

산사태 모니터링을 위한 지상라이다 자료의 정확도 평가

An Accuracy Assessment of the Terrestrial LiDAR for Landslide Monitoring

박재국¹⁾ · 이상윤²⁾

Park, Jae Kook · Lee, Sang Yun

Abstract

Korea has a large number of landslides due to localized torrential downpours and typhoons in summer, causing great human damage and economic losses. In particular, most roads in the Gangwon area are located in mountains, making them expose to a great risk of landslide. Therefore, it is urgent to prepare countermeasures to prevent these landslides. Necessary for that are various slope investigation and high-tech observation techniques for slope maintenance. Recently there have been slope observation techniques using optical fiber sensors, GPS, CCD cameras, Total Station and satellite images; however, these are not used much due to poor economic feasibility, low accuracy and efficiency. This study evaluated accuracy of displacement extraction of model slopes using terrestrial LiDAR to determine its application to landslide monitoring. As a result, it can measure several mm of minute displacement with high accuracy and help to rapidly obtain geographical features of slope.

Keywords : Landslide, Terrestrial LiDAR, Monitoring, DEM, Non-Prism Total Station

초 록

우리나라는 여름철 집중호우와 태풍으로 인해 산사태가 빈번히 발생하고 있으며, 이로 인해 많은 인명피해와 경제적 손실이 발생하고 있다. 특히 강원도 지역의 대부분 도로가 산악지형에 위치하고 있어 산사태의 위험에 노출되어 있다. 따라서 산사태를 막기 위한 대책마련이 시급한 실정이며, 이를 위해 다양한 사면조사 및 사면유지관리를 위한 첨단 관측기술이 요구되고 있다. 최근에는 광섬유 센서, GPS, CCD 카메라, Total Station, 위성영상을 이용한 사면관측 기술이 활용되고 있으나 경제성, 정밀성, 효율성 등의 제약으로 인해 활용빈도가 떨어지고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 지상라이다를 이용하여 시범사면을 모니터링한 후 정확도를 평가함으로써, 지상라이다의 사면관측을 위한 적용 가능성을 분석하고자 하였다. 그 결과 수 mm의 미세변위를 높은 정확도로 관측할 수 있었으며, 신속하게 사면의 지형정보를 획득할 수 있었다.

핵심어 : 산사태, 지상라이다, 모니터링, 수치표고모델, 무타깃 토털스테이션

1. 서 론

우리나라는 전 국토의 70%가 산지로 이루어져 있으며, 지형 특성상 경사가 급하고 도로 등의 인공구조물로 인한 인공사면이 많아 강우가 집중되는 여름철에 산사태가 많이 발생한다. 특히, 강원도의 경우 대부분 지역이 산지지형으로 되어 있어 집중호우시 산사태에 취약하여 산사태

가 빈번히 발생하고 그 피해도 크게 나타나고 있다.

최근 6년간 발생한 산사태 피해현황을 살펴보면 국내 최악의 재산피해를 가져온 2002년 태풍 “루사”를 비롯하여 기상 관측 사상 가장 강한 초속 60m의 강풍을 동반했던 2003년 태풍 “매미”로 인한 피해가 가장 크게 나타났으며 해를 더할수록 과거에 비해 산사태 발생빈도 및 피해가 대형화되고 있는 추세이다(표 1).

1) 정회원·남서울대학교 지리정보공학과 전임강사, 공학박사(E-mail:gisdata@nsu.ac.kr)

2) 연결저자·정회원·(주)백올엔지니어링, 공학박사(E-mail:bakyool@hitel.net)

표 1. 최근 6년간 발생한 산사태 피해현황(2006년, 산림청)

년 도	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
총 복구비(억)	180	301	2,993	2,279	992	1,174	
피해 현황	산사태(ha)	182	185	2705	1330	233	469
	야계(km)	8	36	105	82	15	121
	임도(km)	60	39	623	362	76	75
	인명(사망)	7	6	35	10	-	9

따라서, 산사태로 인한 피해를 최소화하고 예방할 수 있도록 방재대책 수립과 산사태 발생 징후를 사전에 감지할 수 있는 기술개발에 대한 노력이 요구되고 있다.

최근에는 GIS 기술을 이용하여 산사태를 예측하고 평가할 수 있는 기법개발에 대한 연구가 수행되고 있으며(양인태 등, 2007), 계측에 의한 산사태 발생 징후를 사전에 감지할 수 있는 첨단 관측기술개발에 대한 연구가 모색되어지고 있다(김준석, 2007).

또한 이러한 첨단 관측기술을 통한 지속적인 사면조사 및 사면유지관리를 위한 활용성이 검토되고 있다.

특히, 산사태 발생 징후를 사전에 감지하기 위해서 GPS, 토털스테이션, 기계식 센서, 광섬유 센서, 원격탐사, 항공라이다 등 다양한 관측기술이 연구되고 있다.

사면 관측은 광역적인 지역과 국부적인 지역을 대상으로 모니터링을 수행한다.

광역적인 지역을 대상으로 산사태를 분석하고 예측하기 위한 수단으로는 대부분 정적자료인 위성영상과 수치지도를 활용하고 있으나 동시기의 실시간 자료 확보에 대한 문제점과 낮은 정밀도로 인한 신뢰성 확보에 문제점이 지적되고 있다. 이를 개선하고 보완하기 위해 높은 정밀도로 3차원 정보를 획득할 수 있는 항공레이저측량(LiDAR)과 기후에 관계없이 자료획득이 가능한 간섭 SAR와 같은 능동센서를 이용하여 광역적인 지반변위를 감지할 수 있는 연구가 최근에 수행되고 있다. 그러나 산사태 발생시 초기 징후인 수 mm의 지반거동을 감지하기 위해 필요한 소오 정확도를 확보하는 것은 한계가 있다(김창오, 김정우 2005, 유환희 등, 2005, 최윤수 등, 2005, 강준목 등, 2006).

국부적인 지역을 대상으로 산사태 발생 가능성이 높은 취약지의 사면변위를 관측하고 모니터링하는 기술은 광섬유센서, GPS, 무타깃 토털스테이션과 같은 장비를 활용하는 기술과 사진 측량학 분야의 기술을 응용한 영상기반 모니터링 기술 등이 있다.

GPS를 이용한 변위 측정은 특정한 점에서의 변위를 관

측하고 있어 전체사면의 거동계측을 위한 설치비용 부담과 지속적인 유지 관리의 어려움으로 현장적용이 어려운 실정이며, 수평방향으로 $\pm 1\text{cm}$, 수직방향으로 $\pm 2\text{cm}$ 의 정밀도를 갖고 있어 비교적으로 예민한 거동을 보이는 수 mm 산사태 변위 계측에 한계를 갖고 있다(이흥민 등, 2007). 또한 위성과 측정 대상물과의 전파측정에서 케이 블 등과 같은 전기 시설의 영향으로 회절을 일으켜 크게는 수 cm 이상의 오차를 일으킬 수 있기 때문에 설치조건이 제한되는 단점이 있다(Wieser and Brunner, 2002).

광섬유센서는 현장에 고정하여 사용하기 때문에 지속적인 유지, 관리가 어렵고 또한 설치비용에 대한 부담으로 현장적용이 현실적으로 어려운 실정이다(김준석, 2007).

무타깃 토털스테이션은 높은 정확도와 이동성, 신속성, 호환성, 경제성 등에 있어 그 효율성이 인정되고 있으나(서동주, 2006), 변위측정을 위해 동일지점을 지속적으로 측정하기 위해 많은 타깃의 설치와 유실에 대한 부담을 안고 있으며 사용자의 숙련도에 따라 정확도에 차이를 나타내고 있다(김준석, 2007).

영상기반 모니터링 기술은 CCD 사진기를 이용하여 특정부위의 변위를 계측하는 것으로써 수 mm의 정밀도로 변위를 계측할 수 있으나 대기의 조건, 비, 먼지, 명암도 등의 환경인자가 정확도에 영향을 주어 특정 위치에 대한 변위측정에 제한되고 있다. 또한 정밀도 향상을 위해 다수의 사진기 설치와 타깃을 설치하여 둘 사이의 정밀한 거리측량이 선행되어야 하는 단점을 갖고 있다(이흥민 등, 2007).

이와 같이 다양한 첨단 관측 기술을 산사태에 적용하기 위해서는 미세변위 관측을 위한 소오 정확도 확보와 실시간 또는 주기적인 모니터링 능력, 환경성, 경제성, 편리성 등을 극대화하고 산사태 관측 기술 적용을 위한 장비의 개선과 더 많은 연구가 요구된다. 이를 위해서는 국가 차원의 연구지원과 장비 발굴에 대한 노력이 필요하다.

최근 들어 외국에서는 산사태 관측에 지상라이다 자료의 활용이 연구되고 있다. 지상라이다를 이용한 산사태 관측기술은 초기단계로써 낙석예상지역과 산사태 발생지의 지형특성을 신속하고 정확하게 추출하거나(Abellan et al., 2006, Van Den Eeckhaut et al., 2006), 산사태 발생지의 토공량 산정을 위한 조밀하고 정밀한 DEM(Digital Elevation Model) 생성에 관한 연구가 수행되었다(Du et al., 2006).

Bitelli(2004)는 지상라이다 측량과 사진측량을 통해서 시계열로 산사태 발생지의 자료를 획득한 후 DSM(Digital

Surface Model)과 DTM(Digital Terrain Model)을 생성하여 산사태 모니터링을 수행함으로써 오랜 기간 동안 점진적으로 발생되는 수 cm에서 수 m의 지형 변위를 관측하였다. 그러나 미세변위의 검출 가능성과 정확도에 대한 평가는 이루어지지 않았다.

국내의 경우 지상라이다는 건물의 3차원 매핑, 문화재의 3차원 복원 등에 주로 사용되어 왔으나 최근에는 현황 측량, 구조물의 변위계측, 절토사면의 사면거동계측 등의 정밀관측분야에도 활용되고 있다.

이임평 등(2004)은 지상라이다를 이용하여 건물의 정밀 모델링을 위한 유효성을 확인하였으며, 이흥민 등(2007)은 구조물의 변위를 계측함으로써 구조물의 특정한 점의 이동량은 물론 변형된 구조물의 형상을 표현하여 구조물의 합리적인 모니터링 평가방법으로 제시하였다.

이재원·윤분열(2006)은 터널의 3차원 정보획득과 변위 관측을 위해 지상라이다와 토털스테이션을 이용하여 관측을 실시함으로써 그 결과 토털스테이션보다 능률적으로 관측값을 획득하고 신뢰성 있는 변위량 측정결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

이인수·강상구(2006)는 지상라이다를 이용한 현황측량을 통해서 토털스테이션 측량성과에 필적하는 위치결정 정확도를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 유창호 등(2006)은 소일네일링 공법으로 보강된 절토사면을 대상으로 지상라이다와 토털스테이션을 이용하여 변위계측을 수행함으로써, 그 결과 변위량에 대해 두 장비의 계측결과가 동일한 결과값을 보임에 따라 절토사면의 변위계측에 대한 지상라이다의 활용 가능성을 보여주었다.

이와 같이 지상라이다는 대상물의 3차원정보 획득과 측량시 신속하고 정확하게 대상물의 정보를 획득할 뿐만 아니라 경제성과 편리성을 갖고 있다.

따라서, 본 연구에서는 산사태의 발생 징후를 감지하기 위한 관측기술의 개발 차원에서 지상라이다의 정확도를 평가함으로써 지상라이다의 산사태 모니터링을 위한 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해서 시범사면을 통해 미세변위를 관측하고 무타깃 토털스테이션을 이용하여 검사점을 획득한 후 이를 중첩하고 비교하여 정확도를 평가하였다.

2. 지상라이다 개요

LiDAR(Light Detection And Ranging) 시스템은 레이저 펄스를 주사하여, 반사된 레이저 펄스의 도달시간을

측정함으로써 반사 지점의 공간 위치 좌표를 계산해내어 3차원의 정보를 추출하는 측량기법이다.

따라서 LiDAR를 이용할 경우 건물 및 지형지물이 포함된 수치표면모델(DSM ; Digital Surface Model)과 이 중에서 수목이나 건물 등을 제거한 후의 지형에 대한 정확한 수치표고모델(DEM)의 생성이 가능하다.

특히 지상 라이다는 스캐닝 방식의 3차원 좌표 관측 장비로서 기존의 토털스테이션과 같은 1점 시준 방식을 탈피하여 관측 대상물의 표면에 조밀한 간격으로 무수히 많은 레이저광선을 주사하여 얻은 3차원 좌표 값을 이용해 대상물의 형태를 직관적으로 취득하는 첨단 레이저 측량 장비이다. 또한 측량용 무타깃 토털스테이션과 동일한 원리로 작동되어 근적외선 또는 가시광선 파장대의 레이저를 송신하고 물체에 반사되어 돌아오는 레이저를 수신하여 거리를 측정하고, 거리 측정과 동시에 레이저 빔의 수평, 수직각을 정밀히 측정하여 이를 3차원 좌표로 환산한다.

지상라이다의 특징은 1초당 1,000~10,000 포인트 이상의 측정 속도를 가짐으로 측정하고자 하는 3차원 영역을 원하는 간격으로 조밀하게 측정하고 컴퓨터상에서 원하는 특정점의 좌표를 계산해내는 방식을 취하고 있다.

본 연구에 사용된 지상라이다는 RIGLE LMS-390 모델로 레이저 펄스는 초당 8,000개에서 11,000개가 발생되며 반사되어 되돌아오는 시간과 거리를 자동으로 계산하여 물체의 3차원 좌표를 획득하게 된다. 물체의 3차원 좌표는 라이다를 중심으로 상대좌표로 획득되며, 좌표값이 표준 ASCII 문자 형식으로 출력된다. 대상물체의 좌표 획득은 대상물체와의 거리가 100m 이상일 경우 물체에 반사되어 돌아오는 레이저 펄스의 에너지가 10% 이상이면 측정이 가능하며, 300m 이상일 경우 물체에 반사되어 돌아오는 레이저 펄스의 에너지가 80% 이상이면 측정이 가능하다.

기기의 오차는 라이다와 물체와의 거리 50m를 기준으로 $\pm 6\text{mm}$ 정도를 나타내며, 수평방향으로 $0^\circ \sim 80^\circ$ 수직방향으로 $0^\circ \sim 360^\circ$ 의 스캐닝 범위와 0.001° 의 분해력을 갖고 있다. 그림 1과 표 1은 본 연구에서 사용된 지상라이다의 규격과 제원을 나타낸 것이다.

지상라이다의 거리측정 방식으로는 삼각측량방식(Triangulation Method)과 펄스레이저(Pulsed Laser)를 사용하는 시간차방식(Time of Flight)이 사용되며, 삼각측량방식은 레이저를 대상물에 발사한 후 광전소자(CCD)에 맺히는 반사 빔의 위치를 삼각법으로 역산하여 위치를 결정하는 방식이며, 시간차방식은 레이저를 대상물에 발사한 후 레이저가 반사되어 돌아오는 시간차를 계산하여 위치

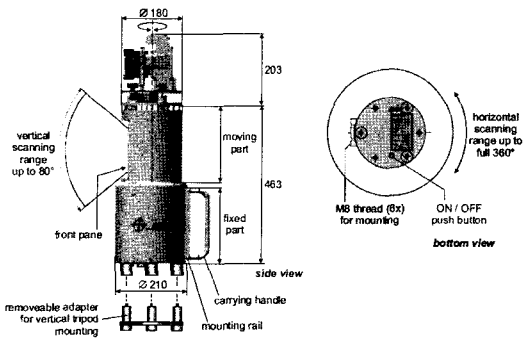


그림 1. 지상라이다(LMS-Z390)의 규격

표 2. 지상라이다(RIGLE LMS-Z390) 제원

Model	RIGLE LMS-Z390
스캐닝 범위	최대 300m, 최소 1m
시계	수평 360° 수직 80°
선형에러	6 mm
데이터취득속도	8,000px/sec~11,000px/sec
스캐닝 시간	0.01°/sec~15°/sec
분해력	0.001°
스캐닝 파장대역	근적외선

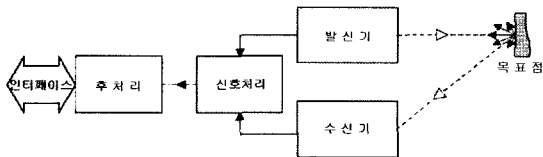


그림 2. 시간차방식(Time Of Flight)

를 결정하는 방식으로 이 연구에 사용된 장비는 시간차방식을 이용하여 위치를 결정한다. 기본 계산식은 식 (1)과 같고 원리는 그림 2와 같다.

$$\rho = \frac{1}{2} c \Delta t, \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \cos \beta \cos \alpha \\ \rho \cos \beta \sin \alpha \\ \rho \sin \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 거리이며 c 는 빛의 속도, Δt 는 시간차이다. 구하고자하는 특정점의 좌표를 x, y, z 라 하면 α 는 수평각, β 는 수직각이다.

3. 정확도 평가를 위한 시면 관측

3.1 연구방법

지상라이다 자료의 정확도를 평가하기 위해 이 연구에

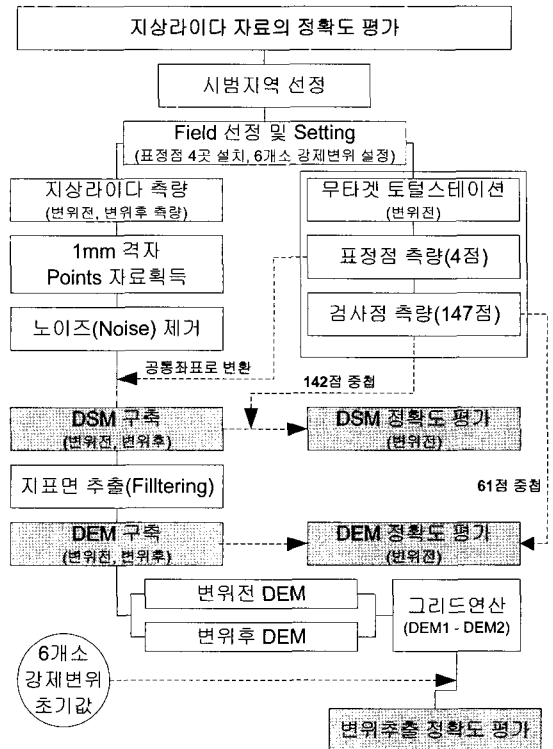


그림 3. 연구방법

서는 시험사면을 선정하고 시험사면에 대해서 지상라이다 측량을 수행한 후 시험사면에 강제로 변위를 주어 변위후에 대한 측량을 실시하였다. 이와 동시에 무타깃 토털스테이션을 이용하여 공통좌표로 변환하기 위한 표정점에 대한 측량을 실시하였고 지상라이다의 정확도를 평가하기 위한 검사점에 대한 측량을 실시하였다. 다음으로 지상라이다에서 획득된 표정점의 좌표와 무타깃 토털스테이션에서 획득된 표정점의 좌표를 이용하여 공통좌표로 변환한 후 지상라이다 자료를 이용하여 DSM과 DEM을 제작하였다. 다음으로 DSM과 DEM에 검사점을 각각 중첩하여 정확도를 평가하고 변위전과 변위후의 DEM을 그리드분석의 산술연산을 이용하여 변위를 추출하였다. 최종적으로 그리드 분석에 의해 추출된 변위와 6개소의 인위적 변위 초기값을 비교하여 변위추출 정확도를 평가하였다. 그림 3은 연구방법을 그림으로 나타낸 것이다.

3.2 시험사면 관측

시험사면은 30° 정도의 경사에 낮은 초목과 조경수로 이루어져 있는 면적이 63m²의 사면으로 인위적 변위를 준 6개소와 4개의 표정점이 설치되어있다.

그림 4는 6개소의 인위적 변위에 대한 설정과 변위량을 그림으로 나타낸 것으로 초기이다.

그림 5는 시범사면과 표정점을 그림으로 나타낸 것으로

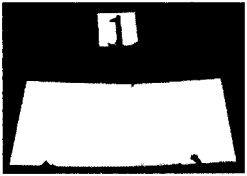


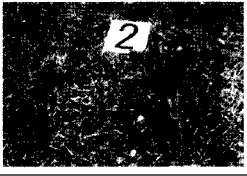
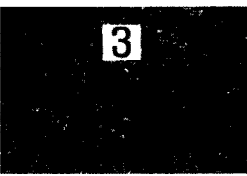

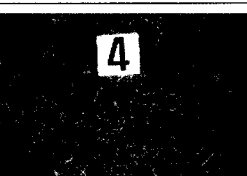
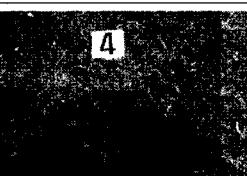
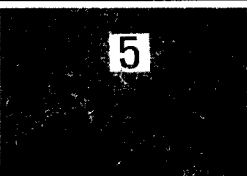
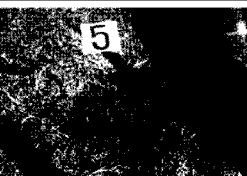

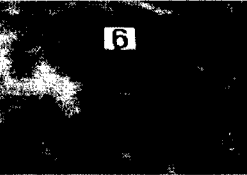
	변위전	변위후
1		
	5mm 스티로폼 배치	스티로폼 제거
2		
	20mm - 60mm 자갈 배치	자갈 제거
3		
	지표면	+20mm 지표면 성토
4		
	지표면	+ 30mm 지표면 성토
5		
	지표면	-100mm 지표면 절토
6		
	지표면	- 200mm 지표면 절토

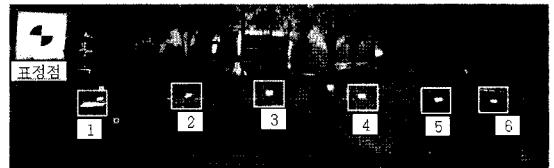
그림 4. 인위적 변위 설정

로, 합판위에 종이타깃을 붙인 표정점(b) 4개를 시범사면에 설치하였다. 표정점(c)은 대상거리가 멀리 떨어져 있을 경우 지상라이다에서 일반적으로 사용되는 표정점으로, 본 연구에서는 관측거리가 길지 않아 사용하지 않았다.

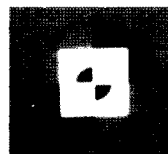
3.2.1 지상라이다 측량

시범사면을 변위전과 변위후로 나누어 각각 1mm 격자 간격으로 레이저 스캐닝을 실시하였으며 측량성과는 장비와 연결된 노트북으로 전달되어 3차원 좌표의 표준 텍스트 문서 형태로 저장하였다.

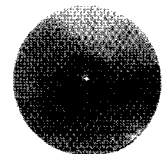
그림 6은 지상라이다 측량을 그림으로 나타낸 것이며, 그림 7은 시범사면의 3차원 포인트 정보를 그림으로 나타낸 것이다. 표 3은 측량 소요시간과 측정수를 표로 나타낸 것으로서 기계의 설치와 설정을 포함하여 7분에 20만점 이상을 획득할 수 있었다. 이는 표 5와 비교할 때 측량에 필요한 소요시간을 크게 단축한 것으로, 재해시 신속한 정보획득을 위해 이 장비가 유용하게 사용되어질 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 시범사면



(b) 표정점1



(c) 표정점2

그림 5. 관측대상지역

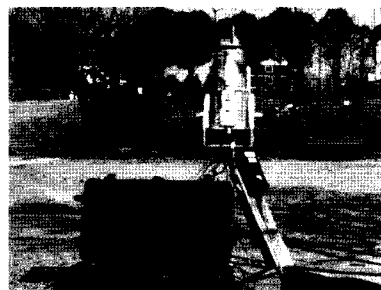


그림 6. 지상라이다 측량

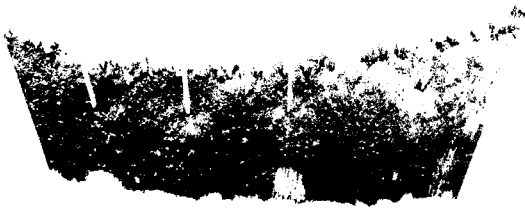


그림 7. 지상라이다 측량 성과

표 3. 지상라이다 측량을 통해서 획득된 측점수

변위	측량내역	측점수	측량소요시간
변위전	1mm 격자간격	226,232	7분
변위후	1mm 격자간격	207,009	7분

3.2.2 무타깃 토털스테이션 측량

무타깃 토털스테이션은 기 연구된 논문에서 이미 검증된 장비로(In Tae Yang, 2007), 본 연구에서는 지상라이다 자료의 모니터링 정확도를 평가하기 위해 사용되었다. 실제 현장에서 지상라이를 이용한 모니터링 수행시 표정점이 배치된 상태에서는 토털스테이션을 사용하지 않고도 변위검출이 가능하다. 그러나 본 연구의 목적이 변위검출 뿐만 아니라 DSM, DEM, 변위검출 등의 정확도를 평가하기 위한 것으로 검사점 획득을 위해 토털스테이션을 사용하였다. 또한 두 장비의 성과를 중첩하여 정확도를 평가하기 위해서는 공통좌표로 변환해야 함으로 표정점에 대한 측량을 수행하기 위해 토털스테이션을 사용하였다.

그림 8은 이 연구에 사용된 무타깃 토털스테이션(Trimble 5601)을 나타낸 것이며 표 4는 제원을 나타낸 것으로 최소 100m에서 최대 600m까지의 거리에 대해서 무타깃 측량이 가능하고 각측량은 최소 0.1" 단위 까지 측정이 가능하다. 또한 거리측량 정확도는 $\pm(3\text{mm}+3\text{ppm}) \sim \pm(5\text{mm}+3\text{ppm})$ 정확도를 갖고 있으며 레이저 스캐닝 기능이 포함되어 있다.

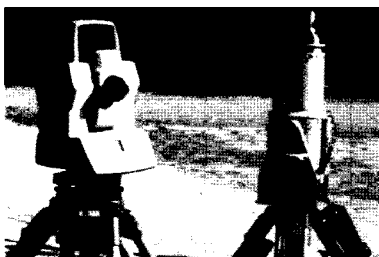


그림 8. 무타깃 토털스테이션 측량

표 4. 무타깃 토털스테이션(5601)의 제원

모델명		5601	
측각	측량정확도	1"	
	최소측량단위	0.1"	
거리 정확도	2m ~ 200m	$\pm(3\text{mm}+3\text{ppm})$	
	200m ~ 600m	$\pm(5\text{mm}+3\text{ppm})$	
거리 측정	무 타 췁	Kodak gray 18%	최대 200m
		Kodak gray 90%	최대 600m
		콘크리트 표면	200M ~ 300M
		목재 표면	150M ~ 300M
		금속 표면	150M ~ 200M
		밝은 암석	150M ~ 250M
어두운 암석	100M ~ 150M		

표 5. 무타깃 토털스테이션 측량 소요시간

측량 내역	설치	표정점	검사점	소요시간
30cm 격자	5분	5분	45분	55분

검사점에 대한 측량은 무타깃 토털스테이션의 레이저 스캐닝 기능을 이용하여 시범사면의 좌우상단과 하단을 지정하여 30cm 격자간격으로 가로 6m, 세로 1.8m의 총 147개의 검사점에 대해서 1회 측량을 실시하였다. 이때 무타깃 토털스테이션을 이용하여 측량을 수행하는데 소요된 시간은 표 5와 같이 55분이 소요되었으며 시범사면의 반사율 차이로 142개의 검사점이 획득되었다.

3.3 자료처리

3.3.1 좌표변환

무타깃 토털스테이션의 검사점을 이용하여 지상라이다 자료의 모니터링 정확도를 검증하기 위해서는 두 측량장비에서 획득된 표정점의 좌표가 동일해야 한다. 따라서 두 장비에서 획득된 표정점의 좌표를 지상라이다의 표정

표 6. 지상라이다 측량의 위치정확도

표정점	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
1	+0.001	+0.002	-0.001
2	-0.004	+0.003	+0.004
3	-0.006	-0.005	+0.002
4	-0.003	-0.004	-0.004
STD	0.003	0.004	0.004
RMSE	0.004	0.004	0.003

점을 기준으로 토털스테이션 성과를 좌표변환 하였다.

그 결과 표준편차는 X방향으로 3mm, Y방향으로 4mm, Z방향으로 4mm이며 RMSE는 X방향으로 4mm, Y방향으로 4mm, Z방향으로 3mm로 나타났다.

3.3.2 지상라이다 자료의 DSM 생성

지상라이다 자료를 이용하여 DSM을 구축하기 위해 3차원 좌표로 표현된 점들에 대해서 노이즈(Noise)를 제거하였다. 노이즈는 시범지역 외각 지역의 고층건물, 차량, 도로와 같은 3차원 좌표점들로 구성된 불필요한 점들로써 이를 제거한 후 변위전과 변위후에 대해서 DSM을 구



그림 9. 3차원 가시화(변위전)

축하였다. 그림 9는 노이즈가 제거된 3차원 좌표점들을 ArcScene을 이용하여 3차원으로 표현한 것이며 그림 10은 2mm 격자크기로 DSM을 표현한 것이다.

3.3.3 지상라이다 자료의 DEM 생성

DEM은 DSM에서 건물, 수목과 같은 대상물을 제거한 순수지면의 높이값만으로 표현된 것으로, 지표면의 변위 추출에 영향을 줄 개연성이 높다. 특히 본 연구의 시범사면은 낮은 수목과 조림수를 포함하고 있어 이를 제거하는 것은 매우 중요하다.

건물과 수목을 제거하기 위해서 본 연구에서는 Microstation과 TerraScan을 이용하여 변위전과 변위후에 대해서 지표면과 식생을 분류한 후 지표점만을 가지고 ArcGIS에서 2mm 격자크기의 DEM을 생성하였다.

지표면과 식생의 분류과정은 특정 영역 내에 있는 관측점의 높이값 중에서 최소값을 찾고 그 찾은 최소값과 영역내의 관측점의 높이를 비교하고 그 비교한 값이 특정 임계값보다 클 경우 그 관측점을 비지면점으로 분류하여 비지면점을 점차적으로 제거하는 방식으로 분류를 수행하였

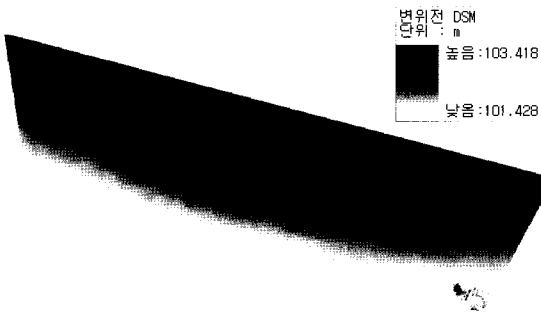


그림 10. DSM 구축(변위전)

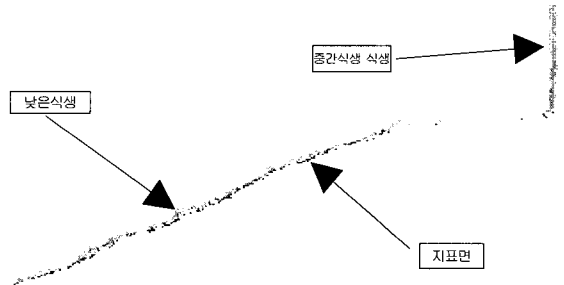
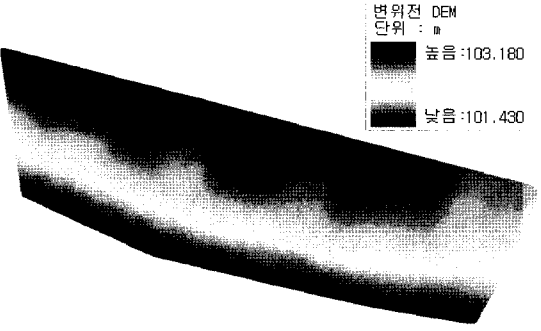
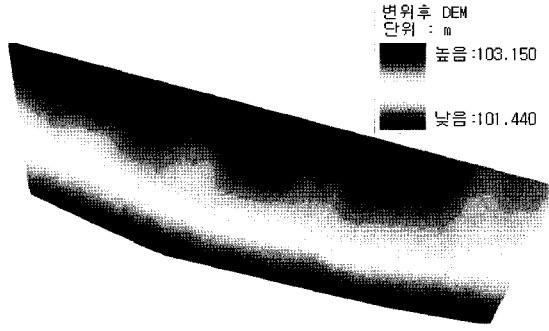


그림 11. 지상라이다 자료의 분류



(a) 변위전



(b) 변위후

그림 12. DEM 구축

다. 그 결과 노이즈가 제거된 164,164점의 원시 자료점들로부터 지표면 79,576점, 낮은 식생 81,083점, 중간 식생 3,397점, 미분류 108점으로 분류되었다. 그림 11은 시범사면의 횡단면을 나타낸 것으로 지표면, 낮은 식생, 중간 식생으로 분류되어 나타나 있다. 그림 12는 지상라이다 자료의 지표면을 이용한 DEM 구축 결과를 나타낸 것이다.

4. 지상라이다 자료의 정확도 분석

산사태 모니터링을 위한 지상라이다 자료의 정확도 분석은 DSM 정확도, DEM 정확도, 변위 추출 정확도 세부 분으로 나누어 분석을 실시하였다. DSM과 DEM의 정확도는 무타깃 토털스테이션에 의해서 획득된 검사점을 중첩하여 비교 분석하였으며, 변위 추출 정확도는 GIS의 격자형 분석을 통해서 변위 발생지역을 추출한 후 화소값을 확인하여 실제 강제 변위값과 비교 분석하였다.

4.1 DSM 정확도 분석

본 연구의 DSM 정확도 분석은 실세계를 3차원 좌표로 얼마나 정확하게 대상물의 정보를 획득할 수 있는지에 대한 평가로서 수목 등 비지면점의 제거가 필요 없는 암반사면 등의 산사태 모니터링을 위한 지상라이다의 정확도 평가이다.

DSM의 정확도를 평가하기 위해서 무타깃 토털스테이션에서 획득된 142개의 검사점을 중첩하였고 이를 그림으로 표현하면 그림 13과 같다.

검사점의 Z값과 해당위치의 DSM Z값을 서로 비교하여 분석한 결과 표 7과 같은 결과를 얻었다. 표에서 Z값에 대한 오차범위는 0mm~8mm로 나타났으며 표준편차는 2mm, RMSE는 2mm로 나타났다.

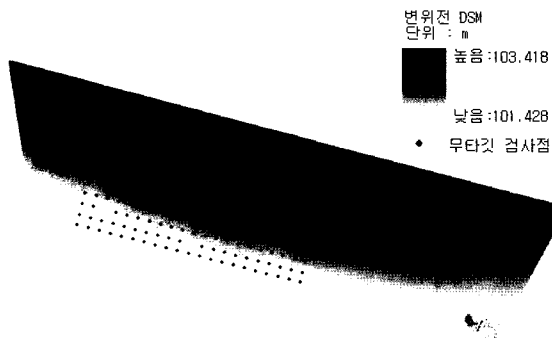


그림 13. DSM과 검사점의 중첩

4.2 DEM 정확도 분석

DEM 정확도 분석은 지표면을 얼마나 정확하게 추출할 수 있는지에 대한 평가로서 변위추출에 직간접적으로 영향을 줄 수 있는 요소(수목)를 제거하여 산사태 모니터링을 수행할 수 있는 기초자료를 생성하고 이에 대한 정확도를 분석하는 것이다.

DEM의 정확도를 평가하기 위해서 무타깃 토털스테이션에서 획득된 142개의 검사점 중 지면점으로 확인이 되는 61개의 점을 선별하여 DEM과 중첩하였고 이를 그림으로 표현하면 그림 14와 같다.

지표점의 Z값과 해당위치의 DEM Z값을 서로 비교하여 분석한 결과 표 8과 같은 결과를 얻었다.

표에서 Z값에 대한 오차범위는 0mm~18mm로 나타났으며 표준편차는 6mm이며 RMSE는 8mm로 나타났다. 그러나 표에서 각 측정점의 오차 중 12개의 검사점이 상대적으로 오차에 대한 편차가 크게 나타났다. 이는 61개 지표점 선별시 선정오류로 인한 것으로 판단되며, 일반적인 정확도 평가시 사용자의 판단오류로 인한 오차나 불규칙하게 나타나는 오차의 경우 통계학 처리시 일반적으로 소거하게 된다(조태룡 등, 2006). 따라서 정확도 평가에 오류가 발생될 수 있는 12개의 점을 제거한 후 RMSE를 다시 계산한 결과 5mm로 나타났다.

여기서 보여주는 정확도는 산사태 발생시 초기 징후인

표 7. 지상라이다의 DSM 정확도 분석

측점	무타깃(m)	DSM(m)	오차(m)
	Z1	Z2	ΔZ
1	101.689	101.690	(0.001)
2	101.747	101.747	0.000
3	101.749	101.749	(0.000)
4	101.750	101.749	0.001
5	101.801	101.806	(0.005)
생략	생략	생략	생략
138	102.788	102.788	0.000
139	102.801	102.801	0.000
140	102.818	102.818	(0.000)
141	102.823	102.820	0.003
142	102.831	102.831	(0.000)
표준편차			0.002
최소값(ΔZ)			0.000
최대값(ΔZ)			0.008
평균제곱근오차(RMSE)			0.002

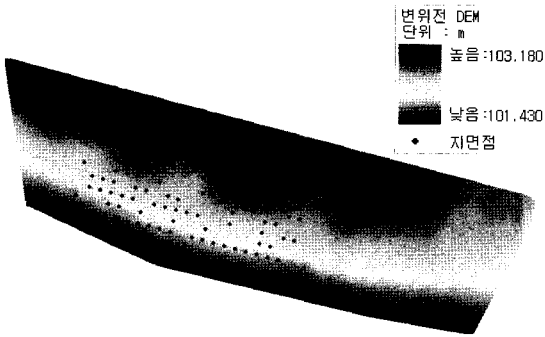


그림 14. DSM과 검사점의 중첩

표 8. 지상라이다의 DSM 정확도 분석

측점	무타깃(m)	DEM(m)	오차(m)
	Z1	Z2	ΔZ
1	101.891	101.893	(0.002)
2	101.908	101.896	0.012
3	101.919	101.918	0.001
4	101.995	101.988	0.007
5	101.997	101.993	0.004
생략	생략	생략	생략
57	102.652	102.644	0.008
58	102.656	102.656	(0.000)
59	102.695	102.677	0.018
60	102.706	102.691	0.015
61	102.709	102.708	0.001
표준편차			0.006
최소값(ΔZ)			0.000
최대값(ΔZ)			0.018
RMSE			0.008
보정된 RMSE			0.005

수 mm의 변위를 관측하고 모니터링하는데 필요한 통상적 소요 정확도를 만족하는 것으로 판단된다.

4.3 변위 추출 정확도 분석

변위 추출 정확도를 분석하기 위해서 GIS의 격자형(그리드) 분석을 이용하여 변위지역을 추출하였다. 격자형 분석은 그리드 연산자인 Local 연산자 중 산술연산자를 이용하여 변위전과 변위후의 DEM을 빼는 방법으로 변위가 발생한 지역을 추출하였다. 격자형 분석을 통해서 변위가 발생한 지역은 음의 값 또는 양의 값을 갖고 변위가 없는 지역은 0의 값을 나타낸다. 격자 기반의 산술연산

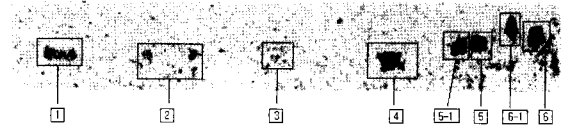


그림 15. 변위지역 추출

표 9. 지상라이다의 변위 추출 정확도 평가

변위 지역	그리드	인위적 변위 초기값	평균 화소값	오차
		Z1(mm)	Zs(mm)	ΔZ(mm)
No.1		5.0	9.4	4.4
No.2		20.0 ~ 60.0	24.0 ~ 61.0	1.0 ~ 4.0 (Av. 2.5)
No.3		20.0	14.0	-6.0
No.4		30.0	33.0	3.0
No.5		100.0	110.0	10.0
No.6		200.0	190.0	-10.0
RMSE				6.7

과정을 식으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta Z_{ij} = Z_{ij}(1) - Z_{ij}(2) \quad (2)$$

여기서, ΔZ_{ij} : 개별 격자의 변위량

Z_{ij}(1) : 변위전 개별 격자의 높이

Z_{ij}(2) : 변위후 개별 격자의 높이

i : 라인의 수, j : 행의 수

그림 15는 식 (2)에 의해서 생성된 변위발생지역을 절취하여 그림으로 나타낸 것으로, 6개소의 인위적 변위 발생지역과 2개소의 임의 변위지역이 잘 나타나 있다. 임의 변위지역인 5-1과 6-1은 5, 6번 지점의 절토시 발생한 토사를 쌓아놓은 것으로 그림에서 성토로 표현되고 있다.

전체 그리드 영상에서 변위지역 6개소를 절취하여 화소값을 확인한 결과 표 9와 같은 결과를 얻었다. 표에서 필드에 설정한 인위적 변위 초기값은 그림 4에서 설정한 값으로 평균 화소값과 비교한 결과 오차범위는 1mm ~ 10mm로 나타났으며, RMSE는 6.7mm로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 산사태 모니터링을 위한 지상라이다 자료의 정확도를 평가하기 위해 지상라이다를 이용하여 시범사면을 모니터링한 후 지상라이다의 DSM 정확도, DEM 정확도, 변위검출 정확도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 지상라이다의 DSM과 무타깃 토털스테이션의 검사점을 중첩하여 정확도를 분석한 결과 높이값에 대한 오차범위는 0mm~8mm로 나타났으며, 표준편차는 2mm, RMSE는 2mm로 나타났다. 따라서 수목 등 비지면점의 제거가 필요 없는 암반사면이나 절토사면 등의 3차원정보를 신속하고 정확하게 추출할 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 비지면점이 제거된 지상라이다의 DEM과 무타깃 토털스테이션의 지면점에 해당하는 검사점을 중첩하여 정확도를 분석한 결과 높이값에 대한 오차범위는 0mm~18mm로 나타났으며, 표준편차는 6mm, 보정된 RMSE는 5mm로 나타났다. 이는 자연사면의 경우 순수지면을 효과적으로 추출할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 변위 추출 정확도를 분석하기 위해서 GIS의 격자형(그리드) 분석을 이용하여 변위지역을 추출한 결과, 필드에서 설정한 인위적 변위 초기값과 지상라이다의 그리드 영상의 평균 화소값의 차이는 1mm~10mm로 나타났으며, RMSE는 6.7mm로 나타났다. 즉, 산사태 발생시 초기 징후인 미세변위를 높은 정확도로 검출할 수 있을 것으로 판단되며 특히 소요정확도의 검증결과를 통해서 향후 표정점이 설치된 사면에서 토털스테이션을 사용하지 않고도 지상라이다 장비만으로도 변위검출이 가능할 것으로 예상된다.

넷째, 이와 같이 지상라이다를 이용하여 시범사면을 모니터링 한 결과 미세변위를 신속하고 정확하게 관측할 수

있었으며 사면조사 및 사면유지관리를 위한 기초자료 획득 기술로 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 향후 지상라이다를 이용한 산사태 모니터링 기술의 실용화를 위해서는 자연사면에서의 지면점 추출 정확도를 향상시킬 수 있는 기법개발과 지상라이다의 측량 기준점 위치에 따른 가시권 범위의 조정을 위한 측량기법 개발이 요구되며 특히 다양한 사면에 대한 실제적용이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술혁신 사업(강원권역)의 연구비지원(05지역특성 B02-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강준문, 윤희천, 이창복, 박준규 (2006), GPS에 의한 LiDAR DEM의 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제24권 제5호, pp. 443-451.
- 김준석 (2007), 무프리즘 토털스테이션에 이용한 산사태 징후 모니터링, 석사학위논문, 강원대학교, pp. 2-17.
- 김창오, 김정우 (2005), 영상 레이더 간섭기법 및 차분간섭기법을 이용한 수치지도모델 생성과 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제23권 제2호, pp. 147-156.
- 서동주 (2006), 지형측량을 위한 무 프리즘 토털스테이션 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제24권 제5호, pp. 433-441.
- 양인태, 천기선, 박재국, 이상운 (2007), GIS를 이용한 강우조건에 따른 산사태 취약지 평가, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제15권 제1호, pp. 39-46.
- 유창호, 김선홍, 권명호, 최윤수 (2006), 지상라이다를 이용한 사면 파괴 거동분석, 2006년도 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, 대한토목학회, pp. 1916-1920.
- 유환희, 김성삼, 정동기, 홍재민 (2005), LIDAR 자료를 이용한 DTM 생성 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제23권제3호, pp. 261-272.
- 이인수, 강상구 (2006), 지상라이다를 활용한 현황측량 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제14권 제3호 pp. 77-86.
- 이임평, 최윤수, 사석재, 오의중 (2004), 지상 라이다를 이용한 건물의 정밀 모델링, 2004년도 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 한국측량학회, pp. 491-500.
- 이재원, 윤부열 (2007), 3차원 레이저 스캐닝을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측, 한국지형공간정보학회 논문집, 한국지형공간정보학회, 제15권 제2호, pp. 67-75.
- 이흥민, 박효선, 이임평, 권윤한 (2007), 지상 LiDAR를 이용한 구조물의 안전성 및 사용성 모니터링 위한 변위 및 변형 형상 예측 모델 제안, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권 제1호, pp. 3-10.
- 조태룡, 이기부, 엄재구 (2006), 측량학, 구미서관, pp. 14-18.
- 최윤수, 강인구, 이강원 (2005), 항공 LiDAR 시스템 검정 및 정

확도 평가 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제23권 제4호, pp. 359-366.

- A. Abellán, J.M. Vilaplana and J. Martínez (2006), Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain), *Engineering Geology*, Volume 88, Issues 3-4, pp. 136-148.
- Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004), Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry techniques to monitor landslide bodies, *Proceedings of ISPRS*, Istanbul, pp. 12-23.
- Du, Jia-Chong and Teng, Hung-Chao (2007), 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation

- Automation in Construction, Volume 16, Issue 5, pp. 657-663.
- In Tae Yang, Jae Kook Park, Dong Moon Kim (2007), Monitoring the Symptoms of Landslide Using the Non-Prism Total Station, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 6.
- Van Den Eeckhaut, M. et al. (2007), Morphology and internal structure of a dormant landslide in a hilly area: The Collinabos landslide (Belgium), *Geomorphology*, pp. 1-16.
- Wieser A and Brunner FK. (2002), Analysis of Bridge Deformations using Continuous GPS Measurements, *INGEO2002, 2nd Conference of Engineering Surveying*, Kopáček A and Kyrinovič P (eds), Bratislava, pp. 45-52.

(접수일 2007. 10. 18, 심사일 2007. 10. 31, 심사완료일 2008. 4. 21)