

축소모형 실험을 통한 국내 화강암 풍화토의 산사태 예측 실험 연구

손인환^{1*}, 오용택², 이수곤¹
¹서울시립대학교 토목공학과, ²(주)코앰테크

A Study on Experimental Prediction of Landslide in Korea Granite Weathered Soil using Scaled-down Model Test

In-Hwan Son^{1*}, Yong-Thak Oh², Su-Gon Lee¹
¹Department of Civil Engineering, University of Seoul
²Coamtech Co., Ltd.

요약 본 연구에서는 산사태 축소 모형 장치에 레이저 센서와 진동 센서를 설치하여 강우에 의한 사면 붕괴 시 토사의 미세 변위를 조기에 감지하여 붕괴 위험이 높은 사면에 대한 적절한 대책 마련과 사면 붕괴로 인한 피해를 최소화하기 위한 산사태 발생 시점을 예측하고자 실험을 실시하였다. 또한, 산사태 축소모형 실험을 통해 강우에 의한 토층의 거동 특성 및 간극수압과 수분과 같은 함수비 변화 특성을 분석하였다. 화강암의 풍화토로 인공사면을 조성한 다음 강우 조건을 200mm/hr와 400mm/hr로 달리하여 이에 따른 함수비(수압, 수분) 변화를 측정하고 지표 변위를 분석하기 위해 레이저 센서와 진동 센서를 적용하였으며, 영상분석을 위해 비디오 촬영을 하여 변위 발생시간을 상호 비교 분석하였다. 실험 결과 수분함량은 강우강도가 클수록 한계값 도달시간이 짧게 소요되는 것으로 나타났으며, 간극수압은 강우강도가 클수록 간극수압의 증가 시간이 짧은 것으로 나타났다. 산사태 모형실험은 현장 조건을 충실히 반영하지는 못하지만 진동 센서를 이용한 변위 발생 인지 시간을 측정한 결과 붕괴시점이 레이저 센서를 이용한 방법보다 보다 빠른 것으로 나타났다. 산사태 발생 시 센서를 이용한 지반변위 측정은 지속적인 연구를 수행할 경우 사면붕괴 예측 및 피해 저감 그리고 계측산업 활성화의 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, experiments were conducted to establish appropriate measures for slopes with high risk of collapse and to obtain results for minimizing slope collapse damage by detecting the micro-displacement of soil in advance by installing a laser sensor and a vibration sensor in the landslide reduction model experiment. Also, the behavior characteristics of the soil layer due to rainfall and moisture ratio changes such as pore water pressure and moisture were analyzed through a landslide reduction model experiment. The artificial slope was created using granite weathering soil, and the resulting water ratio(water pressure, water) changes were measured at different rainfall conditions of 200mm/hr and 400mm/hr. Laser sensors and vibration sensors were applied to analyze the surface displacement, and the displacement time were compared with each other by video analysis. Experiments have shown that higher rainfall intensity takes shorter time to reach the limit, and increase in the pore water pressure takes shorter time as well. Although the landslide model test does not fully reflect the site conditions, measurements of the time of detection of displacement generation using vibration sensors show that the timing of collapse is faster than the method using laser sensors. If ground displacement measurements using sensors are continuously carried out in preparation for landslides, it is considered highly likely to be utilized as basic data for predicting slope collapse, reducing damage, and activating the measurement industry.

Keywords : Landslide Reduction Model Experiment, Indoor Small-Sized Equipment, Vibration Sensors, Landslide, Rainfall Condition, Moisture Content, Pore Water Pressure, Laser Sensors, Time of Collapse

*Corresponding Author : In-Hwan Son(University of Seoul)

Tel: +82-10-5237-6530 email: sonih21@naver.com

Received April 1, 2019

Revised May 8, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

최근 지구 온난화와 이상 기후로 인하여 태풍과 국지성 호우가 빈번히 발생함에 따라 산사태의 우려는 더욱 더 커지고 있으며, 세계적으로도 자연재해의 발생 빈도가 증가하고 있는 실정이다. 이로 인한 피해는 산업의 발달과 함께 인구의 증가 등 직·간접적인 요인들로 인하여 점점 더 증가하는 추세에 있으며 특히, 우리나라는 지리학적 영향으로 연강수량의 대부분이 여름철인 6월에서 9월 사이에 장마나 계절성 집중호우 또는 태풍과 함께 동반되어 집중됨으로 인해 강우로 인한 인적·물적 피해가 늘어나고 있다. 이와 같이 강우는 산사태에 있어서 가장 중요한 요인으로 꼽힌다. 또한, 국내의 비탈면 대부분은 화강암과 편암의 풍화토층으로 대부분 지속적이거나 집중적인 강우에 의하여 대부분 1~2m 내외의 얇은 토사층과 암반층의 경계면에서 얇은 파괴가 발생하는 특징을 보이고 있으며[1], 특히, 화강암 풍화토 지역은 노두의 발달이 미약하고 풍화 심도가 깊지 않아 소규모의 붕괴가 우세하게 나타나는 우리나라는 화강암 지역에서 산사태가 더 많이 연관되어 있는 것으로 보고되고 있으며[2], 1990년 이후 산사태 발생 현황을 살펴 보아도 화강암지역이 다른 암반지역보다 산사태가 빈번히 발생한 것으로 나타났다[3]. 산사태는 매우 빨리 진행되면서 집과 도로 등 여러 가지 시설물을 붕괴시킴으로 매년 수십 명 이상의 인명 피해 및 막대한 재산 피해 그리고 교통 두절 등과 같은 피해가 발생되고 있는 실정이다. 따라서 토사 비탈면의 집중강우에 의한 피해예방과 유지관리를 위해서는 지표면 토층의 거동 특성을 파악하는 것이 매우 중요한 요인으로 대두되었다.

기존의 강우에 의한 산사태의 발생에 대한 연구 형태는 크게 강우 침투의 지하수 상승에 의한 사면파괴와 습윤 전선의 하강에 의한 사면 파괴로 연구되어 왔다. 최근 들어서 많은 연구자들에 의해 실내 모형실험을 통하여 산사태에 대한 여러 가지 연구가 활발히 진행되어 산사태 발생 메커니즘과 원인 그리고 발생 경사각, 표면 거칠기 등에 대해서는 명확하지는 않지만 어느 정도 규명되어 졌다[4].

그동안 많은 연구자들은 모형토조 실험을 통해 비탈면의 산사태 발생 특성 및 지반 조건(토층)의 변화 특성에 대한 연구도 진행하여 산사태 발생의 주요 요인 중의 하나로 표층의 체적함수비 변화를 꼽고 있다[5-7].

우리나라에서는 표층 변위 분석을 통한 산사태의 붕괴 전조를 예측하는 연구가 미미한 실정으로 본 연구에서는 사면 붕괴 시점을 사전에 예측하여 인명과 재산피해를 최소화할 수 있는 방안 마련을 위해 실내모형 실험에 레이저 센서와 진동센서를 설치하여 사면 붕괴 시 미세 변위를 감지하여 산사태 발생 시점을 예측하고자 실험을 실시하였다. 그리고 산사태 축소 모형 장치를 이용하여 강우에 의한 산사태의 발생 과정에서 붕괴 인지 시점과 실제 붕괴 시점과의 속도(시간)를 측정하기 위하여 화강암 풍화토를 이용하여 산사태 축소 모형실험을 수행하였다. 이를 위해 실험 장치의 사면의 기울기는 산사태 발생빈도가 비교적 높은 25°로, 토피고는 대부분 1~2m 내외의 얇은 토사층과 암반층의 경계면에서 발생하는 점을 감안하여 100mm로 정하고, 강우강도는 200mm/hr와 400mm/hr로 실험을 실시하였다.

또한, 강우강도에 의한 비탈면에서의 붕괴 시 토층 내에서 발생하는 변위를 동영상 분석과 레이저 센서 그리고 진동 센서에 의한 변위를 측정하여 산사태 발생 시 변위 인지 시점과 파괴 발생 시점 등을 분석, 평가하여 그 결과를 토대로 진동 센서가 산사태 변위를 예측하는 활용성을 검토하기 위하여 실험을 실시하였다.

2. 본론

2.1 실험장치 구성 및 실험 방법

본 연구에서는 지반 내 강우 강도에 의한 파괴 특성을 파악하기 위해 실내 산사태 모형실험 장치를 제작한 후 실험을 실시하였다.

본 모형실험 장치는 Fig. 1에서와 같이 모형토조, 인공강우장치 및 계측장치로 구분할 수 있다. 모형토조는 총길이 1.7m, 높이 0.5m, 폭 0.4m로 안에 토사를 쌓아서 비탈면을 조성하는 부분이며, 유압식 자동 조절기를 이용해 0~45°범위로 경사를 조절할 수 있도록 하였다.

인공 강우장치에 설치된 노즐은 낙수로 인한 세굴을 방지하기 위하여 안개 분사식 노즐로 설치하였으며, 강우조절 장치를 이용하여 100~500mm/hr 범위에서 조절할 수 있도록 하였으며, (a)는 모식도, (b)는 모형실험 장치, 그리고 (c)는 인공강우 장치의 모습이다.

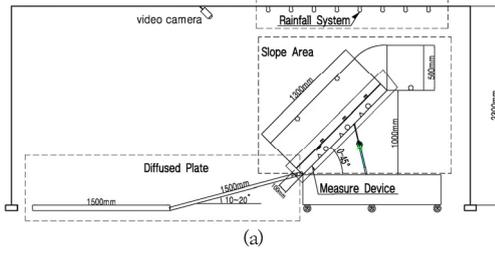


Fig. 1. Small-sized indoor landslide model equipment (a) Small-sized indoor landslide model pattern diagram (b) Small-sized indoor landslide model (c) Artificial rainfall system

계측장치로는 수압계, 수분계, 레이저센서, 진동의 계측센서와 데이터 로거, 컴퓨터로 구성되어 있다. 측정된 수압과 함수비는 데이터 로거를 통하여 컴퓨터에 자동 저장하도록 하였다. 본 모형실험에서 사용된 데이터 로거는 자체 제작(GL220)하여 사용하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용된 레이저센서(a), 수압계(b), 수분계(c)의 모습을 나타낸 것이다.

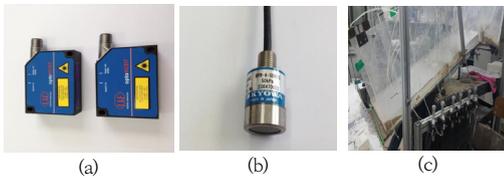


Fig. 2. Measuring device (a) Laser sensor (b) Pore pressure parameters (c) Moisture meter

Fig. 3은 정전용량의 변화를 이용해 가속도를 검출하는 원리를 이용한 진동센서로 가속도 인가 전(a), 인가 후(b)의 모식도이며, 지반의 미세 변위를 정밀하게 측정하기 위하여 사면에 진동센서를 설치한 모습(c)과 실험 사진(d)이다.

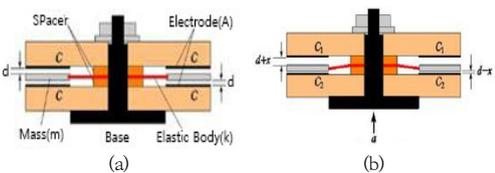


Fig. 3. Vibration sensor principle and photographs (a) Before acceleration authorization (b) After acceleration authorization (c) Installation photograph (d) Photograph

Fig. 4는 본 실험에서 붕괴 시점을 측정할 수 있는 진동 센서의 자료 취득 모식도이다.

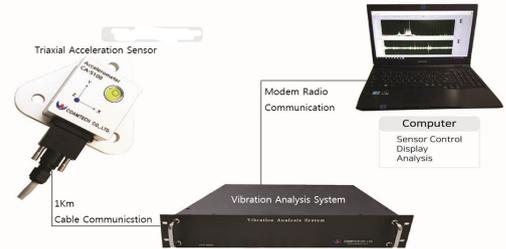


Fig. 4. Vibration analysis system

본 모형실험에서의 지반재료로는 서울경기 지역의 대표적인 기반암인 화강암 풍화토를 사용하였으며, 실험토사의 공학적 특성을 파악하기 위하여 수행된 토질 시험 결과는 Table 1과 Fig. 5와 같다.

Table 1. Results of indoor physical test

Sortation		Test results	Remarks	
Atterberg limit	W _n (%)	4.2		
	G _s	2.65		
	LL(%)	NP		
	PL(%)	NP		
Sieve analysis	PI(%)	NP		
	4.75mm(%)	80.8		
	2.0mm(%)	68.6		
	0.425mm(%)	14.9		
U.S.C.S		0.075mm(%)	6.2	
U.S.C.S		SP-SM		

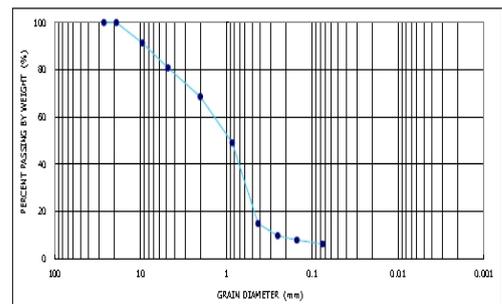


Fig. 5. Grain size distribution curve

2.2 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 산사태 모형 실험 장치를 이용하여 토사를 인공 사면에 적치한 후 인공 강우를 내리게 하여 토사의 붕괴를 유도하면서 실험을 실시하였다. 인공 강우를 내리는 것을 시작 시점으로 하였으며, 데이터 분석 그래프에서 변위계의 붕괴 감지한 것을 각각의 계측 결과에 대비하여 적용하였다.

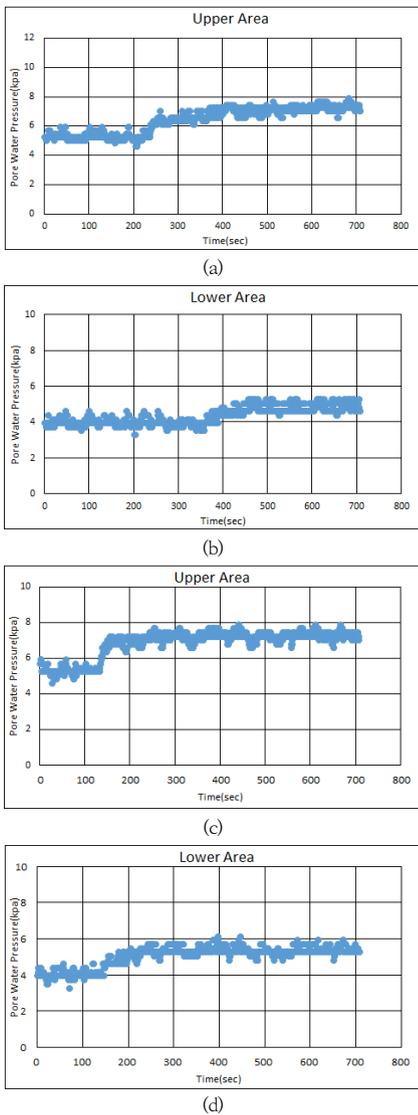


Fig. 6. Pore water pressure measurement result
 (a) Upper area pore water pressure meter at 200mm/hr of rainfall
 (b) Lower area pore water pressure meter at 200mm/hr of rainfall
 (c) Upper area pore water pressure meter at 400mm/hr of rainfall
 (d) Lower area pore water pressure meter at 400mm/hr of rainfall

2.1.1 간극수압과 수분의 변화

토층의 거동을 분석하기 위해 간극수압과 수분의 변화를 살펴보았다. 강우강도에 의한 간극수압 변화의 예를 Fig. 6에, 수분의 변화는 Fig. 7에 도시하였다.

간극수압 측정 결과를 분석해 보면 강우강도 200mm/hr 조건에서의 수압의 변화는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 상부(a)에서 200초 내외부터, 중하부(b)는 360초 이후

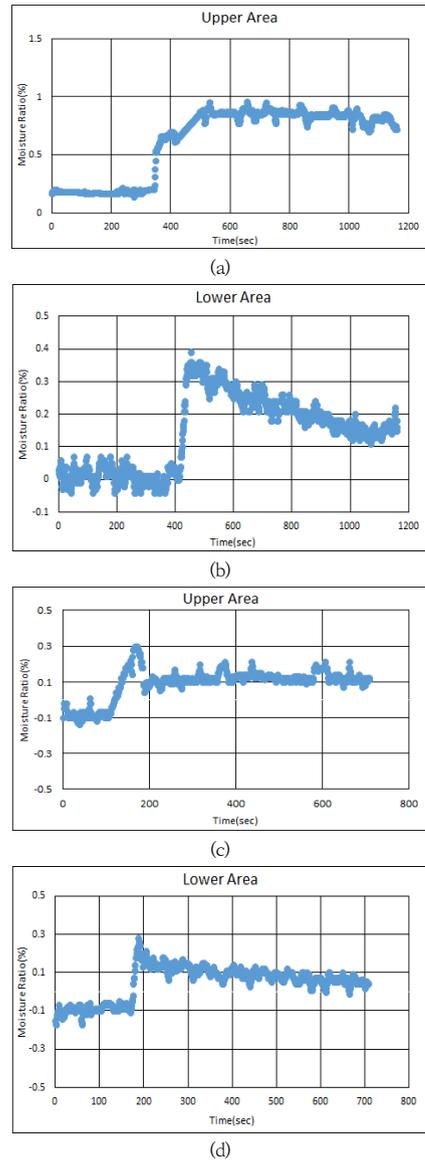


Fig. 7. Moisture measurement result
 (a) Upper area moisturemeter at 200mm/hr of rainfall
 (b) Lower area moisturemeter at 200mm/hr of rainfall
 (c) Upper area moisturemeter at 400mm/hr of rainfall
 (d) Lower area moisturemeter at 400mm/hr of rainfall

에 증가해서 전반적으로 400초 이후에서 일정하게 유지되고 있다. 붕괴 현상은 비탈면 상부에서부터 1차로 발생한 후에 일부 쇄굴 현상도 보이거나 중간부에서 2차 붕괴가 발생하고 있으며, 붕괴된 토사는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 넓은 면적으로 확산되지 않는 특징을 보였다. 또한, 강우강도 400mm/hr 조건에서의 수압 변화는 Fig. 6에서와 같이 상부(c)에서 120초 내외, 중하부(d)에서는 150초 내외에 증가한 후 150초와 200초 이후에 일정하게 유지되고 있다. 사면 붕괴는 200mm/hr 조건과 같이 상부에서 1차로 발생한 후에 중간부에서 2차로 발생하고 있으며, 쇄굴 현상과 함께 급격하게 붕괴가 발생하는 특징을 보였다. 이는 많은 양의 강우가 일시에 내려서 토층 깊숙이 침투되지 못하고 하부로 내려오면서 중간부에서 수압이 상승작용을 일으켜 2차 붕괴를 유발한 것으로 판단된다.

토양 내 수분의 변화를 측정된 결과를 보면 강우강도 200mm/hr 조건에서 수분의 변화는 Fig. 7 (a), (b)에서 보는 바와 같이 상부구간에서 320초 내외부터, 중간 및 하부구간은 400초 이후에 증가해서 전반적으로 440초 이후에서 일정하게 유지되거나 하강하는 특징을 보였다. 또한, 강우강도 400mm/hr 조건에서는 Fig. 7 (c), (d)에서 보는 바와 같이 상부에서 100초 내외부터, 중하부는 180초 이후에 증가해서 전반적으로 200초 이후에서 일정하게 유지되는 특징을 보였다.

간극수압과 수분의 반응시간을 비교 분석해 보면 사면의 상부에서보다 하부에서 간극수압과 수분의 반응시간이 대체로 빨라지는 것을 볼 수 있는데, 이는 화강암의 일반적인 특징인 입자가 조립질이고 점성을 함유하고 있지 않아서 투수성이 양호하여 경사면에서 땅속으로 깊이 흡수되지 못하고 사면 아래로 흘러 내려가는 경향이 있기 때문에 상부보다 하부에서 간극수압의 반응이 빨라지는 것으로 판단되며, 이는 기존의 연구 결과[8]와 유사한 경향을 보이고 있다. 또한, 간극수압에 의한 사면의 붕괴는 다소 차이는 있지만 간극수압이 증가하는 시점보다 수압이 증가한 이후에서 붕괴가 일어나는 것으로 분석되었다.

2.1.2 변위(비디오, 레이저센서, 진동센서) 분석

변위 분석을 위해서는 비디오 분석과 레이저센서 그리고 진동 센서를 이용하여 변위를 측정하고 이를 분석하였다.

비디오 촬영을 실시한 후 붕괴 시점을 관측한 결과

강우강도 200mm/hr 조건에서 Fig. 8 (a)에서 보는 바와 같이 1차 붕괴는 상부에서 397초에, 2차 붕괴는 중하부에서 411초에 발생하는 것으로 관측되었다. 또한, 강우강도 400mm/hr 조건에서의 1차 붕괴는 Fig. 8 (b)에서 보는 바와 같이 상부에서 187초에, 2차 붕괴는 190초에 중하부에서 발생하는 것으로 관측되었다.

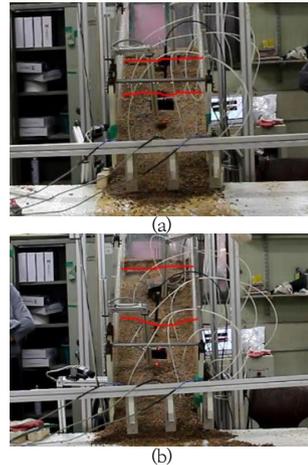


Fig. 8. The scene of the landslide (a) Landslide at 200mm/hr of rainfall (b) Landslide at 400mm/hr of rainfall

레이저 센서를 이용한 변위 측정은 토피의 변화를 레이저센서로 투시해서 변위를 측정된 것으로 그 결과는 Fig. 9에 도시하였다. 강우강도가 200mm/hr 조건에서의 변위는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 사면 상부(a)에서 390초, 하부(b)에서 411초에 사면의 상부로부터 붕괴가 일어났다. 또한, 강우강도 400mm/hr 조건에서의 변위는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 상부(c)에서 168초, 하부(d)에서는 177초로 측정되었다.

진동 센서를 이용하여 변위 측정은 상부와 하부에 각각 설치한 후 측정하였으며 그 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 도시하였다.

강우량이 200mm/hr 조건일 때 변위는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 사면의 상부(a)에서는 304초에 변위가 감지되었고, 361초에 붕괴가 발생하였다. 그리고 사면의 하부(b)는 355초에서 변위가 감지되었고, 붕괴가 발생된 시점은 370초였다. 이러한 결과 값은 사면의 상부에서 붕괴되어 하부로 전이되는 형태로 이루어지고 있다. 또한 육안으로 관찰된 시간(397초)보다 변위감지 시점이 상부는 93초, 하부는 36초. 붕괴시점은 육안 관찰보다 상부는 42초, 하부는 27초 정도 빠르게 감지되는 것으로 분석되었다.

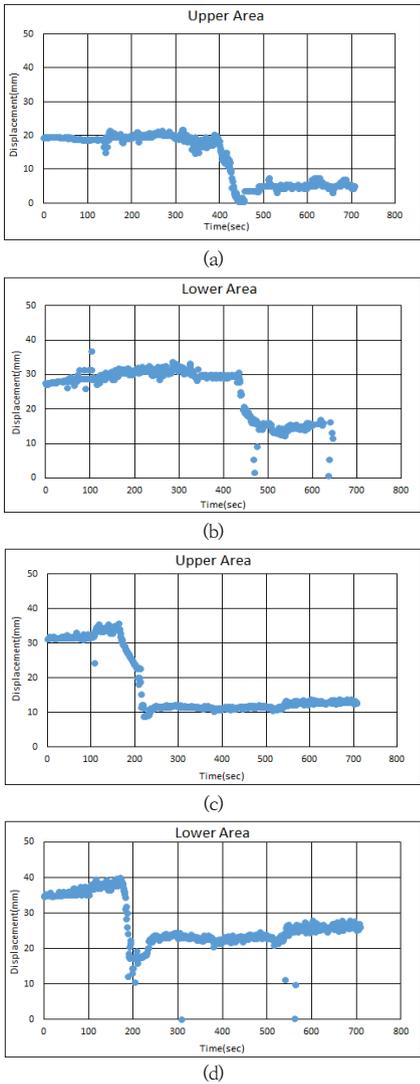


Fig. 9. Displacement measurement result
 (a) Upper area laser sensor at 200mm/hr of rainfall
 (b) Lower area laser sensor at 200mm/hr of rainfall
 (c) Upper area laser sensor at 400mm/hr of rainfall
 (d) Lower area laser sensor at 400mm/hr of rainfall

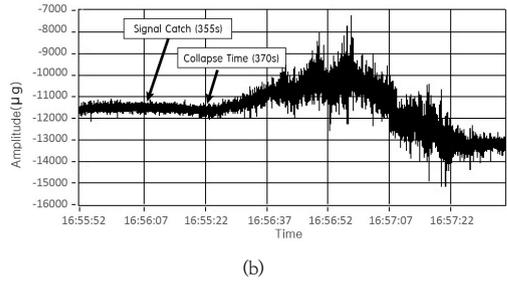
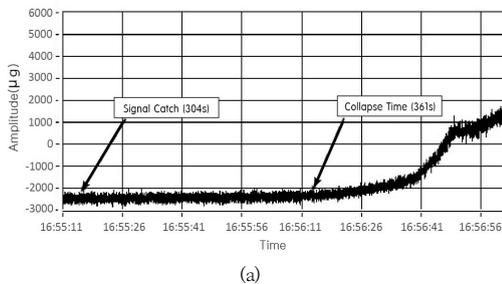


Fig. 10. Vibration sensor measurement and analysis at 200mm/hr of rainfall
 (a) Upper area (b) Lower area

그리고 강우 강도가 400mm/hr 조건일 때 변위는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 사면의 상부(a)는 159초에 변위가 감지되었고, 167초에 붕괴가 발생하였으며, 사면의 하부(b)에서는 161초에서 변위가 감지되었고, 붕괴가 발생한 시점은 178초였다. 이러한 결과 값은 사면의 상부에서 먼저 붕괴된 후에 하부로 전이되어 나타난 결과로 판단된다. 또한 육안으로 관찰된 시간(187초)보다 상부는 28초, 하부는 26초 정도 빠르게 감지되는 것으로 분석되었다.

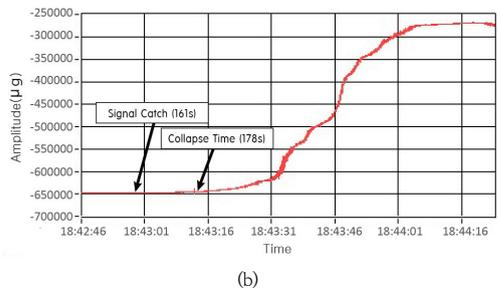
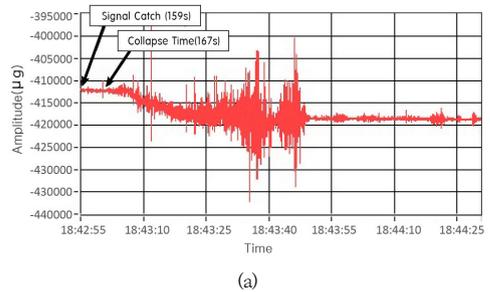


Fig. 11. Vibration sensor measurement and analysis at 400mm/hr of rainfall
 (a) Upper area (b) Lower area

본 연구에서는 사면 붕괴를 사전에 예측하고 예방함으로써 붕괴 위험이 높은 사면에 대하여 적절한 대책 마련과 사면붕괴에 의한 피해를 최소화하기 위해서 계속

(레이저와 진동)센서를 적용하여 사면이 완전히 붕괴하기 전에 미세 변위를 감지하여 산사태 발생 시 사전에 피할 수 있는 시간을 확보하기 위한 방안으로 레이저 센서와 진동센서의 적용성을 판단하기 위하여 실험을 실시하였다. 그동안 이러한 사면의 조기 붕괴를 예측하기 위한 연구는 레이저 센서를 이용한 지상 LiDAR 장비[9]와 자동화 계측시스템[10]에 대한 연구였고, 진동센서에 의한 연구는 전자나 의학 분야에서 많이 연구되어 지고 있으나 건설관련 분야에서는 연구가 부족한 상태이다.

진동 센서에서 측정된 결과 값에 비디오와 레이저 센서에서 측정된 결과 값을 강우강도 200mm/hr와 400mm/hr로 나누어서 상호 비교 분석한 결과를 Fig. 12와 Fig. 13과 같이 도시하였다.

강우 강도 200mm/hr인 조건의 경우는 상부(a)에서는 진동센서가 미세 변위를 감지한 시간차는 레이저 센서보다 83초~ 107초, 비디오 분석보다는 93초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서의 감지 시간차는 레이저 센서보다 26초~50초, 비디오 분석보다 36초 정도 빠르게 감지하였다.

하부(b)에서의 감지 시점은 레이저 센서보다 32초~56초, 비디오 분석보다는 42초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서의 감지 시간차는 레이저 센서보다 17초~41초, 비디오 분석보다 27초 정도 빠르게 감지하였다.

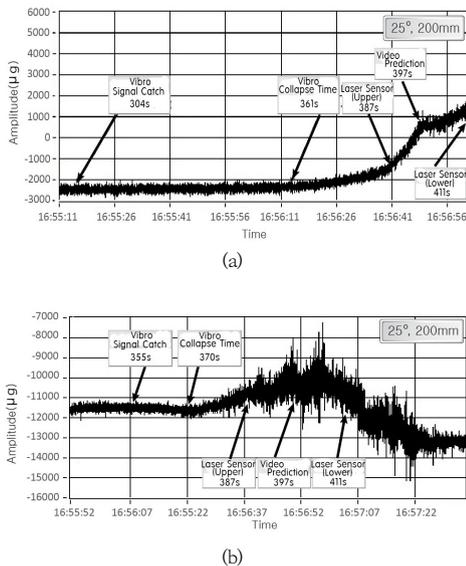


Fig. 12. Comparing displacement detection time with vibration sensor at 200mm/hr of rainfall (a) Upper area (b) Lower area

그리고 강우 강도 400mm/hr 조건인 경우는 상부(a)에서 진동센서가 미세 변위를 감지한 시간차는 레이저 센서보다 9초~18초, 비디오 분석보다는 28초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서의 감지 시간차는 레이저 센서보다 1초~10초, 비디오 분석보다 20초 정도 빠르게 감지하였다. 하부(b)에서의 감지 시점은 레이저 센서보다 7초~16초, 비디오 분석보다는 29초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서의 감지 시간차는 비디오 분석보다 12초 정도 빠르게 감지하였다. 그러나 레이저 센서보다는 오히려 1초~10초 정도 늦게 감지되었는데 이러한 원인은 하부지역의 레이저 센서 지점에서 먼저 급격하게 붕괴가 발생한다다가 진동 센서의 순간적인 오작동에 의한 오차인 것으로 사료되나 이러한 원인 분석을 위해서는 많은 연구를 해야 할 것으로 판단된다.

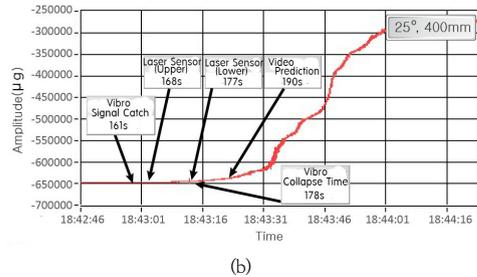
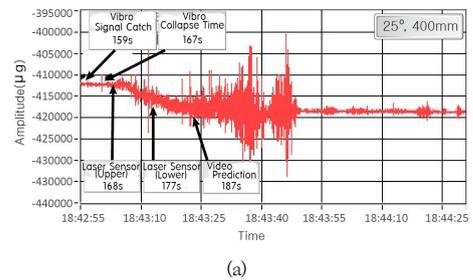


Fig. 13. Comparing displacement detection time with vibration sensor at 400mm/hr of rainfall (a) Upper area (b) Lower area

상기 결과에서 보았듯이 진동 센서를 이용한 변위 측정을 다양한 형태의 사면각도와 지반조건에서 지속적으로 연구를 수행한다면 산사태 붕괴를 사전에 예측할 수 있는 값진 자료를 획득할 수 있을 것으로 기대되며, 위험 응력이나 노후 건축물 등 다양한 분야에 적용할 경우 사전 예방 및 경보 시스템을 구축하기 위한 기초 자료로도 활용 가능함을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 산사태 축소 모형실험 장치를 이용하여 강우 강도에 따른 사면 붕괴 시 간극수압과 수분의 영향과 계측 센서(레이저 센서와 진동센서)를 적용한 붕괴 시간을 측정 한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 간극수압과 수분 함량의 반응시간을 비교 분석해 보면 사면의 상부에서보다 하부에서 간극수압과 수분의 반응시간이 대체로 빨라지는 것을 볼 수 있는데, 이는 화강암의 일반적인 특징인 입자가 조립질이고 점성을 함유하고 있지 않아서 투수성이 양호하여 경사면에서 땅속으로 깊이 흡수되지 못하고 사면 아래로 흘러 내려가는 경향이 있기 때문에 상부보다 하부에서 간극수압의 반응이 빨라지는 것으로 판단되며, 이는 기존의 연구 결과[8]와 유사한 경향을 보이고 있다. 또한, 간극수압에 의한 사면의 붕괴는 다소 차이는 있지만 간극수압이 증가하는 시점보다 수압이 증가한 이후에 붕괴가 일어나는 것으로 분석되었다.

(2) 강우 강도 200mm/hr인 조건의 경우는 상부(a)에서는 레이저 센서보다 83초~ 107초, 비디오 분석보다는 93초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서의 감지 시간차는 레이저 센서보다 26초~50초, 비디오 분석보다 36초 정도 빠르게 감지하였다. 하부에서는 레이저 센서보다 32초~ 56초, 비디오 분석보다는 42초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서는 레이저 센서보다 17초~41초, 비디오 분석보다 27초 정도 빠르게 감지하였다.

(3) 강우 강도 400mm/hr 조건인 경우는 상부에서는 레이저 센서보다 9초~18초, 비디오 분석보다는 28초 정도 빠르게 인식하였고, 붕괴가 발생한 시점에서는 레이저 센서보다 1초~ 10초, 비디오 분석보다 20초 정도 빠르게 감지하였다. 그러나 레이저 센서보다는 오히려 1초~10초 정도 늦게 감지되었는데 이러한 원인은 하부지역의 레이저 센서 지점에서 먼저 급격하게 붕괴가 발생 한데다가 진동 센서의 순간적인 오작동에 의한 오차인 것으로 사료되나 이러한 원인 분석을 위해서는 많은 연구를 해야 할 것으로 판단된다.

(4) 향후 지반변위 특성을 진동 센서를 적용하여 보다 다양한 형태의 사면각도와 지반 조건에 서 지속적인 연

구를 수행한다면 붕괴를 사전에 예측할 수 있는 값진 자료를 획득뿐만 아니라 위험 용역이나 지반침하 예상 지역 및 노후 건축물 등에 다양하게 적용할 경우 위험지역에 대한 사전 예방 대책 마련과 사전 경보를 통한 인적·물적 피해를 줄이는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] S. G. Lee, S. R. Hencher, "Slope safety and landslide risk management practice in Korea". In: K. Ho, V. Li.(Eds.), *Proceedings, 2007 International Forum on Landslide Disaster Management*, Hong Kong, 1, pp.125-168, 2007.
- [2] S. W. Kim, S. J. Jung, E. K. Choi, S. H. Kim, K. H. Lee, D. G. Park, "An analysis of the current status of disasters occurring on th steep slopes in Korea", *The Journal of Environmental Science International*, Vol.22, No.11, pp.1529, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.11.1529>
- [3] W. Y. Kim, B. G. Chae, "Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.19, No.3, pp.331-344, 2009.
- [4] W. Y. Kim, K. S. Kim, B. G. Chae, Y. C. Cho, "Case study of landslide types in Korea", *The journal of engineering geology*, Vol.10, No.2, pp.18-35, 2000.
- [5] S. Y. Park, Y. S. Min, M. S. Kang, H. D. Jung, Gh. F. Sami, Y. S. Kim, "Slope failure prediction through the analysis of surface ground deformation on field model experiment", *J,Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.3, pp.1-10, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2017.16.3.001>
- [6] J. W. Suk, S. Y. Park, G. H. Ha, H. S. Kang, "A study for characterization on shallow behavior of soil slope by flume experiments", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.28, No.3, pp.489-499, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.9720/kseg.2018.3.489>
- [7] S. H. Kim, "Pore water pressure characteristic of unsaturated weathered granite soil slopes through rainfall simulation", *Journal of academia-industrial technology*, Vol.10, No.11, pp.3287-3295, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.11.3287>
- [8] B. G. Chae, Y. S. Song, Y. S. Seo, Y. C. Cho, W. Y. Kim, "A test for characterization on landslides triggering and flow features of debris using a flume test equipment", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.69, No.3, pp.275-282, 2006.
- [9] S. H. Kim, S. P. Choi, I. T. Yang, "Monitoring analysis of model slope by using terrestrial LiDAR data", *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Vol.16, No.4, pp.17-23, 2008.

- [10] H. S. Kim, "A Study on the Early Warning for Slope Failure by an Automatic in-situ Measurement System", Master's thesis, Kookmin University, Seoul, Korea, pp.88-110, 2004.
-

손 인 환(In-Hwan Son)

[정회원]



- 2012년 8월 : 서울시립대학교 과
학기술대학원 토목공학과 (공학석
사)
- 2017년 2월 : 서울시립대학교 대
학원 토목공학과 (공학박사 수료)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 동일기술공
사 토질부
- 2014년 3월 ~ 2018년 12월 : 인덕대학교 건설정보공학
과 시간강사

<관심분야>

지반, 사면