

토석류 발생 예측을 위한 강우경보지수 산정

남동호¹ · 이석호¹ · 김만일² · 김병식^{1*}

¹강원대학교 방재전문대학원, ²산림조합중앙회 산림공학연구소

Calculation of Rainfall Triggering Index (RTI) to Predict the Occurrence of Debris Flow

Dong-Ho Nam¹ · Suk-Ho Lee¹ · Man-Il Kim² · Byung-Sik Kim^{1*}

¹Department of Urban and Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University

²Forest Engineering Research Institute, National Forestry Cooperative Federation

Abstract

At present, there has been a wide range of studies on debris flow in Korea, more specifically, on rainfall characteristics that trigger debris flow including rainfall intensity, rainfall duration, and preceding rainfall. the prediction of landslide / debris flow relies on the criteria for landslide watch and warning by the Korea Forest Service (KFS, 2012). Despite this, it has been found that most incidents of debris flow were caused by rainfall above the level of landslide watch, maximum hourly rainfall, extensive damage was caused even under the watch level. Under these circumstances, we calculated a rainfall triggering index (RTI) using the main factors that trigger debris flow – rainfall, rainfall intensity, and cumulative rainfall – to design a more sophisticated watch / warning criteria than those by the KFS. The RTI was classified into attention, caution, alert, and evacuation, and was assessed through the application of two debris flow incidents that occurred in Umyeon Mountain, Seoul, and Cheongju, Inje, causing serious damage and casualties. Moreover, we reviewed the feasibility of the RTI by comparing it with the KFS's landslide watch / warning criteria (KFS, 2012).

Keywords: landslide watch/warning criteria, rainfall intensity, preceding rainfall, debris flow watch/warning, rainfall triggering index (RTI)

초 록

우리나라의 토석류에 관한 연구들을 살펴보면 강우강도 및 강우지속시간, 선행강우 등의 토석류를 유발하는 강우의 특성과 토석류 발생 등에 대한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 현재 산사태 및 토석류 예보는 산림청에서 제시한 산사태 경보 및 주의보 기준(Korea forest service, 2012)을 사용하고 있다. 그러나 산림청의 예보기준만으로 볼 때, 대부분의 피해는 주의보 기준 이상의 강우에서 발생한 것으로 나타났고, 또한 최대시강우량의 경우 주의보 이하의 강우에서도 많은 피해가 발생하였다(Hwang et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 산림청에서 제시한 산사태 경보기준 보다 더욱 세밀한 예·경보 기준을 산정하기 위해 토석류 발생원인 인자인 강우량, 강우강도 및 누적강우량을 이용하여 강우경보지수(rainfall triggering index, 이하 RTI)를 산정하였으며, 이를 등급화 하여 관심, 주의, 경계, 대피로 구분하여 토석류 피해가 발생했던 서울시 우면산, 청주시, 인제군 피해사례를 적용하여 평가하였다. 또한 기준에 산림청에서 제시한 산사태 경보 및 주의보 기준과 비교하여 적용성을 검토하였다.

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Byung-Sik Kim
E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr

Received: 22 January, 2018

Revised: 14 March, 2018

Accepted: 17 March, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

주요어: 산사태 예보기준, 강우강도, 선행강우, 토석류 예경보, 강우경보지수

서론

최근 지구온난화로 인한 이상기후는 전 세계적으로 큰 화제가 되고 있다. 국내의 경우 최근 100년 동안 기온의 상승 및 강수량 증가, 호우일수 증가 등의 이상기후가 발생하였다(Korea the meteorological administration, 2016). 이로 인해 폭우, 풍랑, 가뭄, 대설 등으로 인한 자연재해 발생이 증가하고 있으며, 특히 여름철인 6~9월에 발생하는 태풍 및 집중호우로 인한 2차 피해인 토석류 피해 또한 증가하고 있는 추세이다(Nam et al., 2016). 토석류는 물의 범람과 산사태가 결합되어 발생하는 복합적인 자연재해로, 주로 집중호우로 인해 발생하는데 이로 인해 유속의 증가, 토사유실, 대규모 암석의 이동 등이 발생하여 광범위한 재해를 발생시킨다(Gangwon development research institute, 2008). 국내의 토석류 피해들을 살펴보면 2006년 강원도 인제군, 평창군 토석류 피해, 2011년 서울시, 춘천시, 포천시, 2012년 삼척시, 2014년 부산시, 2017년 청주시, 천안시 등 전국 각지에서 토석류로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 원인으로는 집중호우로 인한 것으로 조사되었다.

이와 같이 토석류를 유발시키는 강우특성의 해석은 강우시 토석류 피해에 대한 조기경보체계 수립이나 토석류 피해 예방을 위한 재해방지시설설계 및 유지관리를 위해 매우 중요한 부분이며, 현재까지 강우를 이용한 토석류 예·경보에 관한 연구는 미비한 실정이다(Yune et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 Jan C. D. and Lee M. H. (2006)가 개발한 RTI 산정방법을 이용하여 강우로 인해 발생 가능한 토석류를 예·경보하기 위하여 과거 2012년~2013년까지 발생했던 산사태 및 토석류 피해지역 42개소의 강우자료를 사용하여 선행강우(24시간)를 고려한 강우강도 및 누적강우량을 이용하여 rainfall triggering index (RTI)를 산정하였다. 또한 산정된 RTI를 등급화 하여 구간별로 10~30%일 때 관심등급, 30~50%일 때 주의등급, 50~70%일 때 경계등급, 70~90% 이상일 때 대피등급으로 총 4단계로 정의하였으며, 토석류 피해가 발생했던 서울시 우면산, 청주시, 인제군 피해사례를 적용하여 토석류 발생 직전의 3시간, 6시간, 12시간 전에 대한 피해 등급 산정을 통해 대응 가능한 시간을 산정하였으며, 산림청에서 제시한 산사태 경보 및 주의보 기준을 이용하여 적용성을 검토하였다.

연구방법

국내에서는 산림청의 산사태 예보기준이 Table 1과 같이 정립되어 있으나, 토석류에 관한 예보기준은 미비한 실정이다. 현재로서는 2011년 우면산 토석류 및 춘천시 마적산 토석류 피해발생 이후 산림청, 한국지질자원연구원, 서울연구원, 한국도로공사 등 국내 연구기관들은 자체적으로 토석류 평가표를 만들어 토석류 위험지에 대한 평가를 실시하고 있는 실정이다(Jeong, 2014).

Table 1. Landslide prediction standard (Korea Forest Service)

	Maximum hourly rainfall (mm)	Daily rainfall (mm)	Continuous rainfall (mm)
Landslide warning	20 ~ 30	80 ~ 150	100 ~ 200
Landslide alarm	30	150	200

따라서 본 연구에서는 산림청에서 제시한 예보기준보다 더 세밀한 예·경보 기준을 제시하기 위하여 Fig. 1의 연구흐름

도를 바탕으로 2012년~2013년까지 강원도에서 발생했던 산사태 및 토석류 피해지역 42개소의 강우자료를 수집하여, Fig. 2에 제시한 연구개념도에 따라 토석류가 발생하기 직전 최대 7일 동안의 시간단위 강우량을 사용하여 24시간 동안 지속되는 연속강우일 경우 선행강우로 고려하나 24시간 동안 연속되지 않는 강우일 경우에는 제외하여 강우강도와 누적 강우량을 이용하여 RTI를 산정하였다.

산정된 42개소의 RTI를 이용하여 확률밀도함수를 통해 정규화 하여, 본 연구에서 제시한 4단계 발생등급을 적용하여 토석류가 발생할 확률, 즉 발생 가능성이 10~30%일 때 관심등급, 30~50%일 때 주의등급, 50~70%일 때 경계등급, 70~90% 이상일 때 대피등급으로 각 구간별로 등급화 하였으며, 90% 이상 RTI는 확정적으로 발생한다고 판단되어 산정하지 않았다.

또한 산림청의 예보기준과 비교 및 분석을 위해 과거 토석류가 발생했던 2011년 서울시 우면산, 2017년 충북 청주시, 2006년 인제군 피해사례를 적용하였으며, 토석류가 발생하기 직전의 3시간, 6시간, 12시간 전에 대한 피해 등급을 통해 대응이 가능한 시간을 산정하였다.

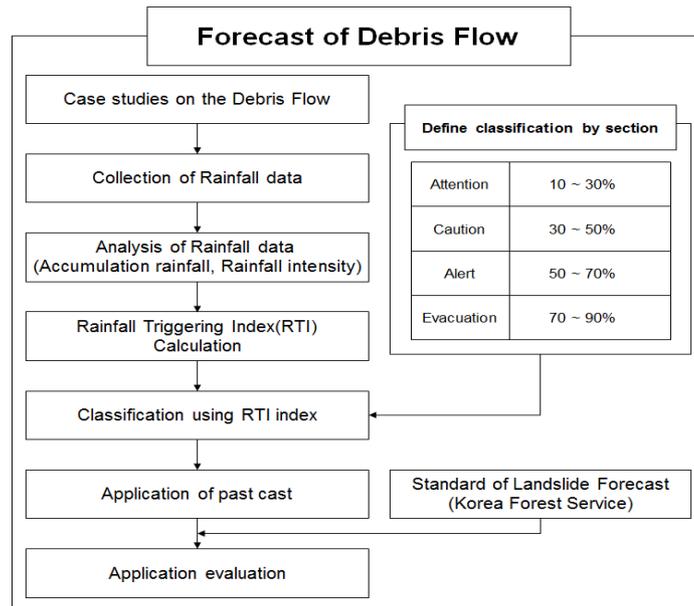


Fig. 1. Research flowchart for debris flow forecast.

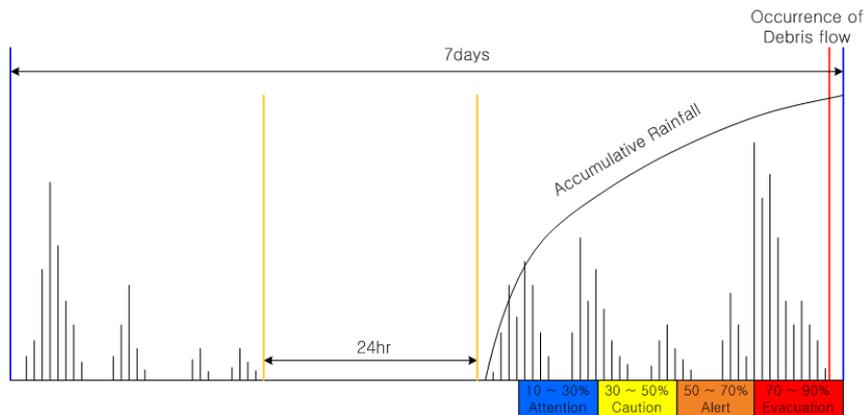


Fig. 2. Concept of research considering antecedent rainfall.

이론적 배경

토석류

토석류(Debris flow)는 토석의 흐름으로 뜻하며, 구체적으로는 토석 및 부유물 등이 중력에 의해 경사면을 따라 흐르면서 형태와 규모가 바뀌는 동적인 현상이다.

토석류라는 용어는 오스트리아의 지질학자인 Stiny (1910)가 그의 저서에서 처음 언급하였는데, 부유물과 유사를 다량으로 운반하는 산지의 홍수유출물을 토석류로 정의하였다. 또한 미국의 Sharpe (1938)가 토석류와 토석사태를 구분하여 정의하였는데, 토석류는 경사가 급한 수로에서 물로 포화된 토석의 흐름이라 정의하였고, 토석사태는 눈사태와 유사하게 급경사 사면에서 얇은 사면 파괴 토체가 빠르게 흘러내리는 현상으로 정의하였다.

RTI (rainfall triggering index) 모형

Jan and Lee (2006)에 의해 개발된 RTI 모형은 강우에 의해 발생하는 토사재해를 실시간으로 예측하는 모형으로써 강우강도(I)와 누적강우량(R_t)을 이용하여 산정한다. RTI 계산식은 다음과 같다.

$$RTI = I \times R_t \tag{1}$$

여기서 I 는 1시간 강우강도(mm/hr), R_t 는 토석류 발생 직전까지의 누적강우량(mm), 또한 R_t 는 최대 7일 동안의 강우사상 중 토석류에 직접적인 영향을 주는 24시간 동안 연속되는 강우는 선행강우(Yu, 2015)로 고려하나, 24시간 연속되지 않는 강우는 선행강우로 고려하지 않고 제외하여 산정하였다.

토석류 발생은 강우의 직접적인 영향을 받으며 특히 누적강우와 강우강도에 의해서 큰 영향을 받는다. 기존의 산사태 예·경보는 누적강우로 인한 예보와 강우강도를 이용한 예보, 일강우량을 이용하여 예보를 하나, RTI의 경우 누적강우량 및 강우강도를 이용하여 예보를 수행한다. Fig. 3은 RTI 개념도를 나타냈다.

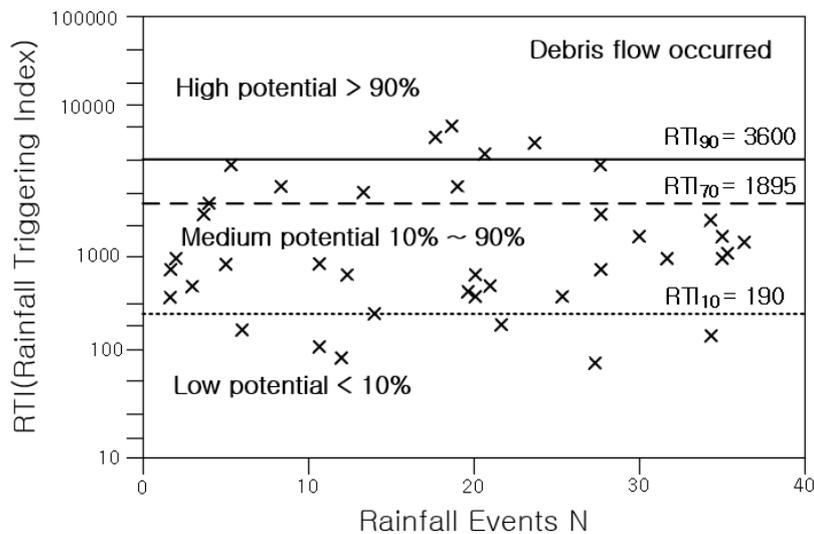


Fig. 3. Concept of rainfall triggering index.

결과 및 토의

RTI (rainfall triggering index) 산정

2012년~2013년까지 산사태 및 토석류 피해를 발생시킨 강원도의 37개소 강우사상을 이용하여 선행강우를 고려한 강우강도 및 누적강우량을 산정하였으며, 각 개소마다의 RTI를 산정하였다. 그 결과 강우 지속시간이 짧은 단일호우일 때 강우강도의 증가로 인해 RTI는 크게 증가하며, 강우의 지속시간이 길고 총 누적강우량이 비교적 클 경우 또한 RTI가 증가하는 경향을 볼 수 있다. Fig. 4는 산사태 및 토석류가 발생한 지점 및 강우관측소의 현황을 나타낸 그림이며, Table 2는 피해 발생시간 및 강우지속시간, 누적강우량, 강우강도, RTI를 나타낸 표이다.

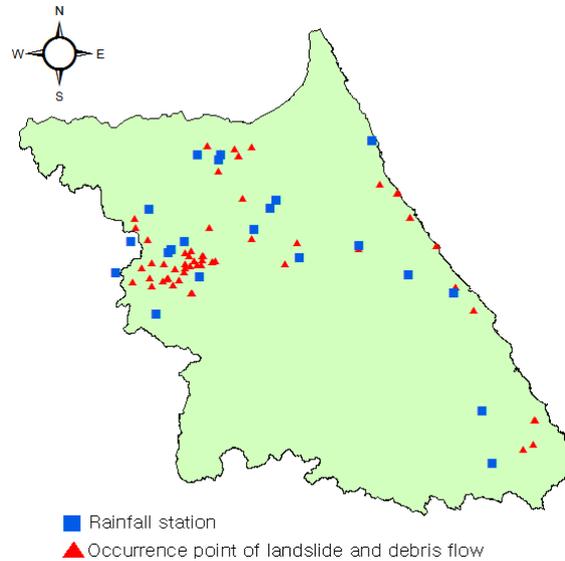


Fig. 4. Occurrence status of landslide and debris flow.

Table 2. Calculation of rainfall triggering index

Occurrence area	Occurrence time	Duration of rainfall (hr)	Accumulative rainfall (mm)	intensity (mm/hr)	RTI index
438, Imgok-ri, Gangdong-myeon, Gangneung-si, Gangwon-do	2012-09-17 11:05	30	149	4.98	745
143, Gyo-dong, Gangneung-si, Gangwon-do	2012-09-17 17:24	36	235	6.52	1534
1-3, Sodolsaet-gil, Jumunjin-eup, Gangneung-si, Gangwon-do	2012-09-17 10:00	26	88	3.38	297
39, Dochon-ri, Nam-myeon, Yanggu-gun, Gangwon-do	2013-07-18 20:30	10	31	3	93
1-22, Sangmuryong-ri, Yanggu-eup, Yanggu-gun, Gangwon-do	2013-07-18 20:30	9	125	13.88	1736
5, Eoron-ri, Nam-myeon, Inje-gun, Gangwon-do	2013-07-14 08:00	96	79	9.87	1290
Gangwon Province, Sanam-ri, Sangnam-myeon, Yanggu-gun, Gangwon-do	2013-07-14 08:00	72	212	2.94	623

Table 2. (Continued)

Occurrence area	Occurrence time	Duration of rainfall (hr)	Accumulative rainfall (mm)	intensity (mm/hr)	RTI index
97, Baegyang-ri, Namsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	75	281	3.74	1052
26, Changchon-ri, Namsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	120	333	3.7	1092
1-2, Goeun-ri, Dongnae-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	168	477	2.84	1354
70, Goeun-ri, Dongnae-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	168	477	2.84	1354
1, Saam-ri, Dongnae-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	168	477	2.84	1354
32, Saam-ri, Dongnae-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	168	477	2.84	1354
2, Sinchon-ri, Dongnae-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	168	477	2.84	1354
84-3, Gamjeong-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 00:00	64	154	2.4	370
38-1, Sanggeol-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
82, Sanggeol-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
53, Sanjeong-ri, Sanggeol-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
353, Sanjeong-ri, Sanggeol-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
2-1, Sini-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
1-1, Samgyeol-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
61-32, Ottan-ri, Sabuk-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	151	61	8.71	434
115-1, Wonpyeong-ri, Sabuk-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	104	222	2.96	591
1-1, Samgyeol-ri, Dong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
27, Bongmyeong-ri, Dongsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	74	343	4.63	1589
31, Bongmyeong-ri, Dongsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-14 09:08	88	359	4.08	1464
27-1, Bongmyeong-ri, Dongsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	88	359	4.08	1464
191, Wonchang-ri, Dongsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	88	359	4.08	1464
27-1, Joyang-ri, Dongsan-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	88	359	4.08	1464

Table 2. (Continued)

Occurrence area	Occurrence time	Duration of rainfall (hr)	Accumulative rainfall (mm)	intensity (mm/hr)	RTI index
5, Jiam-ri, Sabuk-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	168	310	3.37	1226
59, Dangnim-ri, Seo-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	85	179	8.14	1145
109, Deokduwon-ri, Deokduwon-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	76	289	3.8	1098
63, Seoksa-dong, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	76	289	3.8	1098
94-17, Jeong-ri, Sindong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	76	289	3.8	1098
100-1, Jeong-ri, Sindong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	76	289	3.8	1098
79-2, Palmi-ri, Sindong-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do	2013-07-15 00:00	76	289	3.8	1098

토석류 발생 예·경보 및 대응시간 분석

토석류 발생 예·경보를 위해서는 먼저 경보의 기준을 설정하여야 한다. 앞서 산정한 산사태 및 토석류가 발생했던 42개소의 RTI를 활용하여 토석류가 발생할 확률 10%일 때, 30%일 때, 50%일 때, 70%일 때, 90% 이상일 때의 구간별 RTI를 산정하였다. 산정결과 토석류가 발생할 확률이 10%일 때 RTI는 384, 30%일 때 1038, 50%일 때 1488, 70%일 때 1938, 90% 이상일 때 2584로 산정되었으며, 42개소의 RTI를 구간별로 나타냈을 때 대부분의 토석류가 70% 이하에서 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

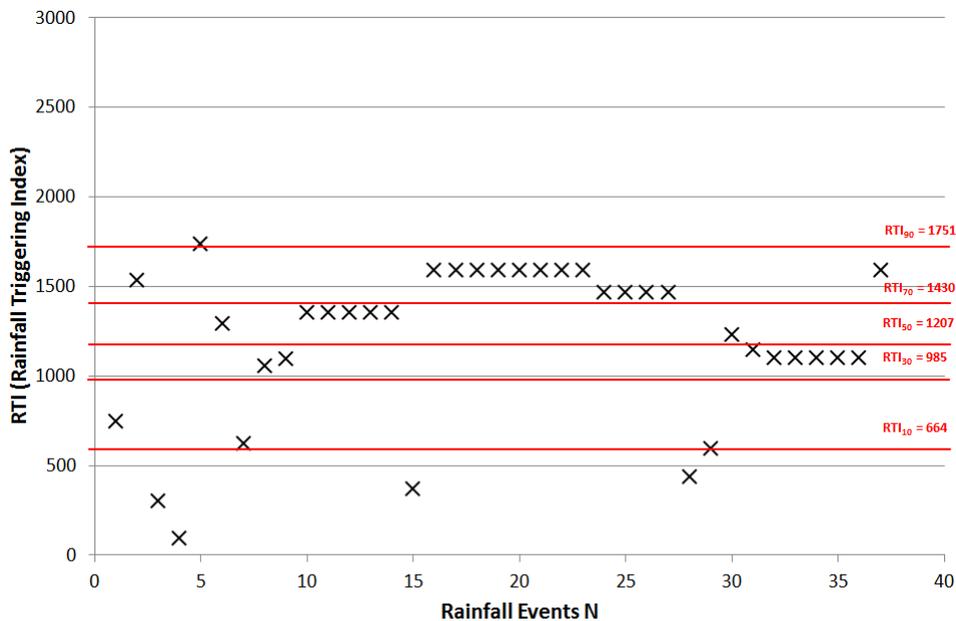


Fig. 5. Calculation of RTI index by fractions.

30% 이하일 때, 10% 이하일 때에서도 발생하는 것으로 보면 강원도의 지질학적, 지형학적 특성 때문이라고 판단되며, 강원도의 지질은 옥천신지향사대, 경기육괴, 평남분지, 웅진분지, 영남분지 등이 혼재되어 지괴들이 이루어져 있다. 지질 시대는 선캠브리아기부터 제4기까지 광범위한 시간적 범위를 보이고 있다. 대표적인 지질암종으로는 주라기 화강암류가 37%, 호상편마암류가 33%, 이암류가 17%로 우세하게 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 6). 일반적으로 변성암류와 화강암류는 지질학적 풍화양상에 따라 풍화잔류토가 가지는 점착력과 내부마찰각 등이 작아 산지재해가 다수 발생할 수 있는 특징을 가지고 있다.

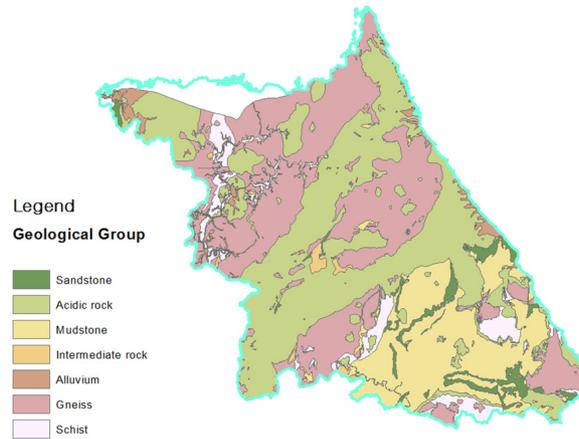


Fig. 6. Modified geological map of Gangwon-do province.

앞서 산정한 RTI의 적용성을 평가하기 위하여 2011년 토석류가 발생했던 서울시 우면산, 2017년 충북 청주시, 2006년 강원 인제군 피해사례를 적용하여 산림청의 산사태 예보기준과 비교하기 위해 구간별 등급을 설정하였으며, 토석류가 발생하기 직전의 3시간, 6시간, 12시간 전의 피해 등급을 통해 대응 가능한 시간을 산정하였다. 산정결과 서울시 우면산은 50시간동안의 지속적인 강우로 인해 RTI가 1897로 산정되어 90% 이상으로 대피등급으로 나타났으며, 토석류 발생 직전 3시간 전의 경우 30~50%로 주의등급, 6시간 전 10~30% 관심등급, 12시간 전 10% 이하로 나타났으며, 대응 가능했던 시간은 3시간 전이었다고 판단된다(Fig. 7). 산림청의 예보기준으로 봤을 때 일강우의 경우 36시~43시까지 주의보구간이었으며, 44시 이후부터는 경보구간으로 나타났다. 누적강우 또한 36시~43시까지 주의보구간, 44시 이후부터는 경보구간으로 나타났다. 강우강도의 경우 주의보 및 경보는 나타나지 않았다(Fig. 8). Table 3은 서울시 우면산의 RTI 예보 및 산림청 예보기준으로 예보한 결과를 나타냈다.

충북 청주시의 경우 RTI가 2332로 90% 이상으로 대피등급으로 산정되었으며, 토석류 발생 직전 3시간 전의 경우 10% 이하, 6시간 전과 12시간 전 또한 10% 이하로 산정되었다(Fig. 9). 이는 지속적인 강우가 아닌 5시간 동안의 짧은 시간에 강도 높은 강우의 발생으로 인해 발생한 것으로 대응 가능했던 시간을 산정하기에 어려움이 있다. 산림청의 예보기준으로 봤을 때 일강우의 경우 39시 약 1시간 동안의 주의보구간을 나타냈으며 40시~42시까지 경보구간으로 나타났다. 누적강우의 경우 39시~40시 약 2시간 동안 주의보구간이었으며 41시~42시까지 경보구간으로 나타났다. 강우강도의 경우 주의보 및 경보는 나타나지 않았다(Fig. 10). Table 4는 충북 청주시의 RTI 예보 및 산림청 예보기준으로 예보한 결과를 나타냈다.

또한 강원 인제군의 경우 비교적 짧은 지속시간 동안의 강우가 내렸음에도 불구하고 RTI가 1855로 90% 이상으로 대피등급으로 산정되었으며, 토석류 발생 직전 3시간 전의 경우 10% 이하, 6시간 전과 12시간 전 또한 동일하게 10% 이하로 관심등급으로 산정되었다(Fig. 11). 청주시의 결과와 마찬가지로 짧은 시간동안에 강도 높은 강우로 인해 발생한 것으로

판단된다. 산림청 예보기준으로 봤을 때 일강우량 및 강우강도는 주의보 기준에도 미치지 않았으며, 누적강우의 경우 토석류 발생 약 1시간 전에 주의보가 발생한 것으로 나타났다(Fig. 12). Table 5는 강원 인제군의 RTI 예보 및 산림청 예보기준으로 예보한 결과를 나타냈다.

Table 3. Calculation of rainfall triggering index (Seoul)

Occurrence area	Occurrence time	Duration of rainfall (hr)	Accumulative rainfall (mm)	intensity (mm/hr)	RTI	RTI forecast	Landslide forecast
Umyeon mountain Seoul	2011-07-27 08:30	50	308	6.16	1897	Evacuation	Alarm
	3 hour ago	47	234	4.98	1165	Caution	Alarm
	6 hour ago	44	185	4.20	777	Attention	Warning
	12 hour ago	38	133	3.5	466	Attention	Warning

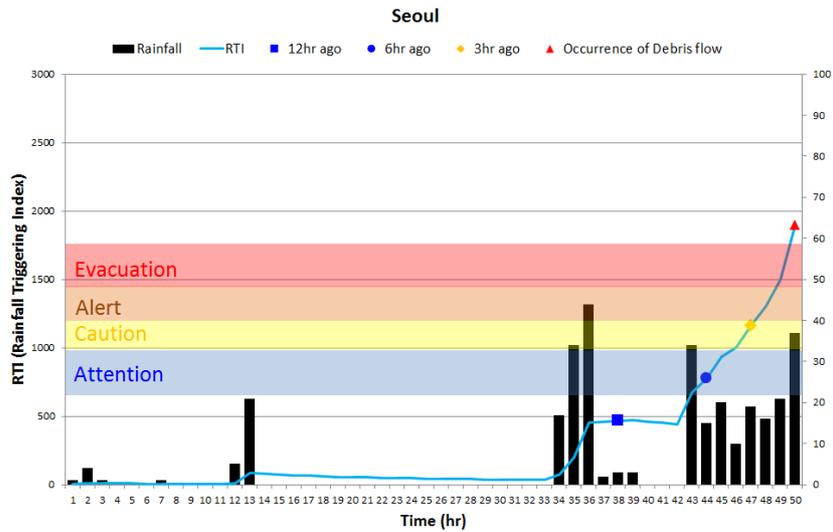


Fig. 7. The prediction of debris flow using RTI (Seoul).

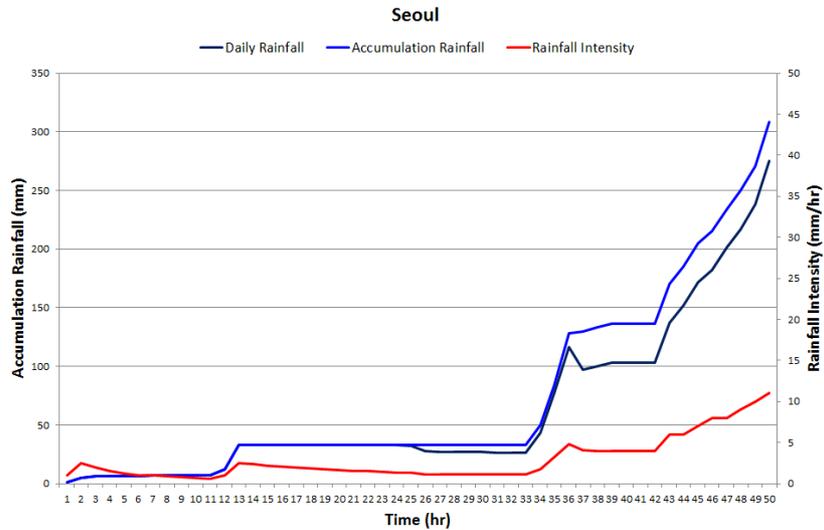


Fig. 8. The prediction of debris flow using Landslide forecast criteria (Seoul).

Table 4. Calculation of Rainfall Triggering Index (Cheongju)

Occurrence area	Occurrence time	Duration of rainfall (hr)	Accumulative rainfall (mm)	intensity (mm/hr)	RTI	RTI forecast	Landslide forecast
Cheongju	2017-07-16 15:12	42	313	7.45	2332	Evacuation	Alarm
	3 hour ago	39	133	3.41	453	Attention	-
	6 hour ago	36	19	0.53	10	Attention	-
	12 hour ago	30	15	0.5	7.5	Attention	-

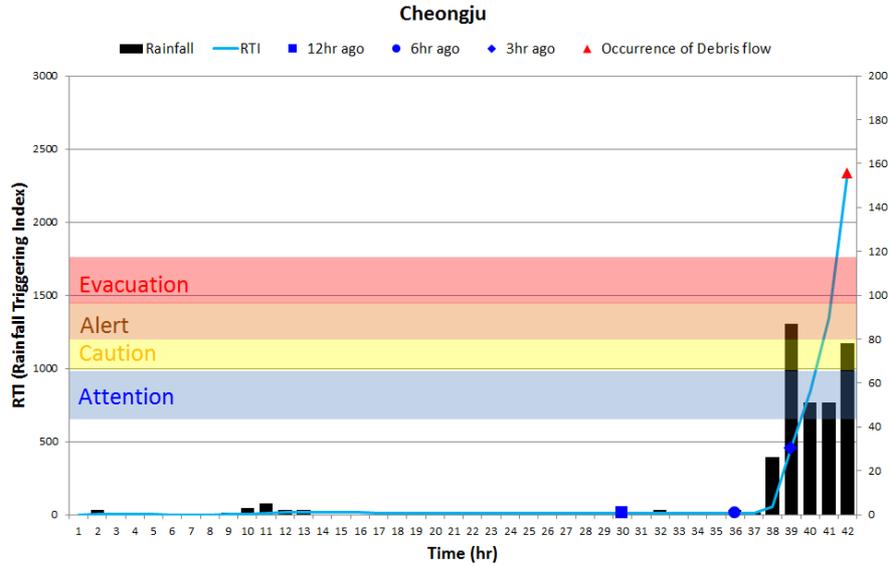


Fig. 9. The prediction of debris flow using RTI (Cheongju).

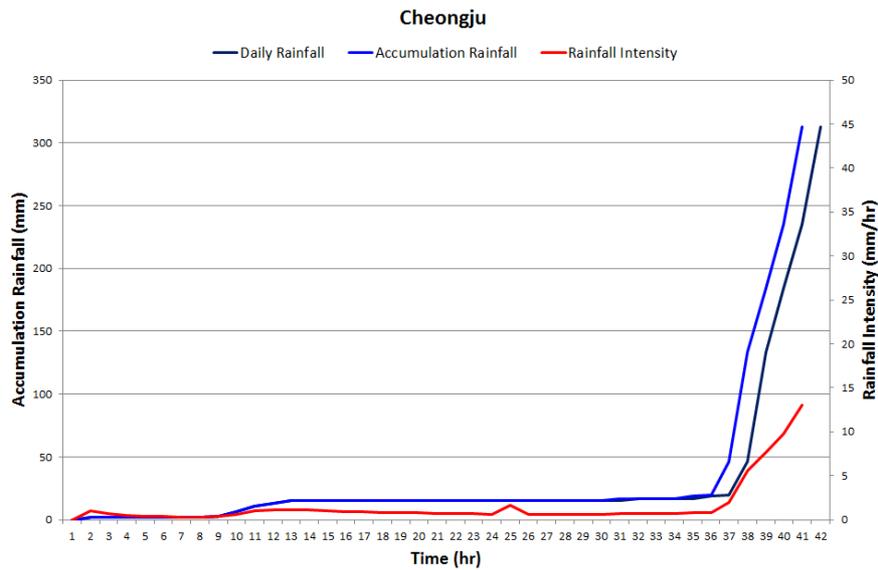


Fig. 10. The prediction of debris flow using Landslide forecast criteria (Cheongju).

Table 5. Calculation of Rainfall Triggering Index (Inje)

Ccurrence area	Occurrence time	Duration of rainfall (hr)	Accumulative rainfall (mm)	intensity (mm/hr)	RTI	RTI forecast	Landslide forecast
Cheongju	2017-07-15 10:00	24	211	8.8	1855	Evacuation	Warning
	3 hour ago	21	106	5	535	Attention	-
	6 hour ago	18	84	4.6	392	Attention	-
	12 hour ago	12	69	5.8	396	Attention	-

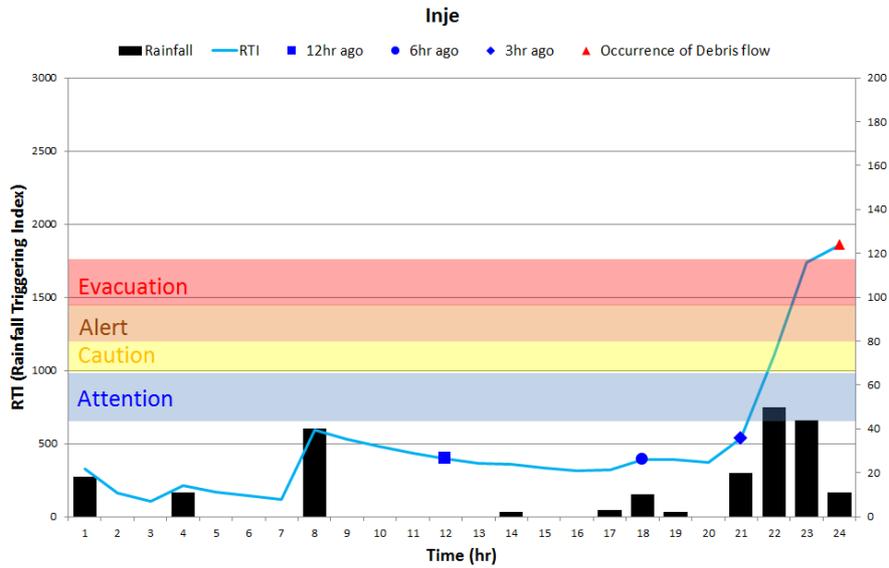


Fig. 11. The prediction of debris flow using RTI (Inje).

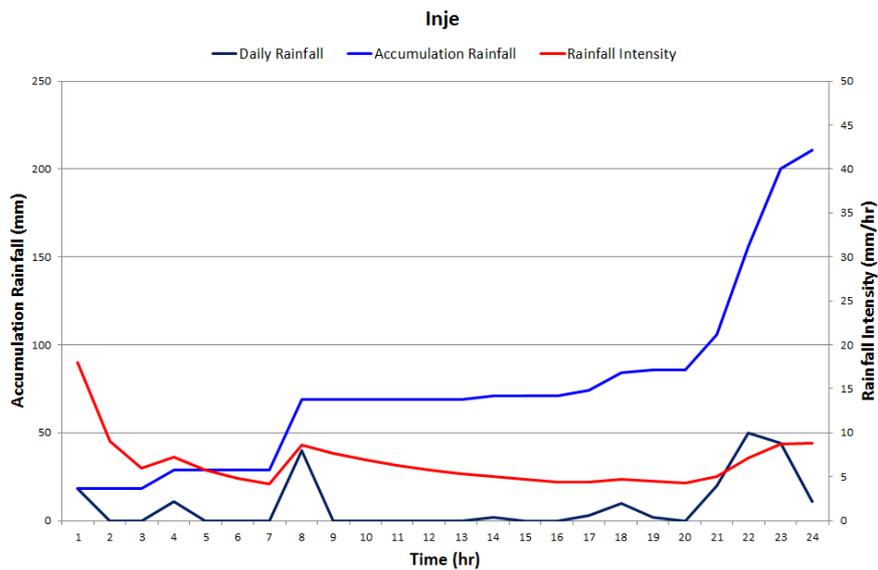


Fig. 12. The prediction of debris flow using Landslide forecast criteria (Inje).

결론

본 논문에서는 2012년~2013년까지 발생한 토석류 피해지역 42개소의 강우자료를 수집하였으며, 토석류가 발생하기 직전 최대 7일 동안의 강우량을 사용하여 24시간동안 연속되는 강우는 선행강우로 고려하였으나, 24시간 동안 지속되지 않는 강우일 경우 선행강우로 고려하지 않고 제외한 강우강도와 누적강우량을 이용하여 RTI를 산정하였다. 산정된 RTI 들은 산림청에서 제시한 산사태 예보기준과 비교하기 위하여 구간별로 등급화 하였으며 토석류가 발생할 확률이 10~30%일 때 관심등급, 30~50%일 때 주의등급, 50~70%일 때 경계등급, 70~90% 이상일 때 대피등급으로 4단계 등급을 설정하였다. 또한 적용성 검토를 위해 2011년 서울시 우면산, 2017년 충북 청주시, 2006년 강원 인제군 피해사례를 적용 하였으며 토석류가 발생하기 직전의 3시간, 6시간, 12시간 전의 피해 등급을 산정하여 대응 가능한 시간을 산정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

분석결과 서울시 우면산은 90% 이상으로 대피등급으로 나타났으며, 산사태 예보기준은 경보수준으로 나타났다. 충북 청주시 및 강원 인제의 경우 우면산 사례와 같이 90% 이상으로 대피등급으로 나타났으며, 산사태 예보기준으로 볼 때 청주시는 경보수준, 인제군은 주의보로 나타났다.

또한 토석류 발생 직전 대응 가능한 시간을 산정하기 위해 발생 직전 3시간, 6시간, 12시간 전의 RTI를 산정한 결과, 서울시 우면산의 경우 3시간 전 30~50%로 경계등급, 6시간 전 10~30% 관심등급, 12시간 전 10% 이하로 나타났으며 토석류 발생 직전 대응 가능했던 시간은 3시간 전부터였다고 판단된다. 충북 청주시의 경우 3시간 전 10% 이하, 6시간 전 10% 이하, 12시간 전 10% 이하로 나타났으며, 이는 5시간 동안의 짧은 시간에 강도 높은 강우로 인해 발생한 토석류 피해라 판단되며, 강원 인제군의 경우 3시간 전 10% 이하, 6시간 전 10% 이하, 12시간 전 10% 이하로 나타났으며, 이는 청주시의 결과와 마찬가지로 짧은 지속시간 동안 강한 강우강도에 의해 발생한 것으로 판단되며, 본 논문에서 제시한 예·경보 기준 보다 더욱 세밀한 예보기준이 제시되어야 한다고 판단된다.

사사

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(MOIS-재난-2015-05).

References

- Gangwon Development Research Institute., 2008, Characteristics and protective measures against natural hazards in the mountain areas of gangwon province, 1-77.
- Hwang, H. G., Lee, S. W., Kim, G. H., Choi, B. K., Yune, C. Y., 2013, Analysis of slope hazard-triggering rainfall and geological characteristics in 2011 and 2012, Korean society of hazard mitigation, 13(6), 179-189.
- Jan, C.D., Lee, M.H., 2006, A rainfall-based debris flow warning analysis and its application, Doctor of philosophy in National Cheng Kung University(in chinese).
- Jeong, J.W., 2015, Development on early warning criteria for debris-flow using realtime rainfall monitoring, MSc thesis, Seokyeong university.
- Korea Forest Service., 2012, Landslide forecast criteria, Retrieved from <http://sansatai.forest.go.kr>.
- Korea the Meteorological Administration., 2016, Korean peninsula climate changes forecast report, 1-3.
- Nam, D.H., Lee, S.H., Jun, K.W., Kim, B.S., 2016, Study on the debris flow movement and the run-out calculation using

- the coupling of flood runoff model and debris flow model, *Crisisonomy*, 12(8), 131-143.
- Sharpe, C.F.S., 1938, *Landslide and Related Phenomena*, Columbia University Press. New York, 3-137.
- Stiny, J., 1910, *Die Muren*. Verlag der Wagner'schen Univeritats-Buchhandlung, Innsbruck. Debris flow(English translation by M. jakob and N. Skermer, 1977) EBA Engineering, 106.
- Yu, B.I., 2015, *Study on flash floods and debris flow guidance of gangwon-do*, Department of urban & environmental disaster prevention school of fire & disaster prevention, Kangwon national university.
- Yune, C.Y., Jun, K.J., Kim, K.S., Kim, G.H., Lee, S.W., 2010, *Analysis of slope hazard-triggering rainfall characteristics in gangwon province by database construction*, *Korea geotechnical society*, 26(10), 27-38.