

## 최근 4년간 국내 사면재해 현장조사를 통한 유발인자 분석

### Analysis of Slope Hazard Triggering Factors through Field Investigation in Korea Over the Past Four Years

전 경 재<sup>1</sup> Jun, Kyoung-Jea

윤 찬 영<sup>2</sup> Yune, Chan-Young

#### Abstract

Triggering rainfall and geologic conditions with the state of slope hazard were investigated based on the field investigation and collected data on the slope hazard during the period between 2011 and 2014 in Korea. Analysis results showed that most of slope hazards occurred in metamorphic rock and debris flow was the most frequent type of slope hazard. Slope hazard increased when the higher monthly mean rainfall was recorded. However, most of slope hazard occurred when certain time elapsed after the moment of maximum hourly rainfall. Finally, more than one month of long-term rainfall was shown to be related to the frequency of slope hazard in the period.

#### 요 지

본 연구에서는 2011년에서 2014년까지 최근 4년간 국내에서 발생한 사면재해에 대한 현장조사를 수행하고 재해 발생지의 지질 및 강우자료를 수집하여 국내 사면재해 현황 및 유발강우와 지질특성을 분석하였다. 분석 결과, 변성암 지역에서 가장 많은 사면재해가 발생하였으며, 사면재해 중에서는 토석류가 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 월평균 강우량이 높을 때 사면재해도 증가하는 것으로 나타났으나, 대부분의 사면재해는 최대시간강우량이 내린 이 후 일정한 시간이 지나고 발생한 것으로 나타났다. 또한, 전반적인 사면재해 발생횟수는 1개월 이상의 장기강우와 관련이 있는 것으로 분석되었다.

**Keywords :** Slope hazard, Debris flow, Rainfall, Geologic condition

#### 1. 서 론

우리나라에서는 매년 6월~9월사이 우기에 태풍 및 집중호우, 장마 등으로 인하여 많은 자연재해(natural hazard)가 발생하였으며, 이로 인해 많은 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 2008년부터 2013년까지 국내에서 발생

한 자연재해와 사면재해(slope hazard)의 복구금액 및 사망자를 조사해본 결과, 연도별로 자연재해 복구금액이 최대 약 17.1배까지 점차 증가하고 있는 것으로 나타났다. 사면재해로 인한 복구금액도 매년 증가추세에 있는 것으로 조사되었다. 또한 자연재해 사상자는 매년 증가하고 있으며, 사면재해로 인한 사망자의 경우 2009

1 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사수료 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ.)

2 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ., Tel: +82-33-640-2423, Fax: +82-33-646-1391, yune@gwnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

년과 2011년, 2013년에는 자연재해로 인한 사망자 수의 46.2%, 67.9%, 100%를 차지할 정도로 사면재해가 자연재해 사망자의 상당부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 사면재해 사망자수는 사면재해로 인해 발생하는 복구금액이 클수록 증가하는 것으로 나타났다(Table 1).

사면재해의 발생 원인으로는 지질의 유형 및 구조, 지형, 토질, 임상 등의 내적요인과 강우, 하천 및 해안의 침식, 지진, 벌목, 산불, 채석개발 등의 외적요인을 들 수 있는데(Hong et al., 1990), 국내에서 발생하는 대부분의 사면재해가 우기에 집중적으로 발생되므로 우리나라 사면재해의 발생요인 중 가장 큰 요인은 강우임을 확인할 수 있다(Choi, 1989). 또한 기존연구에 따르면 사면재해를 유발하는 강우는 사면재해 발생 시점의 강우량도 중요하지만 발생이전의 선행강우(antecedent rainfall)도 중요한 것으로 나타나고 있다(Yune et al., 2010, Hwang et al., 2013). 그러나 다양한 인자들로 인해 발생하는 사면재해의 특성상 강우만으로 예측하는 것에는 많은 어려움이 있다. 따라서 사면재해를 예측하기 위해서는 강우 이외에도 지형, 지질, 기후 및 지역적 특성이 반영되어야 한다. 또한, 지질은 지역에 따라서 분포되어 있는 종류 및 특성이 다르기 때문에 동일한 강우에서도 사면재해의 발생거동이 상이하게 나타나므로 이에 대한 연구가 필요하지만 아직까지는 관련 연구가 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 최근 4년간 국내에서 발생한 사면재해에 대하여 현장조사, 지질(geology) 및 강우자료 수집 등을 통하여 사면재해 발생현황, 지질특성, 유발강우(triggering rainfall)를 분석하였다. 사면재해 발생현황 분석을 위하여 매년 보도자료를 통해서 발생시간 및 위치가 확인된 현장에 한하여 현장조사(field investigation)를 수행하였다. 이러한 현장조사 결과를 사면재해유형과 지역별로 나누어 사면재해에 영향을 준 태풍경로와 함께 발생현황

을 분석하였다. 또한, 기상청(KMA)의 기상연보 자료를 통해 연도별 6월~9월 사이 강우들의 특징과 월평균강우량(monthly mean rainfall) 및 평년대비 비율을 조사하여 월별 사면재해 발생횟수와 비교 분석하였다. 이에 더하여, 재해발생 지역에 대한 지질도 자료를 수집하고, 발생 지역의 지질을 확인하여 사면재해 유형과 비교, 분석하였다. 특히 조사된 자료가 발생위치와 시간을 정확히 아는 자료이므로 사면재해 발생이전 최대강우량(maximum rainfall) 발생시점 비교와 발생 시점의 시간강우량(hourly rainfall)과 일누적강우량(daily rainfall)의 관계와 발생이전 최대 시간강우량과 일누적강우량의 관계의 비교를 통하여 사면재해를 유발하는 강우의 특성을 확인하여 보았다.

## 2. 최근 4년간 국내 사면재해 발생 및 강우 현황

본 연구에서는 2011년도부터 매년 국내에서 발생한 사면재해 중에서 다양한 보도 자료를 통해서 발생시간 및 위치가 확인되고, 피해가 보고된 현장에 대하여 현장조사를 실시하고 자료를 수집, 분석하였다. 또한 보도자료에서 확인된 발생시간 및 위치는 현장조사 이전에 현장에서 가까운 지자체에 재확인하여 조사 자료의 신뢰성을 높이고 정확한 발생시간을 확보할 수 있도록 하였다.

현장조사에서 수집된 조사자료는 토석류(debris flow), 자연사면붕괴(natural slope failure), 인공사면붕괴(artificial slope failure)로 구분하여 정리되었다. 이 때 소규모의 사면붕괴로부터 시작되어 계곡 또는 사면을 따라 흘러 이동하다가 경사가 완만한 구간에서 퇴적된 사면재해를 토석류로 분류하였으며, 붕괴 후 흐름의 형태를 보이지 않고 바로 퇴적된 사면재해를 발생지 사면에 따라서 자연사면붕괴와 인공사면붕괴로 분류하였다. 총 185개

Table 1. Damages by slope hazard and natural hazard in Korea (NEMA, 2008~2013)

	Natural disaster		Slope hazard		%	
	Casualties	Property loss (1mil KRW)	Casualties	Property loss (1mil KRW)	Casualties	Property loss
2008	11	63,703	0	19,342	0	30.4
2009	16	298,828	6	69,594	37.5	23.3
2010	28	426,782	1	49,585	3.6	11.6
2011	78	794,200	53	157,961	67.9	19.9
2012	53	1,089,209	2	91,341	3.8	8.4
2013	4	386,558	4	53,244	100.0	13.8

의 조사자료를 연도별로 지도상에 Fig. 1과 같이 표시하였으며, 사면재해가 주로 발생했던 시기에 지나간 주요 태풍경로와 함께 도시하였다. 연도별로 조사된 사면재해 발생횟수를 비교해보면 2011년도부터 점차 감소하는 경향성을 보여주고 있으며, 태풍이 지나가지 않았던 2013년도를 제외하고는 사면재해 발생에 영향을 준 태풍의 이동경로 및 그 영향범위와 사면재해 발생위치가 유사하게 나타났다. 따라서 태풍의 이동경로를 따라 발생했던 강우와 태풍이 지나간 이후에 이동경로 상에 남아 지속된 강우가 사면재해의 발생위치에 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. 참고로 태풍의 영향범위는 우리나라를 지나는 태풍의 경우, 태풍의 중심으로부터 약 400km 이상이 되며, 기상청에서 풍속을 기준으로 산정한 태풍의 반경 및 태풍 상륙 시의 한반도 천리안영상 등을 당시의 강우자료와 비교한 결과(KMA, 2011; 2012; 2014), 태풍으로 인한 강우가 사면재해 발생과 큰 상관

성이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

연도별로 발생한 사면재해를 발생유형과 발생지역(중부지방, 남부지방)에 따라서 분류하여 Fig. 2의 그래프로 정리하였으며, 전체 조사된 재해를 재해종류에 따라서 Fig. 3과 같이 지도에 표시하였다. 이 때 중부지방은 서울, 경기도, 강원도, 충청도를 포함하는 지역이며, 남부지방은 전라도와 경상도를 포함하는 지역으로 정의하였다. 산림청(Korea Forest Service, 2014)에서는 2004년도부터 2013년도까지 최근 10년간 총 4537개소에 대한 조사를 통해서 산사태 발생 추이를 중부, 영남, 호남, 충청 총 4개 권역으로 구분하여 비교하였다. 그 결과, 각 권역에서 45%(2,030개소), 29%(1,305개소), 21%(954개소), 5%(248개소)의 비율로 산사태(landslide)가 발생한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과를 산림청과 같이 중부, 영남, 호남, 충청의 4개의 권역으로 구분해보면, 각 권역에서 42%(78개소), 37%(69개소), 12%(22개소),

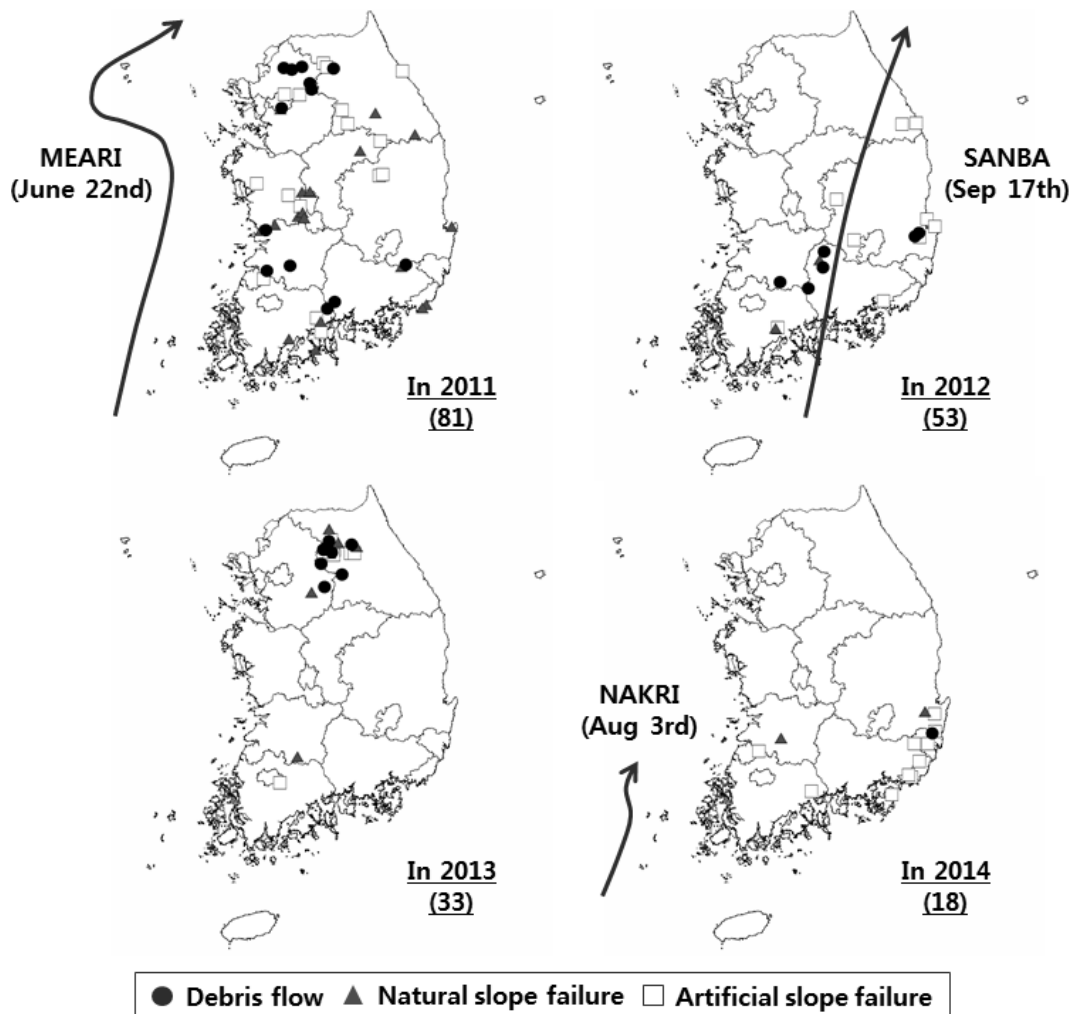


Fig. 1. Annual status of slope hazard occurrence and major typhoon paths

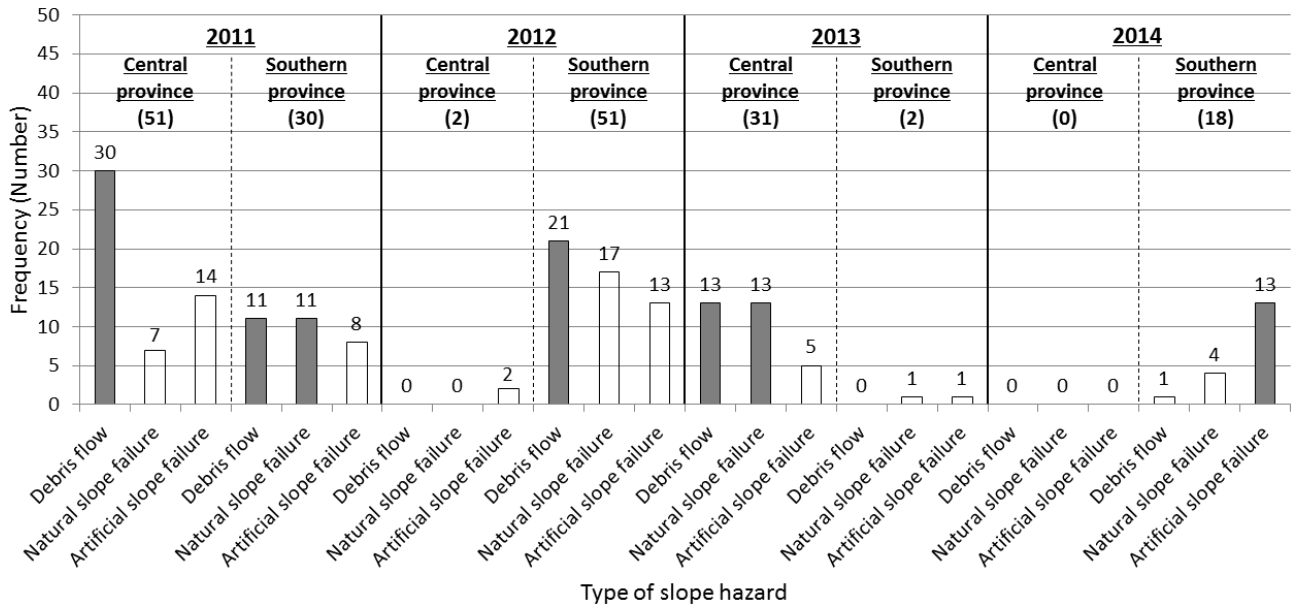


Fig. 2. Number of slope hazards in central and southern province of Korea

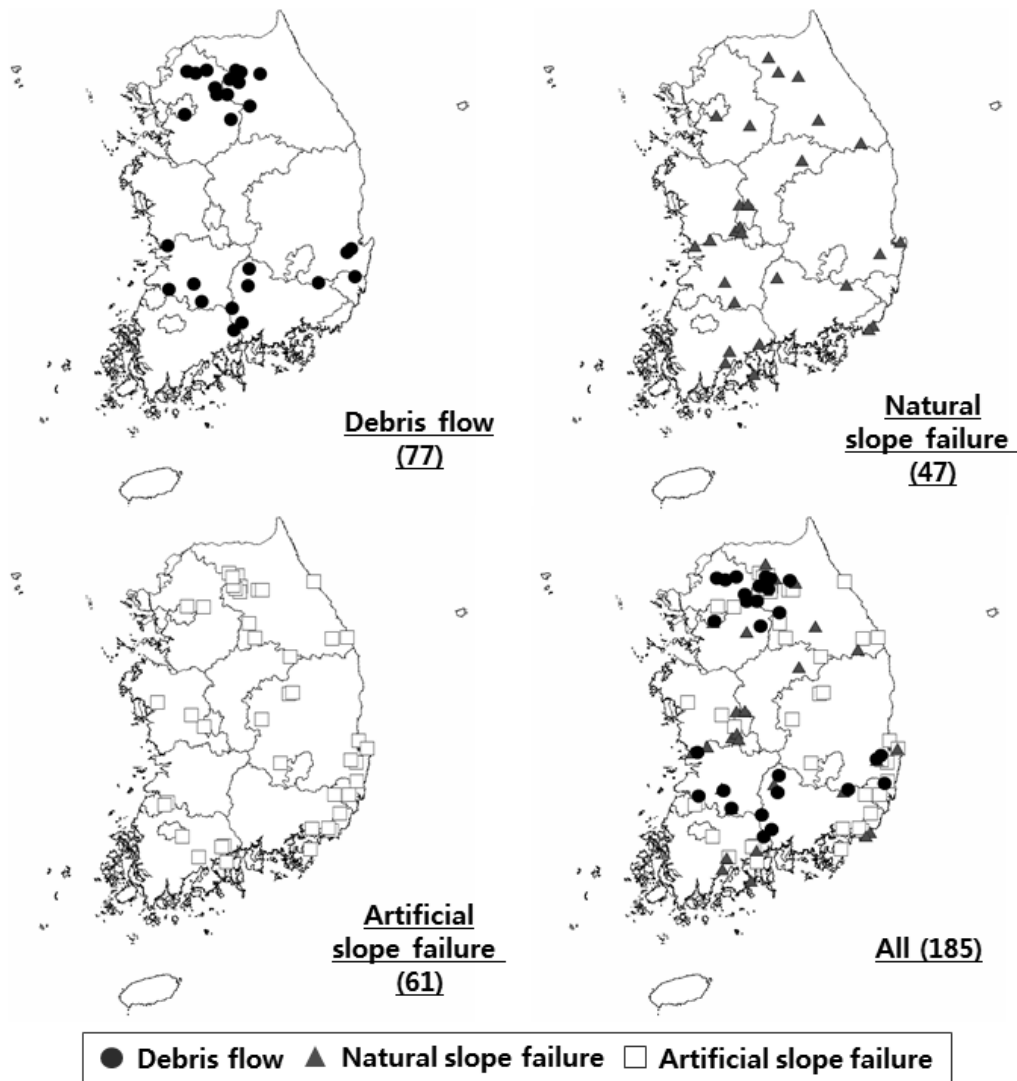


Fig. 3. Slope hazard type and occurrence for the past four years

9%(16개소)로 그 발생빈도(frequency)는 산림청의 분석결과와 유사한 것을 확인할 수 있다. 전체 사면재해를 유형별로 비교해보면, 총 185개소 중 토석류 77개소(41.6%), 자연사면붕괴 47개소(25.4%), 인공사면붕괴 61개소(33.0%)로 토석류, 인공사면붕괴, 자연사면붕괴 순으로 많이 발생하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 2의 재해발생 현황을 Fig. 1의 태풍의 경로와 비교해보면 태풍이 우리나라를 가로질러 지나가거나(2012년), 서해안쪽에 가까이 붙어서 이동하여 한반도가 위험 반경 안에 들어왔을 때(2011년)는 토석류 재해가 가장 많았고, 다른 해에는 인공사면 붕괴가 많이 발생한 것으로 나타났다. 태풍(typhoon)의 특성이 짧은 시간에 강한 강도의 강우를 발생시킨다는 사실과 본 논문의 4장에서 분석한 유발강우 특성을 근거로 판단하면, 토석류 재해(debris flow hazard)는 인공사면붕괴나 자연사면붕괴에 비하여 단기간의 강한 강우에 의하여 발생하는 특성을 보여준다고 할 수 있다. 이러한 토석류 유발강우 특성은 기존의 연구(Lee et al., 2014; Hwang et al., 2013)와도 일치하는 결과이다.

현장조사 결과를 종합해 보면 사면재해 발생횟수는 2011년 이후 점차 줄어드는 경향을 보여주고 있으며, 유형별로는 토석류 재해가 가장 많이 발생하고 있다. 이러한 사면재해를 유발하는 가장 큰 원인은 강우이며 특히 토석류는 다른 재해에 비하여 태풍의 영향을 더 많이 받는다는 것을 확인할 수 있다.

이러한 사면재해의 주된 유발원인인 강우에 대하여 분석하기 위하여 2011~2014년까지 강우자료를 수집하였다. 기상청의 기상연보자료(KMA, 2011; 2012; 2013; 2014)와 재해발생지점에서 가장 가까운 위치에 있는 기상청의 자동기상관측자료(AWS)를 수집하였으며 이를 발생시점을 기준으로 시간강우량, 일누적강우량 등으로 정리하여 데이터베이스를 정리하였다.

사면재해를 유발하는 강우에 대한 상세 분석은 4장에서 실시하였고, 여기서는 수집된 강우자료를 정리하여 최근 4년간의 월별 강우특성과 재해발생 현황을 비교하여 보았다. 기상청에서 연도별로 6월~9월 사이에 발생한 강우들의 특징과, 월평균강우량 및 평년대비 비율을 전국단위로 조사하여 기상연보에 나타난 결과들과 본 연구에서 조사한 월별 사면재해 발생 횟수와 비교, 분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 4, Fig. 5).

2011년도에는 태풍 메아리(MEARI)(6월22일), 무이파(MUIFA)(8월3일)와 7월의 집중호우(heavy rainfall) 및 장마(seasonal rainfall)로 인하여 6월과 7월에 평년대

비 많은 강우가 전국에 걸쳐 발생하였다(KMA, 2011). 월평균강우량 및 평년대비 비율을 보면 6월에는 평년대비 190%(288.6mm)의 많은 강우가 내린 것으로 나타났으며, 7월에는 평년대비 158%로 6월보다 비율은 낮으나 월평균강우량은 474.8mm로 6월에 비해 더 많은 강우가 내린 것으로 나타났다. 또한 8월에도 월평균강우량이 284.9mm로 6월만큼 많은 강우가 내린 것으로 나타났다. 9월에는 평년대비 43%(71.4mm)의 적은 강우가 내린 것으로 나타났다. 월별 사면재해 발생횟수는 강우량이 가장 많았던 7월에 대부분(70.4%)의 사면재해가 발생한 것으로 나타났으며 특히, 태풍 메아리가 지나간 후 35일 이후인 7월27일 하루에 전체 사면재해 발생 중에서 38.3%(31개소)가 발생한 것으로 나타났다.

2012년도에는 6월~9월 사이 중부와 남부를 오르내리는 장마와 5개의 태풍(카눈(KHANUN)(7월18일~19일), 담레이(DAMREY)(7월28일), 볼라벤(BOLAVEN)(8월28일), 덴빈(TEMBIN)(8월30일), 산바(SANBA)(9월17일))이 한반도를 지나면서 많은 강우가 내렸으며, 한 해 동안 한반도에 5개의 태풍이 지나간 경우는 1962년 이후 50년만이다(KMA, 2012). 월평균강우량 및 평년대

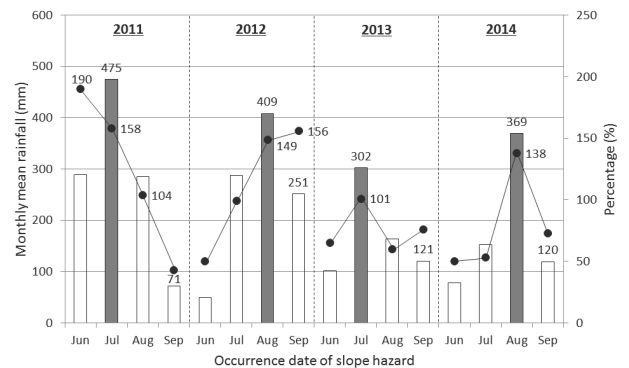


Fig. 4. Percentage of monthly mean rainfall to the average year value

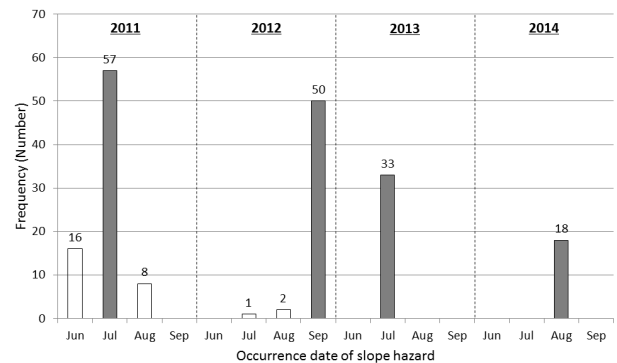


Fig. 5. Number of slope hazard by month

비 비율을 보면 6월과 7월에는 평년대비 적게 내리거나 비슷하게 내린 것으로 나타났다. 8월에는 평년대비 149% (408.5mm)의 많은 강우가 내렸으며, 9월에는 평년대비 156%로 비율은 8월보다 높으나 월평균강우량은 251.4mm로 8월에 비하여 강우가 적게 내린 것으로 나타났다. 월별 사면재해 발생횟수는 평년대비 많은 강우가 내린 9월에 집중된 것으로 나타났으며 특히, 태풍 산마가 상륙한 17일에 전체 사면재해 발생의 79.2%(42개소)가 발생한 것으로 나타났다.

2013년도에는 6월~9월 사이에는 평년대비 같거나 적은 월평균강우량을 기록하였으며, 장마전선(seasonal rain front)이 중부지방에 위치하여 중부와 남부의 강우량 편차가 매우 크게 나타났다. 이로 인해 중부지방에는 장기간 장마가 지속되었으나 남부지방에서는 열대야 및 폭염이 지속되었다(KMA, 2013). 또한 태풍도 여름철에는 없었고 10월이 되어서야 다나스(DANAS)(10월7일)가 지나면서 평년대비 많은 강우가 발생한 것으로 나타났다. 월별 사면재해 발생횟수는 강우량이 가장 많았던 7월에 조사된 모든 사면재해가 발생한 것으로 나타났다.

2014년도에는 태풍 너구리(NEOGURI)(7월9일), 나크리(NAKRI)(8월3일), 할롱(HALONG)(8월10일)이 우리나라를 지나갔으며 8월에 지나간 태풍들의 직접적인 영향으로 전국에 많은 비가 내렸고, 저기압의 영향을 자주 받아 비가 오는 날이 많았다(KMA, 2014). 월별 사면재해 발생횟수는 평년대비 많은 강우가 내린 8월에 집중된 것으로 나타났으며, 특히 태풍 할롱이 상륙하고 7일이 지난 8월 17일부터 4일간 전체 사면재해 발생의 83.3% (15개소)가 발생한 것으로 나타났다.

기상청자료 분석 결과를 종합해 보면 2012년을 제외

하고는 월평균강우량이 가장 높을 때 사면재해가 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 2012년도의 경우, 절대적 강우량은 8월이 가장 많았지만, 평년대비 비율은 9월이 가장 높았고 사면재해도 9월에 가장 많은 것으로 나타났다. 특히 2012년도 9월의 전국 평균 강우량은 평년대비 156%였지만 실제로 사면재해가 발생한 지역을 비교해보면 평년대비 186%(299.3mm)의 매우 많은 강우가 집중되었던 것을 확인할 수 있었다. 이는 최근 4년간 9월평균강우량 대비 약 1.2~4.2배 더 큰 수치이다. 따라서 사면재해는 강우의 영향이 가장 크며, 발생 시기는 6월~9월 사이 우기에 내리는 강우량에 따라서 결정되고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

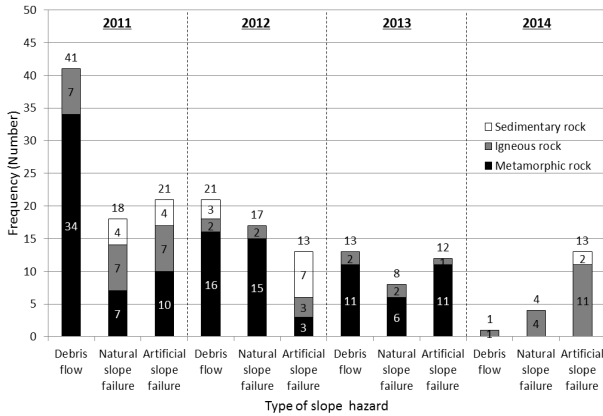
### 3. 국내 사면재해의 지질특성 분석

총 185개소의 사면재해 발생지에 대한 현장조사를 통하여 얻어진 경·위도 정보를 바탕으로 지질도 자료를 이용하여 발생지역의 지질을 확인한 결과, 확인되지 않는 3개소를 제외한 총 182개소에 대하여 Table 2와 같이 다양한 지질을 확인할 수 있었으며, 이를 변성암(metamorphic rock), 화성암(igneous rock), 퇴적암(sedimentary rock)으로 구분하여 사면재해 유형과 비교하였다(Fig. 6).

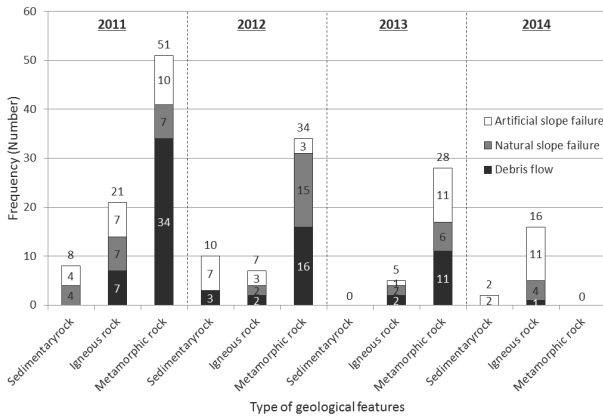
2011년도에는 총 81개소의 사면재해발생지 중 지질이 확인되지 않은 1개소를 제외하고 총 80개소에 대해서 지질별로 분류한 결과 변성암 51개소(63.8%), 화성암 21개소(26.3%), 퇴적암 8개소(10.0%)로 변성암지역에서 많은 사면재해가 발생한 것으로 나타났다. 또한, 사면재해 유형별 발생된 지질을 분석해본 결과 토석류와 인공사면붕괴가 발생한 지역에서 변성암인 지역이

Table 2. Geological features of slope hazard for past four years

Large	Medium	Small
Metamorphic rock	Regional metamorphic rock	Andesitic volcanic breccia
	Other metamorphic rock	Quartzite, Schist
Igneous rock	Coarse-grained	Granite
		Diorite
	Fine textured soils	Andesite
	Pyroclastic	Volcanic breccia
		Felsite
Rhyolites		
	Tuff	
Sedimentary rock	Aqueous clastic rock	Shale
	Chemical sedimentary rock	Carbonate rock
	Etc.	Alluvium, Dike



(a) Number of slope hazards according to hazard type



(b) Number of slope hazards according to geological features

Fig. 6. Number of slope hazards according to hazard type and geological features

각각 34개소(82.9%), 10개소(47.6%)로 가장 많은 것으로 나타났으며, 자연사면붕괴의 경우 18개소 중 변성암, 화성암 각각 7개소(38.9%)로 나타났다. 2012년도에는 총 53개소의 사면재해발생지 중 지질이 확인되지 않은 2개소를 제외하고 총 51개소에 대해서 지질별로 분류한 결과 변성암 34개소(66.7%), 화성암 7개소(13.7%), 퇴적암 10개소(19.6%)로 변성암지역에서 많은 사면재해가 발생한 것으로 나타났다. 또한, 사면재해 유형별 발생된 지질을 분석해본 결과 토석류와 자연사면붕괴가 발생한 지역에서 변성암인 지역이 각각 16개소(76.2%), 15개소(71.4%)로 가장 많은 것으로 나타났으며, 인공사면붕괴의 경우에는 퇴적암이 7개소(53.8%)로 가장 많은 것으로 나타났다. 2013년도에는 총 33개소의 사면재해 발생지에 대해서 지질별로 분류한 결과 변성암 28개소(84.8%), 화성암 5개소(15.2%)로 변성암지역에서 많은 사면재해가 발생한 것으로 나타났다. 또한, 사면재해 유형별 발생된 지질을 분석해본 결과 토석류와 인공사면붕괴가 발생한 지역에서 변성암인 지역이 각각 11개소

(33.3%)로 가장 많은 것으로 나타났으며, 총 8개의 자연사면붕괴의 경우에도 변성암인 지역이 6개소(75.0%)로 가장 많은 것으로 나타났다. 2014년도에는 총 18개소의 사면재해발생지에 대해서 지질별로 분류한 결과 2011~2013년도와는 다르게 변성암지역에서는 재해가 발생하지 않은 것으로 조사되었으며, 88.9%(16개소)의 사면재해 발생지가 화성암지역인 것으로 나타났다. 또한, 사면재해 유형별 발생된 지질을 분석해본 결과 인공사면붕괴만 퇴적암지역 2개소에서 발생한 것으로 나타났다.

최근 4년간 지질이 확인된 총 182개소에 대해서 지질별로 분류한 결과, 변성암 113개소(62.1%), 화성암 49개소(26.9%), 퇴적암 20개소(11.0%)로 변성암지역에서 많은 사면재해가 발생한 것으로 나타났다. 특히, 토석류는 총 76개소 중 80.3%(61개소)가 변성암지역으로 다른 사면재해 유형들 중에서도 변성암 지역에서 가장 재해발생이 많은 것으로 나타났다.

Kim et al.(1998)은 1996년도에 연천, 철원에서 발생한 산사태지역들을 조사하여 지질종류에 따른 발생빈도를 분석한 결과, 변성암지역보다 화강암지역에서 4.7배 더 발생한 것으로 조사하였다. 그러나 이러한 결과는 대상 지역에 대한 지질도를 확인해본 결과, 연천, 철원 지역에 화강암이 가장 많은 영역에 걸쳐 분포하고 있기 때문인 것을 알 수 있었다. 이와 같이 국내에 분포하고 있는 지질의 면적비율이 지역에 따라 다르기 때문에 조사지역에 따라 발생지의 지질분포가 분석 결과에 영향을 줄 수 있으므로 다음과 같이 국내 지질분포 면적 현황을 고려하여 비교, 분석을 수행하였다. Park(2015)은 변성암 43%, 화성암 32%, 퇴적암 25%가 한반도를 구성하고 있다고 하였으며, 한국지반공학회 암반지질기술위원회(Rock and Geological Technical Committee of Korean Geotechnical Society, 2012)는 변성암 42%, 화성암 35%, 퇴적암 23%의 비율로 구성되어 있다고 기술하고 있다. 이를 토대로 한반도에는 변성암이 많은 비율을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이는 북한을 포함한 비율이며 남한의 지질구성 비율은 화성암 44.2%, 변성암 34.9%, 퇴적암 20.9%로 화성암의 분포가 가장 많은 것으로 발표되었다(Oh, 2006).

다음 Table 3에는 각 지질유형과 사면재해유형별 발생빈도, 그리고 각 발생빈도를 면적비로 나눈 값을 정리하였다. 분포하고 있는 면적이 넓은 지질의 경우에는 재해에 대한 위험도가 다소 낮을지라도 실제 발생빈도는 높게 나타날 수 있으므로, 이를 보정하여 위험도를 상대

적으로 비교하기 위하여 발생빈도를 면적비로 나눈 값 (Ratio)을 사용하였으며, 이 값이 크면 동일 면적대비 발생빈도가 높다는 것을 의미한다. Table 3에서 볼 수 있는 것과 같이 모든 종류의 사면재해에 대하여 변성암에서 면적대비 가장 높은 발생빈도를 보여주고 있으며, 특히 토석류의 경우에는 다른 재해에 비하여 6~12배까지 높은 발생빈도를 나타낸다. 전체 재해를 모두 합쳐서 지질별로 비교해보면 퇴적암과 화성암은 면적대비 유사한 발생빈도를 보여주고 있으며, 변성암은 3배정도 높은 발생빈도를 보여준다.

#### 4. 국내 사면재해의 유발강우 분석

2011년부터 2014년도까지 최근 4년간 총 185개소의 현장조사 결과를 통해 얻어진 사면재해 발생 위치를 바탕으로 기상청의 자동기상관측자료(AWS)를 이용하여 발생위치와 가까운 관측소의 시간강우자료를 수집하였으며, 수집된 자료를 이용하여 시간강우량과 일누적강우량 등을 산출하여 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 데이터베이스를 이용한 유발강우 분석 결과는 다음과 같다.

여러 가지 강우 특성 가운데 먼저 최대시간강우량과 사면재해 발생과의 관계를 분석하여 보았다. 수집된 자료는 발생시점을 알고 있는 자료들이므로 최대시간강우량이 발생한 시점과 사면재해가 발생한 시점과의 시간차이를 Fig. 7에 도시하였다. 이 때 하나의 관측소 주변에서 다수의 사면재해가 발생한 경우도 있으므로 동일한 시간대에 동일한 관측소에서 발생한 사면재해는 중복으로 처리하여 제외하고, 총 99개 자료에 대하여 비교, 분석을 하였다. 분석 결과, 최대시간강우량 발생시점에서 32개소(32.3%)의 사면재해가 발생한 것으로 나

타나 모든 사면재해가 최대시간강우량이 발생한 시점에 발생하지는 않는 것으로 나타났다. 대부분의 사면재해는 최대시간강우량이 발생한 이후에 일정한 시간이 지나고 나서 발생하는 것으로 나타났는데 최대시간강우량이 발생한 시점 및 1시간 이내에 많은 사면재해가 발생하였으며, 시간이 지남에 따라 빈도는 점차 줄어가고 있으나 24시간 이후에도 상당히 많은(19.2%) 사면재해가 발생하고 있었으며, 최대 약 6일이 지난 시점에서 사면재해가 발생하기도 하는 것으로 조사되었다.

사면재해 발생 시점에서의 시간강우량과 발생 이전 최대시간강우량, 일강우량의 관계를 Table 4의 산림청 산사태 예·경보 기준과 비교 분석하였으며, 이를 사면재해 유형별, 지질 유형별로 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다. 역시 동일한 시간대에 동일한 관측소에서 발생한 사면재해는 중복으로 처리하여 제외하고 도시하였으나, 사면재해 유형과 지질의 유형이 다른 5개 경우는 분석에 포함하여 총 104개소에 대해서 정리하였다.

Fig. 8에서 사면재해 발생 시점에서의 시간강우량과 일강우량을 비교 해본 결과, 총 104개소 중 주의보(watch) 기준 이하인 경우는 66개소(63.5%), 경보(warning) 기준

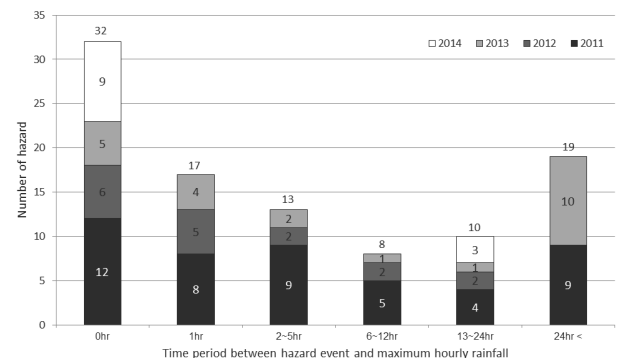


Fig. 7. Time period between hazard event and maximum hourly rainfall before slope hazard event

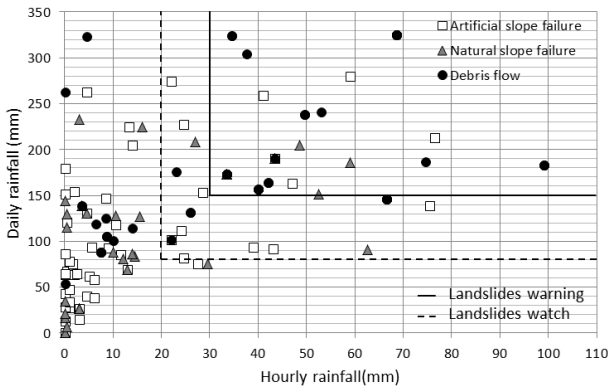
Table 3. Comparison of area ratio between types of slope hazard and geological features for past four years (F=Frequency)

	Debris flow		Natural slope failure		Artificial slope failure		Total slope hazard	
	F	Ratio	F	Ratio	F	Ratio	F	Ratio
Sedimentary rock (20.9%)	3	0.144	4	0.191	13	0.622	20	0.957
Igneous rock (44.2%)	12	0.271	15	0.339	22	0.498	49	1.109
Metamorphic rock (34.9%)	61	1.748	28	0.802	24	0.688	113	3.238

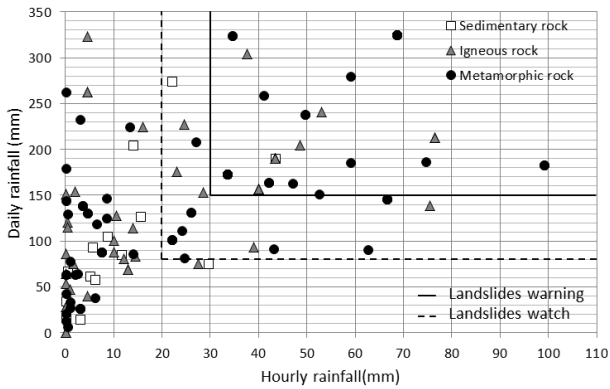
Table 4. Landslide warning criteria by Korea Forest Service (KFS, 2012)

	Hourly rainfall	Daily rainfall	Cumulative rainfall
Landslide watch	< 20~30 mm	< 80~150 mm	< 100~200 mm
Landslide warning	> 30 mm	> 150 mm	> 200 mm





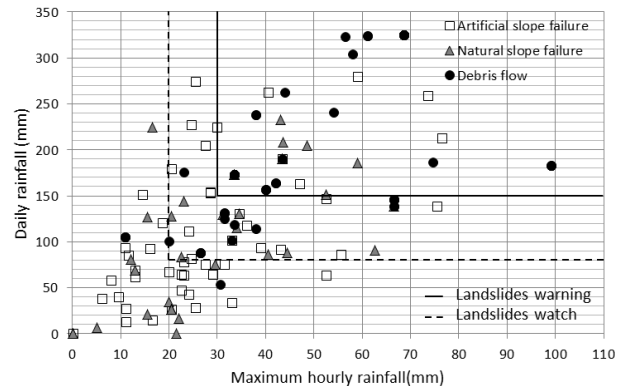
(a) Type of slope hazards



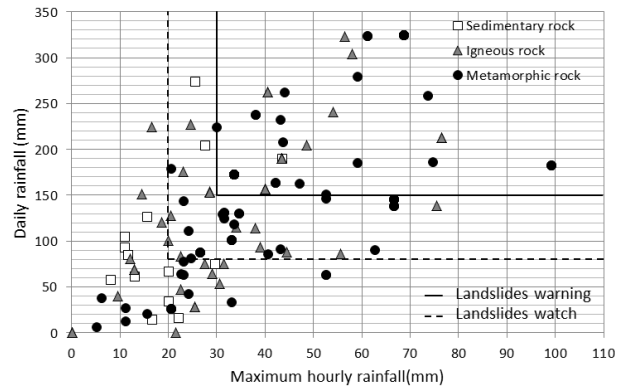
(b) Geological features

Fig. 8. Hourly rainfall and daily rainfall at time of occurrence

이하인 경우는 78개소(75.0%)로 나타나 대부분 주의보나 경보 기준보다 낮은 강우에서 사면재해가 발생한 것으로 나타났다. 사면재해 유형별로는 토석류(25개소), 자연사면붕괴(29개소), 인공사면붕괴(50개소)에 대해서 각각 주의보 기준 이하인 경우가 40.0%, 72.4%, 70.0%로 나타났으며, 경보 기준 이하인 경우는 52.0%, 79.3%, 84.0%로 토석류가 상대적으로 발생시점에서 주의보와 경보 기준이상의 많은 강우가 있었다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 토석류는 발생 시 시간강우량과 일누적강우량 모두 주의보 및 경보 기준 이하인 다른 사면재해들에 비해 발생 당시 시간강우량이 기준 이하인 경우에도 일강우량으로는 1개소를 제외하고 모두 주의보 기준보다 높은 강우조건에서 발생한 것으로 나타났다. 지질 유형별로는 변성암(50개소), 화성암(39개소), 퇴적암(13개소)에 대해서 각각 주의보 기준 이하인 경우가 56.0%, 64.1%, 84.6%로 나타났으며, 경보 기준 이하인 경우는 68.0%, 74.4%, 92.3%로 퇴적암 지역인 경우에는 모두 경보 기준 이하에 해당하는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 다시 정리하면 사면재해 발생시점의 강우량은 산사태 주의보나 경보 기준보다 낮은 경우가 많았으며, 토석류 재



(a) Type of slope hazards



(b) Geological features

Fig. 9. Maximum hourly rainfall and daily rainfall before slope hazards

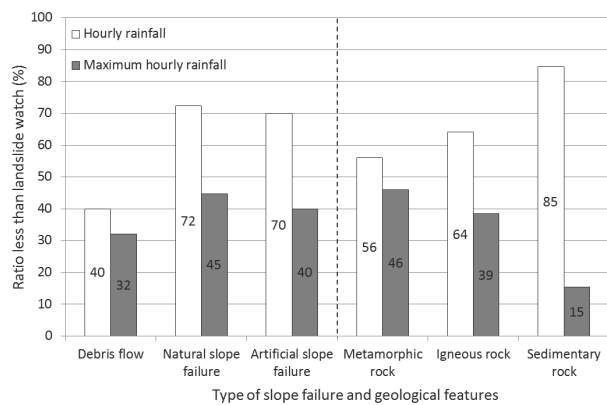
해와 변성암 지역은 다른 조건에 비하여 발생 당시의 강우가 상대적으로 많았던 것으로 나타났다. 또한 퇴적암 지역은 재해 발생시점의 강우가 대부분 산사태 경보 기준(92%)이나 주의보 기준(85%) 보다 작아서 다른 지질에 비하여 적은 강우에서도 재해의 발생가능성이 높은 것으로 나타났다.

동일한 자료의 가로축을 사면재해 발생 이전 최대시간강우량으로 변경하여 일강우량과 비교 해본 결과(Fig. 9), 총 104개소 중 주의보 기준 이하인 경우는 25개소(24.0%), 경보 기준 이하인 경우는 55개소(52.9%)로 나타나 발생 시 시간강우량에 비해서 주의보나 경보 기준에 못 미치는 지역이 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 재해가 발생하기 이전에 주의보 및 경보기준의 강우에 도달했으나, 그 이후에 시간 경과에 따라 기준 이하로 강우가 감소한 후에 사면재해가 발생한 경우가 많았다는 것을 의미한다. 이상의 결과를 각 재해 유형 및 지질별로 정리하면 Fig. 10과 같다.

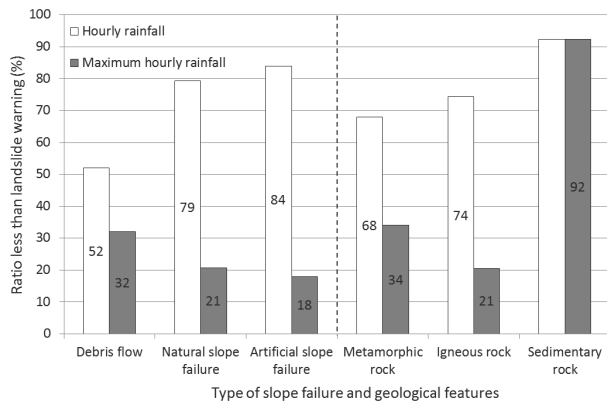
유발강우 분석 결과, 토석류와 변성암지역은 상대적으로 많은 강우가 내렸을 때 재해가 발생하고 있는 것으

로 나타났다. 또한, 대부분의 사면재해는 최대시간강우량이 발생한 이후에 일정한 시간이 지나고 주의보 및 경보 기준 이하로 강우가 감소한 시점에서 발생하는 것으로 나타났다. 특히, Fig. 7과 같이 최대시간강우량이 내린 시점과 사면재해 발생시점이 24시간 또는 그 이상 차이가 나게 될 경우, 주의보 및 경보를 듣고 대피했다가 일정시간이 지나 다시 복귀한 후에 재해를 당할 수도 있기 때문에 산사태 예·경보는 이를 발령하는 시점뿐만 아니라 이를 얼마나 유지하고 있어야 하는지도 추후 연구가 필요한 부분이라고 할 수 있다.

앞서 2장에서 분석한 것과 같이 최근 4년간 사면재해의 발생횟수는 점차 감소하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 사면재해의 발생 빈도와 여러 가지 강우의 특성을 비교해보기 위하여 전체 사면재해에 대한 강우량을 재해 유형별로 분류하고 이를 각각 재해발생시점을 기준으로 1시간 강우량, 1일 누적강우량, 1주일 누적강우량(weekly rainfall), 1개월 누적강우량(monthly rainfall), 3개월 누적강우량(three month of cumulative rainfall)으로 정리하여 Fig. 11에 도시하였다.



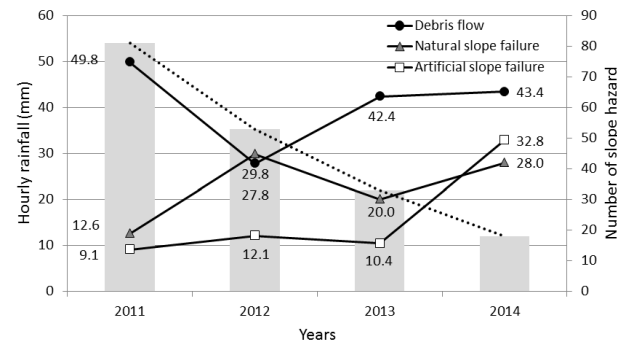
(a) Landslide watch



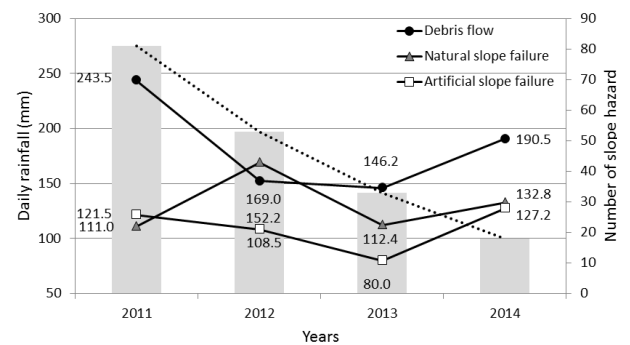
(b) Landslide warning

Fig. 10. Percentage less than landslide watch and warning criteria

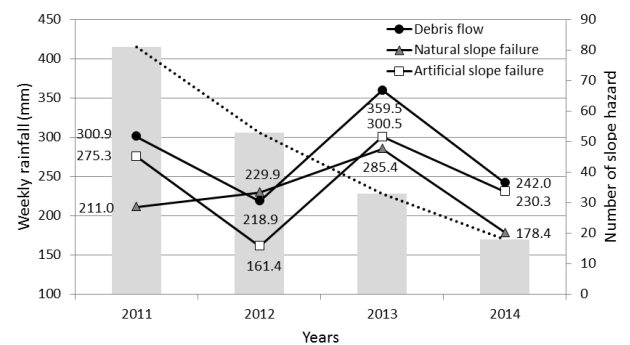
분석결과 발생시점으로부터 1시간, 1일, 1주일 누적강우량은 Fig. 11(a), (b), (c)에서 2012년을 제외하고는 토석류가 가장 큰 것으로 나타났으며, 2012년에도 토석류는 자연사면붕괴와 유사하게 다른 재해 대비 큰 강우량을 보여주고 있다. 하지만 재해발생횟수와 강우량과는 큰 상관관계는 보이지 않고 있다. 반면에 1개월 누적강우량에서는 토석류 재해의 경우 재해발생횟수와 강우량의 선형적 관계를 확인할 수 있으며(Fig. 11(d)), 3개월 누적강우량으로 정리하였을 때는, 인공사면붕괴를 제외한 모든 재해에서 뚜렷한 상관성을 보여주고 있다(Fig. 11(e)). 따라서 재해발생시점을 예측함에 있어서는 단기강우(short-term rainfall)를 이용하는 현재의 방법이



(a) Hourly rainfall

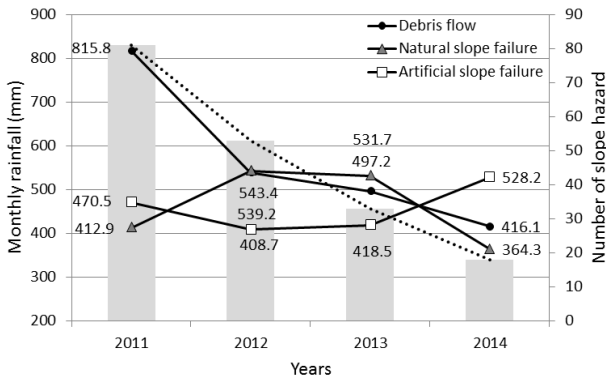


(b) One day of cumulative rainfall

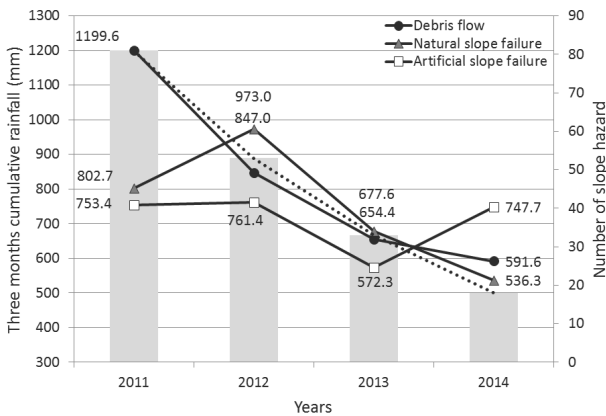


(c) One week of cumulative rainfall

Fig. 11. Comparison between total number of slope hazard and cumulative rainfall by years



(d) One month of cumulative rainfall



(e) Three months of cumulative rainfall

Fig. 11. Comparison between total number of slope hazard and cumulative rainfall by years (Continued)

유용하게 활용될 수 있지만, 전반적인 재해현황 및 발생 횟수를 예측하고자 할 때는 장기간의 강우 모니터링 및 분석이 필요한 것으로 보인다. 하지만 본 연구에서는 현장조사 및 수집된 자료를 이용하여 전반적인 경향성만 살펴보았기 때문에 장기강우(long-term rainfall)와 재해 발생에 대한 보다 정확한 예측과 평가를 위해서는 추후 더욱 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 최근 4년간 국내에서 발생한 총 185개소의 사면재해 발생지에 대하여 현장조사, 지질 및 강우 자료 수집 등을 통하여 사면재해 발생 및 강우 현황을 분석하고, 각 재해유형별로 지질과 유발강우 특성을 분석하였다. 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 최근 4년간 발생한 사면재해를 유형별로 비교해보면 토석류(77개소, 41.6%), 인공사면붕괴(61개소, 33.0%), 자연사면붕괴(47개소, 25.4%) 순으로 많이 발생하

고 있으며, 중부지방보다 남부지방에서 더 많은 재해가 발생한 것으로 나타났다. 사면재해의 발생횟수는 2011년 이후 점차 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

- (2) 2012년도를 제외하고 월평균강우량이 가장 높을 때 사면재해가 가장 많이 발생한 것으로 나타났으며, 2012년도의 경우에도 평년대비 강우량의 비율이 가장 높았던 9월에 사면재해가 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 또한 사면재해 발생 위치는 재해발생 일 근처에 지나간 태풍의 경로 및 그 영향범위와 유사한 것으로 나타났으며, 특히 토석류의 발생은 다른 재해에 비하여 태풍 및 태풍 이후에 그 영향범위에 남아서 지속적으로 영향을 미쳤던 강우와 관련이 높은 것으로 나타났다.
- (3) 사면재해 발생지역을 지질별로 분류한 결과, 변성암지역에서 가장 많은 사면재해가 발생한 것으로 나타났으며(51개소, 63.8%), 변성암 지역에서 발생한 사면재해 중에서는 토석류 재해가 가장 많은 것으로 나타났다. 또한 국내에 분포하고 있는 지질의 면적을 고려하였을 때 변성암 지역이 다른 암에 비하여 단위면적당 3배정도 높은 발생 빈도를 보여 가장 사면재해에 가장 취약한 것으로 나타났다.
- (4) 유발강우 분석 결과, 토석류와 변성암지역은 상대적으로 많은 강우가 내렸을 때 재해가 발생한 것으로 나타났다. 또한, 대부분의 사면재해는 최대시간 강우량이 발생한 이후에 일정한 시간이 지나고 주의보 및 경보기준 이하로 강우가 감소한 시점에서 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 최대시간강우량이 내린 시점과 사면재해 발생시점이 24시간 또는 그 이상 차이가 나게 되는 경우도 있어, 산사태 예·경보 발령시점 뿐만 아니라 그 지속시간도 중요한 것으로 나타났다.
- (5) 재해발생시점을 기준으로 1시간 강우량, 1일 누적강우량, 1주일 누적강우량, 1개월 누적강우량, 3개월 누적강우량으로 정리하여 최근 4년간 사면재해의 발생횟수와 비교해본 결과, 1개월 이상의 장기강우는 사면재해 발생횟수와 선형적인 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 재해발생시점을 예측함에 있어서는 단기강우를 이용하는 현재의 방법이 유용하게 활용될 수 있지만, 전반적인 재해현황 및 발생횟수를 예측하고자 할 때는 장기간의 강우 모니터링 및 분석이 필요한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012R1A1A4A01014940)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. Choi, K. (1989), "Prevention Plan and Forecasting Method of Landslide", *Journal of Forestry Research Institute*, No.27, pp.1-3.
2. Hong, W. P., Kim, S. K., and Han, J. G. (1990), "Prediction of Rainfall-triggered Landslides in Korea", *J. Korean Geotechnical Society*, Vol. 6, No. 2, pp.55-63.
3. Hwang, H. G., Lee, S. W., Kim, G. H., Choi, B. K., and Yune, C. Y. (2013), "Analysis of Slope Hazard-Triggering Rainfall and Geological Characteristics in 2011 and 2012", *J. Korean Society Hazard Mitigation*, Vol.13, No.6, pp.179-189.
4. Kim, W. Y., Lee, S. R., Kim, K. S., and Chae, B. G. (1998), "Landslide Types and Susceptibilities Related to Geomorphic Characteristics -Yeonchon-Chulwon Area-", *J. Engineering Geology*, Vol.8, No.2, pp.115-132.
5. Korea Forest Service (KFS) (2014), *Comprehensive Plan for Prevention of National Landslide in 2014*.
6. Korea Forest Service (KFS) (2012), *Landslide Prevention and Response Field manual*, pp.14.
7. Korea Meteorological Administration (KMA) (2011), *Yearbook of Weather Report*.
8. Korea Meteorological Administration (KMA) (2012), *Yearbook of Weather Report*.
9. Korea Meteorological Administration (KMA) (2013), *Yearbook of Weather Report*.
10. Korea Meteorological Administration (KMA) (2014), *Yearbook of Weather Report*.
11. Lee, J. S., Kim, Y. T., Song, Y. K., and Jang, D. H. (2014), "Landslide Triggering Rainfall Threshold Based on Landslide Type", *J. Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.12, pp.5-14.
12. National Emergency Management Agency (NEMA) (2008), *Yearbook of Disaster*.
13. National Emergency Management Agency (NEMA) (2009), *Yearbook of Disaster*.
14. National Emergency Management Agency (NEMA) (2010), *Yearbook of Disaster*.
15. National Emergency Management Agency (NEMA) (2011), *Yearbook of Disaster*.
16. National Emergency Management Agency (NEMA) (2012), *Yearbook of Disaster*.
17. National Emergency Management Agency (NEMA) (2013), *Yearbook of Disaster*.
18. Oh, Y. H. (2006), *Comparative analysis of distribution of rocks in the geological maps of South and North Korea*, Master dissertation, Korea National University of Education, pp.9-17.
19. Park, S. Y. (2015), "Aging of Rocks in Korean Peninsula", *Geotechnical Engineering*, Vol.31, No.1, pp.26-27.
20. Rock and Geological Technical Committee of Korean Geotechnical Society (2012), *Geology and Rock Engineering for Geotechnical Engineers III*, CIR, pp.737-740.
21. 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", *J. Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.10, pp.27-38.

Received : February 24<sup>th</sup>, 2015

Revised : April 15<sup>th</sup>, 2015

Accepted : April 20<sup>th</sup>, 2015