of Korea Geo-Environmental Society, Vol. 13, No. 9, pp. 75~82 (in Korean).
31. Yu, K. H. (2015), A Study on the movement and spread of hillslope debris flow - focusing on the case of Duchon-myeon, Hongcheon in 2013, M.S. Thesis, Kangwon National University, pp. 68~75 (in Korean).
32. Yune, C. Y., Jeon, K. J. and Kim, G. H. (2010), Analysis of slope hazard-triggering rainfall characteristics in Gangwon province by database construction, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 26, pp. 27~38 (in Korean).