

확률 강우량을 이용한 고속도로 토석류 조기경보기준 제안 (1) : 강우기준 제안

최재순*

서경대학교 토목건축공학과 부교수

Proposal of Early-Warning Criteria for Highway Debris Flow Using Rainfall Frequency (1): Proposal of Rainfall Criteria

Jaesoon-Choi*

Associate Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Seokyeong University

요약

본 연구에서는 강우재현주기의 내용을 포함하고 있는 고속도로 토석류 평가를 기초로 하여 고속도로 조기경보 시스템 개발을 위한 강우기준을 제안하였다. 강우기준은 주의경보와 위험경보로 구분하여 선행연구결과를 기초로 하여 적절한 강우기준이 추천되었으며 추천된 기준은 재현주기에 따른 토석류 평가등급별 1시간, 6시간, 3일 확률 강우량이다. 이때, 연구대상은 강원지역으로 하였으며 강원지역 8개 관측소의 확률 강우량을 수집하였다. 또한, 8개 자료의 확률 분석을 통해 강원지역 고속도로 토석류 조기경보에 이용될 1시간, 6시간, 3일 강우기준에 대한 확률분포를 산정하였다. 또한, 강우기준으로 선택된 3가지 강우정보와 실제 토석류 피해와의 연관성 분석을 실제 토석류가 발생한 강원지역 고속도로 7개 노선, 12개 지점의 피해발생시의 강우자료를 수집하여 검토에 이용하였다. 이때, 확률분포 상의 강우기준을 평균값과 하한값을 구분하여 검토하였다. 검토결과, 재현주기별 강우량의 하한값을 사용하는 경우가 실제 토석류 피해의 상황을 잘 모사하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 고속도로 토석류 조기경보, 강우기준, 확률 강우량, 평균 재현주기

ABSTRACT

In this study, we propose rainfall frequency criteria for the development of early-warning system based on the evaluation of the highway debris flow that includes the contents of the rainfall recurrence cycle. The rainfall criterion was recommended based on the results of previous researches and the recommended rainfall criterion was 1 hour, 6 hours, and 3 days. At this time, the study subjects were located in Gangwon area and the probability rainfall of 8 stations in Gangwon area was collected. Also, the probabilistic distribution of the 1 hour, 6 hour, and 3 day rainfall criteria to be used for the early warning for the highway debris flow in Kangwon area was estimated through the probability analysis. In addition, we analyzed the correlation between 3 types of rainfall criteria selected from the rainfall data and the actual destructive damages of debris flow at 12 points in 7 lines of Gangwon highways. At this time, the rainfall criterion on the probability distribution was divided into an average value and a lower limit value. As a result of the review, it was found that the case of using the lower limit value of the rainfall according to the recurrence interval well simulates the situation of actual debris flow hazards.

Keywords: Highway debris flow early-warning, Rainfall criteria, Rainfall frequency, Average recurrence interval

*Corresponding author: Jaesoon-Choi, geotech@skuniv.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3951-0572>

Received: 23 May 2019, Revised: 13 June 2019, Accepted: 21 June 2019



1. 서론

매년 발생하는 장마, 태풍 및 집중호우로 인하여 발생하는 산사태 및 토석류 발생은 인명피해, 가옥과 도로 및 시설물 유실 등 많은 사면재해를 유발시키고 있으며, 국지성 집중 호우의 빈발로 이에 대한 발생 예측과 대비가 더욱 어려워지고 있는 실정이다. 이에 대한 대책마련 연구에서 산사태를 유발시키는 강우특성에 대해 연구가 국내 여러 연구기관에서 진행된 바 있는데, Hong(1990)은 일반적으로 2일 누적강우량이 200 mm 이상이거나 최대 시간강우량이 30 mm 이상이 되면 산사태가 발생 가능성이 높다고 발표한 바 있다. 또한, Yoo et al.(2012)은 산사태 발생시의 지역별 강우량과 발생 이전의 누적 강우량과의 상관관계 분석결과, 발생 3일 전 누적 강우량과 7일 전 누적 강우량은 거의 유사한 강우량을 보이는 것으로 나타났으며, 1일 누적 강우량 보다 산사태 발생 3일 전 및 7일 전 누적 강우량이 산사태 발생과 더 높은 관련성을 가진다고 연구결과를 발표한 바 있다. 최근에는 통계학적 분석을 통해 산사태 유발강우기준을 제안하는 연구가 수행되고 있는데 Hong et al.(2016)은 선행강우의 영향을 고려한 산사태 유발기준을 5년의 200여개의 산사태 발생시점의 강우정보를 통해 적정 시간대별 강우 ID 곡선을 제안한 바 있으며 Kang et al.(2016)은 풍화토 종류와 사면파괴 유형에 따라 위험수준별 산사태 유발 강우기준에 대한 연구를 수행한 바 있다.

2011년 우면산 및 춘천에서의 큰 피해발생 후 다양한 연구가 수행되고 있는 토석류의 경우, 다양한 기관에서 토석류 평가 기준을 정립한 바 있으나 실제 토석류를 발생시키는 강우기준에 대해서는 한국도로공사의 강우재현주기를 제외하고는 전무한 상태이다. 또한, 토석류를 유발하는 강우기준에 대한 연구를 보면, 한국도로공사의 토석류 위험평가에 인용된 연구(Kim, 2008; 2009)로 2002년부터 2006년 고속도로에서 발생한 토석류 피해를 바탕으로 24시간 누적강우 100 mm 이상, 최대시간강우가 30 mm 이상일 때, 토석류가 발생할 가능성이 높다고 발표한 바 있으며 2012~2013년 발생한 산사태 및 토석류 피해자료 42개소의 강우자료를 토대로 강우량, 강우강도 및 누적강우량을 이용하여 산정한 강우정보지수(rainin triggering index, RTI)를 이용한 연구(Nam et al., 2018)를 들 수 있다.

국외의 경우, 극한강우에 의한 산사태 조기경보시스템을 개발하여 활용 중으로 인공위성, 지상 라이다, 이동 관측차량 등 다양한 방법으로 실시간 모니터링을 통해 산사태 감지 및 조기경보시스템을 운영하고 있다. 예를 들어, 이탈리아는 기존에 발생한 산사태에 대한 정밀한 데이터베이스 구축과 함께 강우특성을 분석하여 조기경보가 가능하게 했으며 대만의 경우 전국의 485개 토석류 계곡에 대해 실시간 모니터링시스템을 기반으로 토석류 산사태 발생 최소 1시간 이전에 조기경보를 발령하고 있다.

이 연구에서는 한국도로공사의 평가기준을 토대로 토석류 피해가 많이 발생하는 강원도를 대상으로 토석류를 유발시키는 확률 강우량 기준을 마련하여 고속도로 토석류 조기경보 시스템 운영을 위한 강우기준을 제시하고자 하며 실제 토석류가 발생한 지역의 강우정보를 이용하여 이 기준에 대한 적절성 여부를 검토하고자 한다.

2. 확률 강우량을 이용한 고속도로 토석류 조기경보 기준 제안

2.1 국내 토석류 위험 평가

2011년 우면산과 춘천에서 대규모 토석류 피해가 발생한 이후, 이와 관련된 여러 기관(산림청, 서울연구원, 한국지질자원연구원, 한국도로공사)에서는 기관 특성에 맞는 토석류 위험평가방법을 개발 또는 개선하는 중이다. 산지의 모든 것을 책임지는 산림청(<http://sansatai.forest.go.kr>)에서는 각각의 수치지도의 레이어로부터 도출한 산사태 위험지 판정기준의 6개 인자를 토대로 조사대상 지점 각각의 인자별 점수의 가중치를 합산한 후 산사태 위험도등급을 구분하였다. 서울특별시 산하 서울연구원(Seoul Metropolitan Government, 2013)에서는 서울에 위치한 산지사면을 대상으로 전수조사 후 산사태 및 토석류 취약지역을 선정 등급화 후 지반조사를 실시, SINMAP과 FLO-2D 등을 이용하여 위험지 분석하고 있으며, 토석류 판정표는

크게 붕괴 위험성과 사회적 영향도로 나누어져 있다. 특히, 조사자의 보정점수가 있는데, 예를 들어, 상부산지에서 토석류 등이 발생하여 피해가 예상되는 지역(+5), 급경사지의 우수배수시설 여부 및 상태 - 우수배수시설 없음(+2), 우수배수시설 있으나 시설상태 불량(+1)의 보정이 가능하다. 등급별 평가점수 및 내용은 자연비탈면에 대해 평가할 뿐만 아니라 인공 비탈면, 옹벽 및 축대에 대해서도 평가를 실시하고 있으며 위험도 평가 후, D, E등급(C등급은 51점 이상만)에 대해서는 붕괴위험 지역으로 지정 관리한다. 한국지질자원연구원의 토석류 평가(KIGAM, 2013)는 암질, 공극률, 함수비, 투수계수와 같은 강우에 의하여 간극수압이 급격히 상승하고, 표면 유수에 의한 침식, 흙의 포화로 인한 단위 부피당 중량의 증가 등의 원인에 의한 지질학적 요인과 고도, 사면경사와 같은 지형학적 요인이 함께 포함이 되어 있는 것이 특징이다. 마지막으로 이 연구에서 이용하게 될 한국도로공사의 토석류 평가는 재해점수와 취약점수로 구분한 점이 특징이며 재해점수는 상부 배수 유역 내에서 토석류가 시작될지의 여부와 시설물 위치까지 토석류가 이동하는지를 판단하는 내용이며 취약점수는 토석류에 의해 시설물 피해가 발생할 것인지에 대한 내용을 담고 있다. 특히, 취약점수는 토석류의 퇴적공간과 배수시설의 크기 등 토석류에 대응에 관한 내용을 담고 있는 점이 매우 독특하다. 또한, 다른 기관의 평가와는 달리 평가등급이 강우재현주기와 연계되어 있는 점이 특징이다. 이상의 4개 기관의 평가표의 내용을 요약 정리하면 다음과 같다.

Table 1. Comparison of debris-flow decision table

Division		Forest Service	Seoul Institute	KIGAM	Korea Expressway Corp.	
Terrain conditions	Slope angle	Average slope			○	
		Average slope valley	○	○	○	
	Area ratio				○	
	Length ratio				○	
	Slope direction		○			
	Slope form		○			
	Valley properties	Length	○			
		Slope	○	○		
		Width		○		
	Height			○		
Geological conditions	Type of rock	○		○		
	Dry unit weight		○	○		
	Water content		○	○		
	Permeability			○		
	Void ratio			○		
Facility Conditions	Accumulation area				○	
	Drainage Standards				○	
	Distance from the drain		○			
Etc	Fire history		○			
	External force		○			
	History collapse		○			
	Asylum status		○			
	Surroundings		○			
	Estimated population damages	○	○			
Rainfall	Return period rainfall				○	

이 연구는 고속도로 토석류 조기경보를 위한 강우기준을 제안하는 것으로 한국도로공사의 토석류 평가등급과 연계된 강우정보의 내용을 나타내면 Fig. 1과 Table 2에 나타낸 바와 같다. Fig. 1과 Table 2를 보면, 한국도로공사의 토석류 평가등급은 각 등급별로 재해점수 및 취약점수의 합이 재현주기별 확률 강우와 연계되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 강우와의 관계는 실제 토석류 피해시의 강우자료에 대한 분석과 위험도 평가를 통하여 제안된 것이다(Kim, 2008).

20	E (20)	D (21)	D(22)	C (23)	B (24)	B (25)	B (26)	A (27)	S (28)	S (29)	S (30)
19	E (19)	D (20)	D (21)	C (22)	B (23)	B (24)	B (25)	A (26)	S (27)	S (28)	S (29)
18	E (18)	D (19)	D (20)	C (21)	C (22)	B (23)	B (24)	A (25)	A (26)	S (27)	S (28)
17	E (17)	D (18)	D (19)	C (20)	C (21)	B (22)	B (23)	A (24)	A (25)	S (26)	S (27)
16	E (16)	D (17)	D (18)	C (19)	C (20)	B (21)	B (22)	B (23)	A (24)	A (25)	S (26)
15	E (15)	E (16)	D (17)	D (18)	C (19)	C (20)	B (21)	B (22)	A (23)	A (24)	A (25)
14	E (14)	E (15)	D (16)	D (17)	C (18)	C (19)	B (20)	B (21)	B (22)	A (23)	A (24)
13	E (13)	E (14)	D (15)	D (16)	C (17)	C (18)	C (19)	B (20)	B (21)	B (22)	A (23)
12	E (12)	E (13)	D (14)	D (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)	B (20)	B (21)	B (22)
11	E (11)	E (12)	D (13)	D (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)	B (20)	B (21)
10	E (10)	E (11)	E (12)	D (13)	D (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)	B (20)
9	E (9)	E (10)	E (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)	B (19)
8	E (8)	E (9)	E (10)	D (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)	C (17)	C (18)
7	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	D (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)	C (17)
6	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	D (10)	D (11)	D (12)	D (13)	C (14)	C (15)	C (16)
5	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	D (10)	D (11)	D (12)	D (13)	D (14)	D (15)
4	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	D (11)	D (12)	D (13)	D (14)
3	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	E (11)	D (12)	D (13)
2	E (2)	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	B (10)	E (11)	E (12)
1	E (1)	E (2)	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)	E (11)
0	E (0)	E (1)	E (2)	E (3)	E (4)	E (5)	E (6)	E (7)	E (8)	E (9)	E (10)
Disaster Vulnerability	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fig. 1. Severity Rating according to disaster score and fragile score (Kim, 2009)

Table 2. Severity level of risk (Kim, 2009)

Grade	Degree of risk
S	- Very high probability of debris flow and road damage - Recurrence Interval 2~5 years rainfall
A	- High probability of debris flow and road damage - Recurrence Interval 5~20 years rainfall
B	- Moderate probability of debris flow and road damage - Recurrence Interval 20~50 years rainfall
C	- Moderate probability of debris flow - Recurrence Interval 50~100 years rainfall
D	- Low probability of debris flow and road damage - Recurrence Interval over 1,000 years rainfall
E	- Very low probability of debris flow and road damage

이 연구에서는 강원지역을 대상으로 강우정보를 분석하여 각 강우재현주기에 해당하는 토석류 조기경보에 이용될 강우기준을 제안하고자 한다.

2.2 선행문헌조사를 통한 토석류 유발강우 및 조기경보 기준 분석

산림청에서는 1988년 산사태 주의보·경보 기준을 마련하고 최대 시강우량, 일 강우량, 누적으로 내리는 강우의 합인 연속 강우량 기준을 토대로 Table 3과 같이 강우기준에 따른 산사태 주의보·경보 기준을 오랜 기간 사용하여 왔으나 최근에는 11개 권역에 대한 강우분포와 지질분포를 토대로 토양함수지수를 결정하고 권역별 토양함수지수의 80% 도달시에는 주의보를 100% 도달시에는 경보를 발령하고 있는 실정이다.

Table 3. Landslide early warning criteria the Forest Service

Division	Hour rainfall	Day rainfall	Continuous rainfall
Caution	20 ~ 30 mm	80 ~ 150 mm	100 ~ 200 mm
Warning	30 mm	150 mm	200 mm

이외에도 토석류 유발강우에 관한 결정론적 연구결과를 보면, 최대 시 강우량, 연속강우량 중에서는 3~6시간 강우량, 누적강우량에서는 3일 및 7일 강우량이 토석류 유발에 관여한다는 연구결과가 있다. 우선, 최대 시 강우량과 관련해서는 토석류를 유발시키는 연속강우량은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 최대 시간강우량과 함께 증가하는 경향(Yune et al., 2010)을 보인다. 이는 연구결과로 이 내용은 강원지역 토석류 발생지별 토석류 발생시간에 대한 강우자료를 이용하여 분석한 것이다.

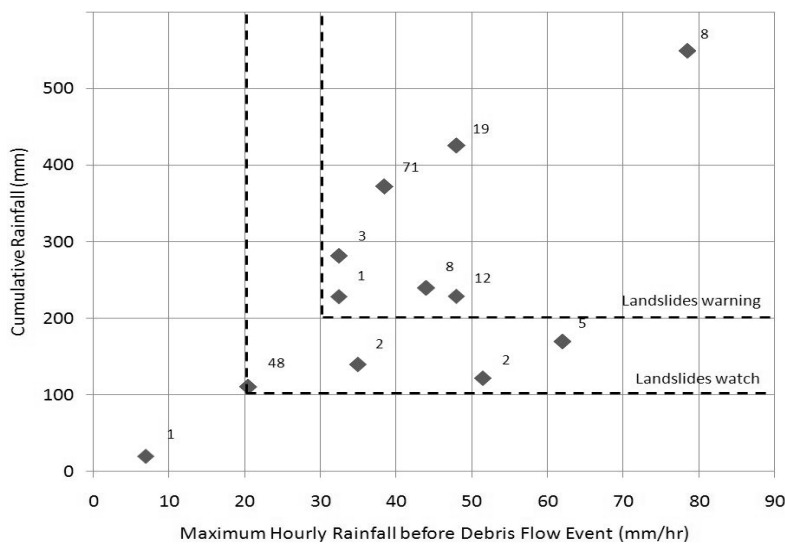


Fig. 2. Time continuous rainfall and rainfall (Yune et al., 2010)

위 그림을 보면, 연속강우량은 최대시간강우량과 함께 증가하는 경향을 보이지만, 전반적인 점들의 분포가 시간강우량 축으로 쏠려있는 점으로부터 강원지역에서 발생하는 토석류는 일반적인 산사태 예보 기준보다 더 큰 강우가 내린 후에 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 토석류 조기경보기준에서는 연속강우량에 영향을 미치는 최대 시 강우량도 함께 고려하는 것이 적절하다고 판단된다. 또한, 산사태 발생은 상대적으로 산사태 발생시점 6시간 이내 강우량의 크기에 크게 좌우되며(Hwang et al., 2012), 집중호우와 같이 단기간에 발생한 강우로 인한 산사태의 경우 사면 파괴는 주로 최대강우가 발생한 시점이나 그 이후 3~6시간 내에 발생하는 경우(Oh et al., 2013)가 많으며 이를 2011년 우면산과 2012년 군산지역 피해자료에서 확인할 수 있다는 연구결과가 발표된 바 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 이 연구에서는 6시간강우량을 고속도로 토석류 조기경보를 위한 강우기준으로 선정하였다.

마지막으로, 서론에서 언급한 바와 같이 산사태 발생 3일 전 누적강우량과 7일 전 누적강우량이 산사태 발생이 밀접한 관계(Yoo et al., 2012)가 있다는 연구결과를 토대로 3일 강우량과 7일 강우량을 모두를 고려하는 것이 적절하지만, 이 연구에서 강우정보를 제공받을 한국 확률 강우량 정보(<http://www.k-idf.re.kr>)에서 3일(72시간)까지만 정보를 제공하는 점을 고려하여 3일 강우량을 강우기준으로 선정하였다.

이상의 선행연구결과에 대한 분석을 통해 선정된 고속도로 토석류 조기경보기준에 이용될 확률 강우량은 1시간, 6시간, 72시간(3일) 강우량이다.

2.3 고속도로 토석류 조기경보 강우기준의 제안을 위한 강우분석

2.3.1 대상지역의 선정

우리나라 대표 토석류 피해지역인 강원지역은 산악지형으로 해발고도 100 m 이하의 저지대는 강원도 총면적의 5.6%에 불과하고 100~500 m까지의 저산지대가 43.1%, 500~1,000 m까지의 중산지대가 43.6%, 1,000 m 이상의 고산지대가 7.7%로서 전반적으로 매우 험준한 산세를 이룬다. 동해안을 따라 NNW-SSW방향으로 발달된 태백산맥과 서쪽에서 서남쪽으로 발달된 차령산맥, 소백산맥은 중국 방향의 지질구조선을 형성하고 있다(Yoo et al., 2012). 또한 우리나라의 산사태 피해물량을 살펴보면 강원지역이 약 2,039.41 ha로 가장 크며 Fig. 3과 같다.

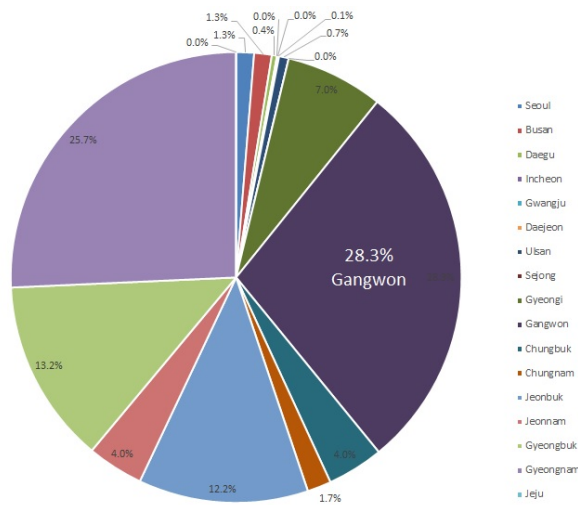


Fig. 3. Damage shipments of domestic landslide(<http://sansatai.forest.go.kr>)

또한, Fig. 4에 나타난 바와 같이 1987년부터 2007년까지 20년의 강우자료를 분석하여 전국을 4개 권역으로 구분한 산림청의 강우분포 자료를 보더라도 강원권이 가장 토석류가 발생할 가능성이 높다. Fig. 4에서 1 권역은 600~1,100 mm의 분포를 나타내고 있으며 가장 짙은 붉은 색으로 표시된 부분의 강우가 가장 많다.



Fig. 4. Landslide prediction criteria of the Forest Service (<http://sansatai.forest.go.kr>)

2.3.2 대상지역의 강우관측자료 분석

이 연구에서 사용된 확률강우량은 ‘한국 확률강우량 정보(www.k-id.re.kr)’에 근거하여 조사하였다. ‘한국 확률강우량 정보’는 시간분포 및 면적우량 환산계수(ARF)등을 통합적으로 제공하며, 주요도시별 재현주기, IDF 등을 제공하고 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 주요지역의 확률강우량뿐만 아니라 경도, 위도 정보를 토대로 한 그 지점에 대해서도 확률강우량이 제공되고 있다. 이 연구에서는 강원도 주요 고속도로 IC를 대상으로 확률 강우량을 산출하였고, 주요지역의 위치와 위도, 경도는 Fig. 6과 Table 4에 나타난 바와 같다.

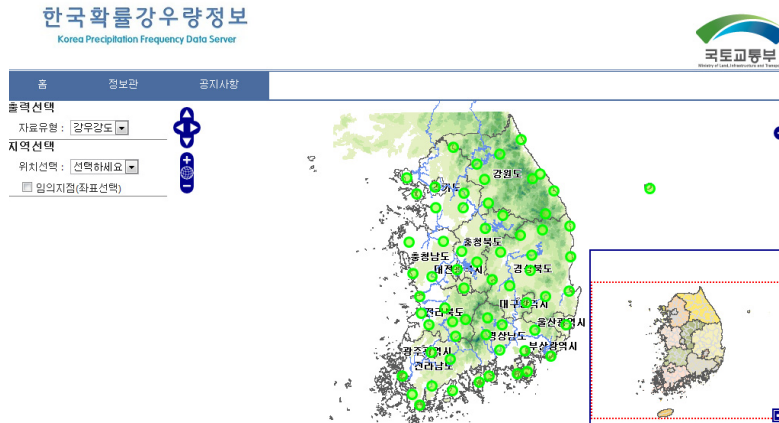


Fig. 5. Korea precipitation frequency data server (www.k-id.re.kr)



Fig. 6. Location of main area

Table 4. Latitude and longitude of main area

Division	Latitude	Hardness
Gangneung (Gangneung IC)	37° 44' 58"	128° 50' 21"
Donghae (Donghae IC)	37° 30' 44"	129° 5' 41"
Yangyang (Yangyang IC)	38° 4' 30"	128° 35' 31"
Wonju (Wonju IC)	37° 24' 4"	127° 57' 2"
Chooncheon (Chooncheon IC)	37° 50' 31"	127° 46' 4"
Pyeongchang (Jinbu IC)	37° 39' 8"	128° 33' 45"
Hongcheon (Hongcheon IC)	37° 40' 35"	127° 51' 20"
Hoengseong (Hoengseong IC)	37° 30' 11"	127° 58' 13"

한국 강우량 정보에서 제공하는 각 관측소의 위치기반으로 여러 시간대에 대한 확률 강우량을 조사하여 강원지역 고속도로 토석류 평가에 이용될 1시간, 6시간, 3일(72시간)의 확률 강우량을 조사하면 Tables 5~7과 같다. 이때, Table 2의 내용을 토대로 재현주기에 따라 구분하였으며 여기서, S등급 재현주기는 2~5년, A등급은 5~20년, B등급은 20~50년, C등급은 50~100년, D등급은 500년 이상으로 간주하였다.

Table 5. 1 hour rainfall Status (Unit : mm)

Division	Classification with scorecards				
	Grade S	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Return period	2-5 Year	5-20 Year	20-50 Year	50-100 Year	More than 500 Year
Chooncheon	38.0~48.8	48.8~62.8	62.8~71.7	71.7~78.3	over 93.7
Donghae	41.4~54.2	54.2~70.8	70.8~81.3	81.3~89.2	over 107.4
Yangyang	30.7~41.2	41.2~54.8	54.8~63.5	63.5~69.9	over 84.9
Hongcheon	41.0~53.1	53.1~68.6	68.6~78.5	78.5~85.9	over 102.9
Wonju	43.9~55.6	55.6~70.6	70.6~80.2	80.2~87.3	over 103.8
Hoengseong	42.5~54.2	54.2~69.4	69.4~79.0	79.0~86.2	over 102.8
Pyeongchang	33.6~43.2	43.2~55.6	55.6~63.5	63.5~69.4	over 83.0
Gangneung	31.9~42.7	42.7~56.8	56.8~65.8	65.8~72.5	over 87.9

Table 6. 6 hours rainfall Status (Unit : mm)

Division	Classification with scorecards				
	Grade S	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Return period	2-5 Year	5-20 Year	20-50 Year	50-100 Year	More than 500 Year
Chooncheon	86.4~114.0	114.0~150.6	150.6~173.4	173.4~190.2	over 229.8
Donghae	81.6~118.8	118.8~166.2	166.2~196.8	196.8~219.6	over 272.4
Yangyang	87.0~118.8	118.8~160.2	160.2~186.0	186.0~205.8	over 250.8
Hongcheon	88.8~120.0	120.0~160.8	160.8~186.6	186.6~206.4	over 250.8
Wonju	93.6~129.0	129.0~174.0	174.0~202.8	202.8~225.0	over 274.8
Hoengseong	91.8~126.0	126.0~170.4	170.4~198.0	198.0~219.0	over 267.6
Pyeongchang	90.6~126.0	126.0~172.2	172.2~201.0	201.0~223.2	over 273.6
Gangneung	88.8~129.6	129.6~183.0	183.0~216.0	216.0~241.2	over 300.0

Table 7. 3 days rainfall Status (Unit : mm)

Division	Classification with scorecards				
	Grade S	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Return period	2-5 Year	5-20 Year	20-50 Year	50-100 Year	More than 500 Year
Chooncheon	208.8~309.6	309.6~424.8	424.8~511.2	511.2~568.8	over 698.4
Donghae	223.2~338.4	338.4~482.4	482.4~576.0	576.0~648.0	over 806.4
Yangyang	216.0~309.6	309.6~439.2	439.2~518.4	518.4~576.0	over 712.8
Hongcheon	216.0~316.8	316.8~446.4	446.4~532.8	532.8~590.4	over 727.2
Wonju	216.0~309.6	309.6~424.8	424.8~504.0	504.0~561.6	over 684.0
Hoengseong	216.0~309.6	309.6~439.2	439.2~518.4	518.4~576.0	over 712.8
Pyeongchang	244.8~352.8	352.8~489.6	489.6~583.2	583.2~655.2	over 806.4
Gangneung	223.2~338.4	338.4~475.2	475.2~561.6	561.6~626.4	over 784.8

2.4 실제 고속도로 토석류 피해자료를 통한 타당성 검토

이 연구에서는 토석류를 유발시키는 강우기준의 선정을 위해서 강원지역의 토석류 피해자료를 대상으로 피해당시의 강우자료를 이용하여 토석류 평가등급에 따른 1시간, 6시간, 3일 확률 강우량과 비교하여 피해당시의 어떠한 확률 강우가 토석류를 유발시키는지 여부를 검토하였다. 이를 위해 우선적으로 강원지역의 8개 관측소의 강우자료에 대한 확률 분석을 수행하였으며 강원지역 고속도로 7개 노선 12개의 지점에서 발생한 피해자료 및 강우자료를 수집하여 확률 분석을 통해 제시된 1시간, 6시간, 3일 확률 강우량과 비교하였다.

2.4.1 강원지역 확률 강우량 분석

Tables 4~6에 나타난 8개 관측소의 자료들을 종합하여 확률분석을 통해 토석류 평가등급별 1시간, 6시간, 3일(72시간)의 확률 강우량을 나타내면 Fig. 7과 같고 그 내용을 요약정리하면 Table 7과 같다.

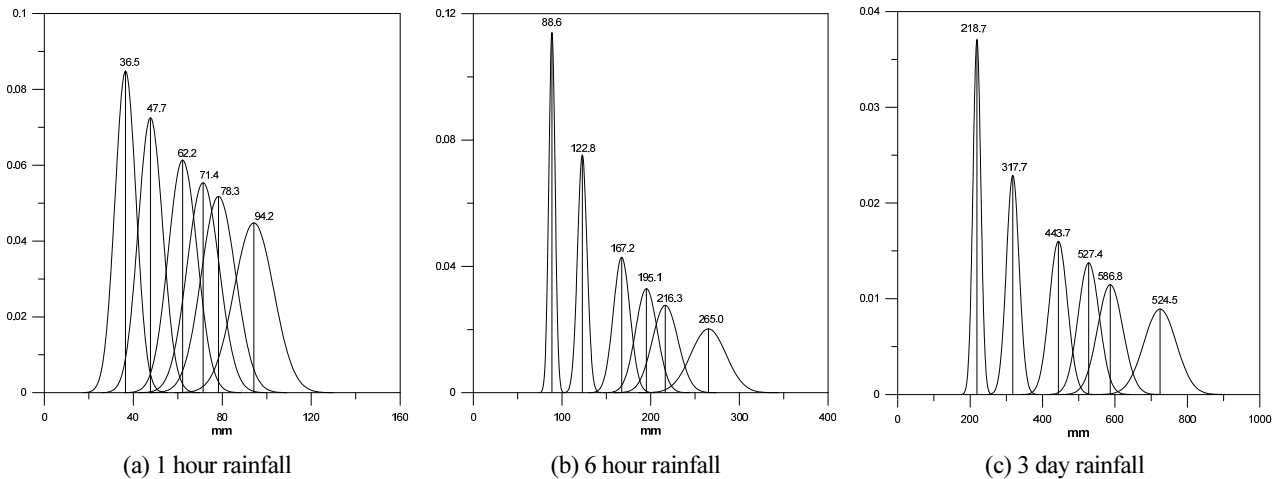


Fig. 7. Normal distribution table according to rainfall frequency

Table 8. Average and standard deviation of probable rainfall

Division		Grade S	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
		2-5 Year	5-20 Year	20-50 Year	50-100 Year	More than 500 Year
1 hr	Average (mm)	36.5~47.7	47.7~62.2	62.2~71.4	71.4~78.3	over 94.2
	Standard Deviation	4.7~5.5	5.5~6.5	6.5~7.2	7.2~7.7	8.9
6 hrs	Average (mm)	88.6~122.8	122.8~167.2	167.2~195.1	195.1~216.3	over 265.0
	Standard Deviation	3.5~5.3	5.3~9.3	9.3~12.1	12.1~14.4	19.7
3 days	Average (mm)	218.7~317.7	317.7~443.7	443.7~527.4	527.4~586.8	over 724.5
	Standard Deviation	9.8~17.9	17.9~26.4	26.4~32.1	32.1~37.1	50.1

2.4.2 고속도로 토석류 피해시의 강우자료

이 연구에서는 토석류 피해를 유발시키는 강우기준의 제안을 위해 토석류 위험등급에 따른 1시간, 6시간, 3일 확률 강우량을 실제 토석류 피해발생시의 강우자료와 비교하였으며 이때, 이용된 토석류 피해자료는 강원지역 고속도로를 대상으로 7개 노선의 12지점으로 그 내용을 요약하면 Table 9와 같다.

Table 9. Debris-flow hazard example at highway in Gangwon area

Places No.	Occurrence date and time	Occurrence position	Weather stations (Station number)	Grade
1				S
2	31/08/2002 16:50	Youngdong-line Daekwanryung	Daekwanryung (100)	D
3				E
4				S
5	15/07/2006 12:00	Youngdong-line Pyeongchang-Daekwanryung	Jinbu (560)	A
6				B
7				C
8	14/07/2013 09:10	Joongang-line 383.2k	Chuncheon (101)	B
9	15/07/2013 06:20	Seoul-Yangyang 64.7k Dongsan Tunnel 1, 2	Hongcheon (212)	S
10	22/07/2013 09:00	Youngdong-line 102.3k Gangcheon Tunnel	Buron (592)	B
11	22/07/2013 09:20	Joongbu line 332.8k	Seolbong (440)	A
12	22/07/2013 09:50	Joongbu Naeryook line 281k	Daesin (574)	C

또한, 실제 토석류 발생 전 30일의 강우자료를 토대로 1시간, 6시간, 3일 강우량을 시계열로 나타내면 Fig. 8과 같다. 이때, 2013년 자료는 기상청 AWS(automatic weather system) 자료이며 2002년과 2006년 자료는 기상청으로부터 관측자료를 제공받은 것이다.

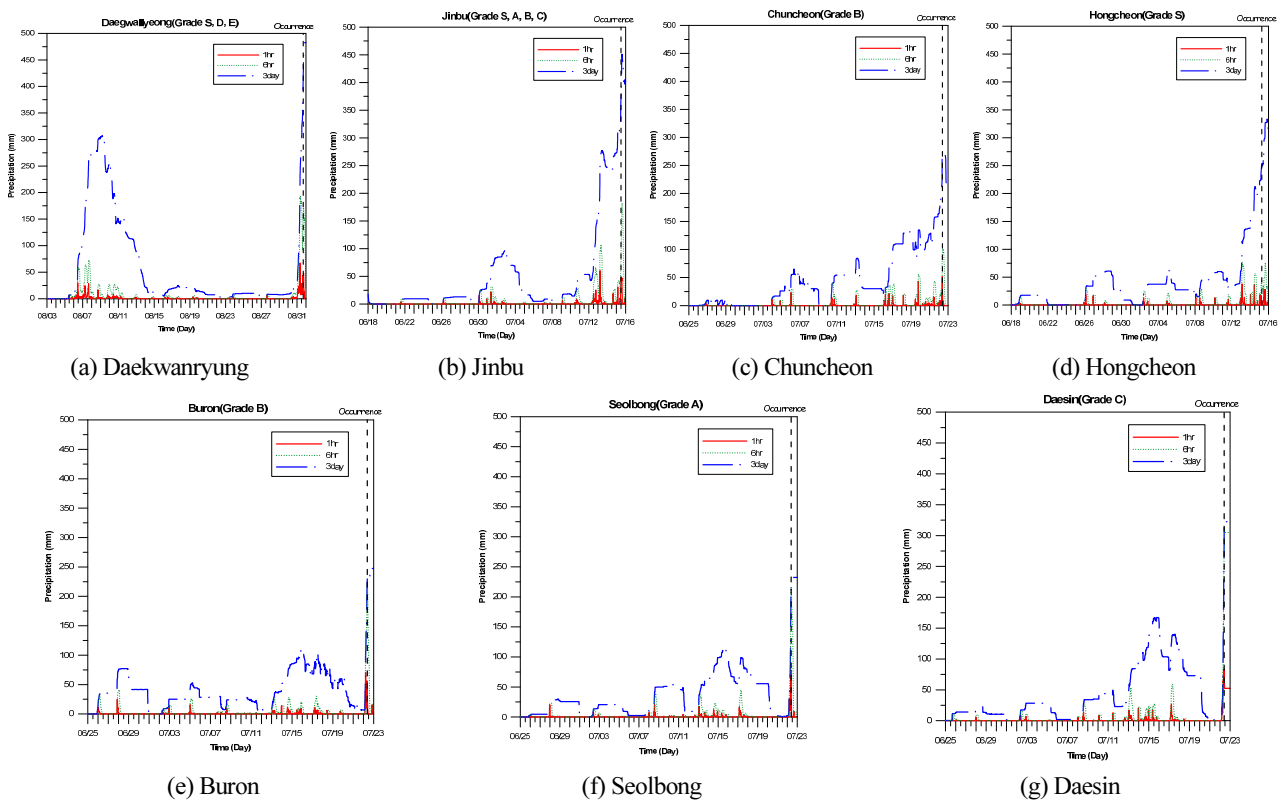


Fig. 8. Monthly rainfall before debris flow occurred

2.4.3 확률 강우량의 평균값과 하한값에 대한 타당성 검토

한국도로공사의 토석류 평가등급에 연계된 강우재현주기를 토대로 강원지역 8개지역의 1시간, 6시간, 3일(72시간)의 확률 강수량에 대해 확률 분석을 한 Table 8의 결과를 토대로 평균값과 하한값을 Table 10과 같이 산정하고 실제 피해가 발생한 시기의 강우자료를 분석하여 나타낸 Fig. 7의 시계열자료와 비교한 결과, Table 11과 같이 토석류 발생여부를 결정하는 1시간, 6시간, 3일 강우기준의 영향이 평가되었다.

Table 10. Rainfall criterion for early warning of highway debris flow

Division	1 hr rainfall			6 hrs rainfall			3 days rainfall		
	Range of rainfall frequency	avg.	Low limit	Range of rainfall frequency	avg.	low limit	Range of rainfall frequency	avg.	Low limit
S	36.5~47.7	40	35	88.6~122.8	100	90	218.7~317.7	270	220
A	47.7~62.2	50	45	122.8~167.2	140	125	317.7~443.7	370	320
B	62.2~71.4	65	60	167.2~195.1	180	165	443.7~527.4	480	440
C	71.4~78.3	75	70	195.1~216.3	205	195	527.4~586.8	560	520
D	over 94.2	95	95	over 265.0	265	265	over 724.5	725	725

Table 11. Assessment of rainfall criterion by comparison with rainfall data at debris flow occurrence

Division		1 hr		6 hrs		3 days	
		Lower limit	Average	Lower limit	Average	Lower limit	Average
Daekwanryung	Grade S	○	X	○	○	○	○
	Grade D	X	X	X	X	X	X
	Grade E	X	X	X	X	X	X
Jinbu	Grade S	○	○	X	X	○	○
	Grade A	○	X	X	X	○	○
	Grade B	X	X	X	X	X	X
	Grade C	X	X	X	X	X	X
Chooncheon	Grade B	X	X	X	X	X	X
Hongcheon	Grade S	X	X	X	X	○	X
Buron	Grade B	X	X	○	○	X	X
Seolbong	Grade A	○	X	○	○	X	X
Daesin	Grade C	X	X	○	○	X	X

Table 11에서 ○ 표기는 예경보를 발령한 경우이며, X는 미발령을 나타낸다. Table 11을 보면, 전체적으로 1시간, 6시간, 3일 강우기준을 만족하는 경우는 토석류 발생지점 12개소에 대해 7개소이었으며 음영으로 처리된 부분에 나타난 바와 같이 평균값보다는 확률분포의 하한값이 실제 상황을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한, 토석류 평가등급에 따른 영향성 검토결과, 토석류 평가등급이 S등급과 A등급의 경우에는 토석류 강우기준이 실제 상황을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이에 반해 평가등급이 B등급과 C등급인 경우에는 4개소 대상 중 2개소만 토석류 발생을 예측할 수 있는 것으로 나타났으며 평가등급이 D등급과 E등급은 2개소 모두가 토석류 발생을 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 점으로부터 실제 조기경보에 이용될 강우기준은 평가등급 D와 E의 경우에는 재현주기 500년 이상이라는 점을 고려할 때 강우기준의 하향조정(예를 들어, D와 E의 기준은 C의 기준을 사용)이 필요할 것으로 판단된다.

3. 결론

이 연구에서는 강우정보와 연계되어 있는 한국도로공사의 토석류 평가를 이용하여 토석류 발생빈도가 높은 강원지역을 대상으로 강원지역 8개 관측소의 확률 강우량을 수집하여 확률 분석을 수행하였다. 확률분석을 통해 토석류 평가등급과 연계된 재현주기를 바탕으로 1시간, 6시간, 3일 강우량에 대한 확률 분포를 산정하였다. 이때, 1시간, 6시간, 3일 강우량은 선행된 토석류 및 산사태 유발 강우강도에 대한 문헌들에 대한 분석을 통하였다. 또한, 확률분포를 토대로 평균값과 하한값에 대해 실제 토석류 발생지점 12개소의 발생시점 이전 30일의 강우자료를 이용하여 토석류 조기경보에 사용될 강우기준에 대한 타당성 검토를 수행하였다.

연구결과, 강원지역 확률 강우량의 평균값보다는 하한값이 실제 토석류 발생을 잘 반영하는 것으로 나타났으며 평가등급에 따른 타당성 검토의 경우, 평가등급이 S와 A의 강우기준은 토석류 발생을 잘 반영하는 반면, 등급 C이하의 경우에는 점차적으로 등급 하락에 따라 토석류 발생을 잘 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 이로부터, 고속도로 토석류 조기경보에 이용할 강우기준으로 1시간, 6시간, 3일 강우량은 토석류 발생예측을 위해 적절한 것으로 판단된다. 다만, 평가등급과 관련하여 추가적인 분석을 통해 C등급 이하에서의 강우기준 조정은 필요하다고 판단된다.

Acknowledgment

이 연구는 행정안전부의 재난안전 취약 핵심역량 도약기술 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2019-MOIS33-005).

References

- 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*. 32(4): 15-27. (in Korean)
- Hong, W. P., Kim, S. K., Han, J. G. (1990). Prediction of Rainfall-triggered Landslides in Korea. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 6(2): 55-63. (in Korean)
- Hwang, S. H., Kim, H. J., Ham, D. H., and Lee, D. R. (2012). Review of domestic landslide and debris flow forecast standard using hydrologic data. 38th KSCE conference. pp. 1895-1898. (in Korean)
- Kang, H. S. and Kim, Y. T. (2016). A Study on Warning Level-based-Landslide Triggering Rainfall Criteria considering Weathered Soil Type and Landslide Type. *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*. 16(2): 341-350. (in Korean)
- Kim, K. S. (2008). Characteristic of Basin Topography and Rainfall Triggering Debris Flow. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 28(5C): 263-271. (in Korean)
- Kim, K. S. (2009). Development of Debris Flow Hazard Analysis Method and Its Application, Expressway & Transportation Research Institute Research Report. (in Korean)
- KIGAM (2003). Landslide prediction and prevention technology research, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. (in Korean)
- Korea Forest Service, Landslide Information Systems. (<http://sansatai.forest.go.kr>)
- Nam, D., Lee, S., Kim, M., and Kim, B. (2018). Calculation of Rainfall Triggering Index (RTI) to Predict the Occurrence of Debris Flow. *The Journal of Engineering Geology*. 28(1): 47-59. (in Korean)
- Ministry of land, Infrastructure and Transport, Korea Precipitation Frequency Data Server. (<http://www.k-idf.re.kr>)
- Oh, J. and Park, H. J. (2013). Establishment of Landslide Rainfall Threshold for Risk Assessment in Gangwon Area. *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*. 13(3): 43-51. (in Korean)
- Seoul Metropolitan Government (2013). The 2nd step report for survey on the total number of slopes and construction of a damaging reduction system. (in Korean)
- Yoo, N., Yoon, D., Um, J., Kim, D., and Park, B. (2012). Analysis of Rainfall Characteristics and Landslides at the West

Side Area of Gangwon Province. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 13(9): 75-82. (in Korean)

Yune, C. Y., Jun, K. J., Kim, K. S., Kim, G. H., and Lee, S. W. (2010). Analysis of Slope Hazard-Triggering Rainfall Characteristics in Gangwon Province by Database Construction. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 26(10): 27-38. (in Korean)

Korean References Translated from the English

강효섭, 김윤태 (2016). 풍화토의 종류와 사면파괴 유형에 따른 위험수준별 산사태 유발 강우기준에 대한 연구. *한국방재학회 논문집*. 16(2): 341-350.

김경석 (2008). 토석류 발생 지형과 유발 강우 특성 분석, *대한토목학회 논문집 C*, 28(5): 263-271.

김경석 (2009). 고속도로 토석류 위험지 분석기법 개발 및 적용기준 수립. *한국도로공사 연구보고서*.

남동호, 이석호, 김만일, 김병석 (2018). 토석류 발생 예측을 위한 강우경보지수 산정. *지질공학. 대한지질공학회*. 28(1): 47-59.

오정림, 박혁진 (2013). 강원지역 사면재해 위험성 분석을 위한 강우기준 설정 연구. *한국방재학회 논문집*. 13(3): 43-51.

유남재, 윤대희, 험재경, 김동건, 박병수 (2012). 강원 영서지역 산사태 및 강우특성 분석. *한국지반환경공학회 논문집*. 13(9): 75-82.

윤찬영, 김경석, 이승우, 전경재, 김기홍 (2010). DB구축을 통한 강원지역 사면재해 유발강우특성 분석. *한국지반공학회 논문집*. 26(10): 27-38.

홍문현, 김정환, 정경자, 정상섭 (2016). 선행강우를 고려한 산사태 유발강기준(ID curve) 분석. *한국지반공학회 논문집*. 32(4): 15-27.

홍원표, 김상규, 한중근 (1990). 강우로 기인되는 우리 나라 사면 활동의 예측. *한국지반공학회 논문집*. 6(2): 55-63.

황석환, 김현준, 함대헌, 이동률 (2012). 강우자료를 이용한 국내 산사태 및 토석류 예보기준 검토. *대한토목학회 학술대회 논문집*. 1895-1898.