

## 항공 라이다 자료를 이용한 토석류 발생지역의 지형복원기법 개발

우충식<sup>1\*</sup> · 윤호중<sup>1</sup> · 이창우<sup>1</sup> · 이규성<sup>2</sup>

### Development of the Topography Restoration Method for Debris Flow Area Using Airborne LiDAR Data

Choong-Shik WOO<sup>1\*</sup> · Ho-Joong YOUN<sup>1</sup> · Chang-Woo LEE<sup>1</sup>  
Kyu-Sung LEE<sup>2</sup>

#### 요 약

항공 LiDAR 측량으로 토석류 발생 전·후의 지형자료를 취득하는 경우 토석류로 인하여 유출된 토사량을 알 수 있다. 그러나 토석류 발생지를 미리 예측하여 촬영하기가 힘들고, 토석류 발생지역의 과거 항공 LiDAR 자료는 존재가능성이 낮아 토석류 발생이전 지형자료를 이용하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 토석류 발생지역의 토사량 추정을 위해 발생전 지형을 복원하고, 토사유출의 공간적 범위를 파악할 수 있는 지형복원기법을 개발하였다. 지형복원기법은 토석류 발생지역에서 추출한 선형 및 비선형 횡단면을 가우시안혼합모델로 수식화하고 중심점 추정방법과 근사정확도로 근사결과를 평가하여 토석류 발생이전의 지형을 복원한다. 지형복원기법은 토석류 발생 전·후의 항공 LiDAR 자료를 이용하여 두 가지 방법으로 검증하였다. 먼저 토석류 발생구간에서 추출한 각 횡단면을 지형복원하여 발생전 항공 LiDAR 자료와 비교하였다. 또한 토석류 발생지역에 지형복원기법을 적용한 뒤 지형자료를 제작하여 토석류 발생전 항공 LiDAR DEM과 비교하여 검증하였다. 지형복원기법의 검증한 결과 전반적으로 근사정확도가 0.5m에 가까운 높은 정확도를 나타냈다.

주요어 : LiDAR, 토석류, 지형복원, 가우시안혼합모델, 수치고도모델

#### ABSTRACT

The flowed soil is able to be estimated from topographic data of before and after the debris flow. However, it is often difficult to obtain airborne LiDAR data before the

2011년 7월 16일 접수 Received on July 16, 2011 / 2011년 8월 30일 수정 Revised on August 30, 2011 / 2011년 9월 15일 심사완료 Accepted on September 15, 2011

1 국립산림과학원 산림방재연구과 Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institut

2 인하대학교 지리정보공학과 Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

\* 연락처 E-mail : woocs77@gmail.com

debris flow area. Thus, this study tries to develop a topographic restoration method that can provide spatial distribution of flowed soil and reconstruct the topography before the debris flow using airborne LiDAR data. The topographic restoration method can express a numerical formula induced from a Gaussian mixture model after extracting the cross sections of linear or non-linear in debris flowed area. The topographic restoration method was verified by two ways using airborne LiDAR data of before and after the debris flow. First, each cross section extracted from the debris flow sites to restore the topography was compared with airborne LiDAR data of before the debris flow. Also, the topographic data produced after the topographic restoration method applied to the debris flow sites was verified by airborne LiDAR DEM. Verifying the results of the topographic restoration method, overall fitting accuracy showed high accuracy close to 0.5m.

**KEYWORDS** : LiDAR, Debris Flow, Topography Restoration, Gaussian Mixture Model, DEM

## 서 론

일반적으로 산사태와 토석류를 따로 분리하지 않고 산사태로 일괄하여 사용하고 있으나 산사태와 토석류는 기작과 피해규모에 있어서 큰 차이를 가지고 있다. 산사태는 산지경사면에서 토사가 미끄러져 발생하는 붕괴를 가리키고, 토석류는 붕괴된 토사가 다른 사면에서 붕괴된 토사와 합쳐져 계류(溪流)를 타고 흘러 계상에 존재하는 유목이나 토석과 다시 합쳐져 선상지에 퇴적이 되는 현상을 말한다(윤호중 등, 2009). 토석류는 우리나라와 같이 산지의 비율이 높고 기복이 심한 지형에서 국지성 집중호우로 인해 발생하기 쉬우며, 상류로부터 흘러내리는 토석과 유목 등으로 인해 하류에서의 피해는 매우 크다.

항공 LiDAR 측량은 토석류의 발생에서 유하, 퇴적까지 일련의 기작은 물론이고 변화된 토사량까지 추정할 수 있는 매우 효과적인 자료로 인정받고 있다(Matsuoka *et al.*, 2009). 토석류로 인해 변화된 토사량의 추정은 실험 단계에 머물러 있는 토석류의 메커니즘 연구에서 실세계와의 차이를 보완할 수 있는 귀중한 자료로 사용될 수 있다. 또한 여러 토석류

물리모델의 검증자료 및 사방담 설계에 필요한 기준자료, 토석류 위험지도의 토사량자료, 2차 홍수범람예측자료 등 여러 분야에서 유용한 자료로 사용될 수 있다(O'Brien *et al.*, 1993). 그러나 항공 LiDAR 자료를 이용하여 토석류의 3차원 정보를 획득하기 위해서는 토석류 발생 전과 이후에 촬영한 항공 LiDAR 자료가 반드시 필요하지만 우리나라의 경우 토석류 발생전 항공 LiDAR 자료를 구하기가 매우 어렵다. 그 이유는 토석류 발생지역을 정확히 예측하기가 어려워 발생 가능성이 높은 여러 지역을 미리 촬영해야 하기 때문이다. 현재 국토지리정보원에서 매년 일정지역에 대해 촬영을 하고 있지만 대부분 도시지역에 편중되어 있다. 따라서 산림지역의 비율이 낮아 토석류 발생 가능성이 높은 백두대간 인근 고산지역까지 촬영하기에는 많은 시일이 소요된다. 결국 가장 효과적인 방법은 현재의 지형에서 과거의 지형을 추정하는 것이며, 지형학 분야에서 근사모델을 이용한 연구사례가 있다. Svensson(1959)은 빙하의 침식으로 인해 발생한 빙하곡이 포물선에 가까울 것으로 보고 처음으로 빙하곡의 횡단면을 수학적 함수인 Power law function( $y=ax^b$ )을 이용하여 나타냈다. Wheeler(1984)는 2차 다항식 합

수( $y=a+bx+cx^2$ )를 제시하였다. 이 두 식은 빙하곡의 횡단면을 나타내는데 장점과 한계점 모두 가지고 있으며 지형을 해석하는데 있어 다르게 사용되었다. 2차 다항식 함수는 횡단면을 지속적으로 표현할 수 있는 반면 Power law 함수는 횡단면의 경사면을 이해하는데 더욱 효과적이며 다른 지역과의 비교에 매우 적합하다(Harbor and Wheeler, 1992). 또한 이러한 함수는 시간에 따라 얼음이 흘러내려 V자형에서 U자형으로 변화되는 지형을 평가하는데 매우 효과적인 것으로 나타났으며 이러한 함수의 특성을 이용하여 지형인자를 분석하는 방법이 개발되었다(Hirano and Aniya, 1988). James(1996)는 7개의 횡단면을 지형도에서 추출하여 Power law 함수와 2차 다항식 함수의 실험적 평가를 하였다. 이 연구에서 Power law 함수는 계곡바닥의 중심위치가 요구되어 등고선에서 추출하여 사용하였으며 계곡바닥지형의 형태에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 즉, 이러한 Power law 함수의 민감성으로 인해 산출된 계수의 연관성이 떨어지고 전체의 횡단면을 나타내기보다 부분적으로 표현할 수 있는 한계를 가지고 있다.

지리정보기법을 이용한 Ai and Li(2010)는 기존 DEM에서 산지수계망을 추출할 때 복잡하고 불필요하게 생성되는 산지계류를 제거할 수 있는 필터링 방법의 개발하였으며, Veyrat-Charvillon and Memier(2006)는 지형접근법과 사진측량의 융합을 통한 1963~2000년도까지 토석류의 연평균 잠재퇴적량을 추정하였다. Schappi *et al.*(2010)은 하천의 유출모델링을 위해 기존의 DTM과 하천 횡단측량자료의 융합방법을 개선한 새로운 방법을 제시하였다. Anders *et al.*(2009)은 항공 LiDAR 측량을 통해 제작한 DEM이 산지사면 발달 및 수계혼적모델링을 하는데 얼마나 효과적인지 분석하였다. Evans and Lindsay(2010)은 항공 LiDAR 자료를 통해 제작한 DEM을 이용하여 평탄면 이탄지

(peatland)에 발생한 구곡(gully)의 침식량 분석방법을 개발하였다. Schtott *et al.*(2003)은 지형학과 원격탐사기법을 융합하여 빙하곡에 퇴적된 퇴적물의 특성 및 양을 분석하였다. 계곡의 횡단면에 퇴적으로 변화된 부분을 제외한 후에 변화되지 않은 부분을 Wheeler(1984)가 제시한 2차 다항식 함수( $y = a + bx + cx^2$ )를 기반으로 근사하여 퇴적되기 이전지형을 추정하였다. 2차 다항식 함수는 전체의 계곡을 표현하기에 효과적이며 중심점이 필요 없어 침식된 계곡 및 다형성 계곡의 개별부분을 잘 나타낼 수 있었다. 또한 2차 다항식 함수의 3개의 계수는 경사도, 계곡폭 등 지형인자와 관련성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 빙하곡은 일반적인 우리나라 산지계곡과는 비교가 안될 만큼 규모가 커 근사시 허용할 수 있는 오차가 비교적 클 수밖에 없다.

따라서, 본 연구에서는 토석류 발생이후의 항공 LiDAR 자료를 이용하여 토석류 발생이전의 지형자료를 제작하기 위해 가우시안혼합모델기반의 지형복원기법을 제시하였다. 또한 지형복원시 기존 다항식을 이용한 결과와 비교하였다.

## 연구방법

### 1. 지형복원기법

지형복원기법은 토석류 발생으로 유출된 토사량을 추정하기 위해 토석류 발생이전 정밀 지형자료를 토석류 발생이후에 촬영된 항공 LiDAR 자료를 이용하여 제작하는 기법이다. 이 방법은 그림 1과 같은 5가지 단계로 이루어져 있다. 먼저 지면점을 분류한 항공 LiDAR 자료로부터 제작된 DEM을 이용하여 토석류 발생지역을 탐지하고 일정간격으로 횡단면을 추출한다. 이후 추출한 횡단면에서 중심점을 추정하고 다시 횡단면을 가우시안혼합모델을 사용하여 적정한 토석류 이전지형을 추정하게 된다.

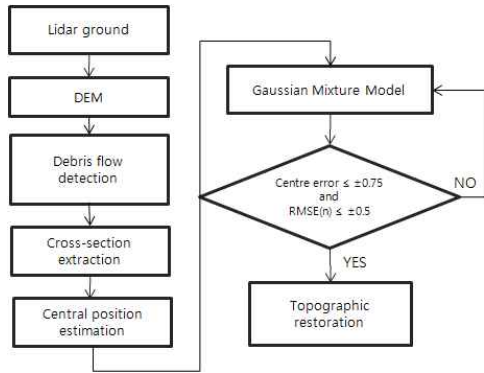


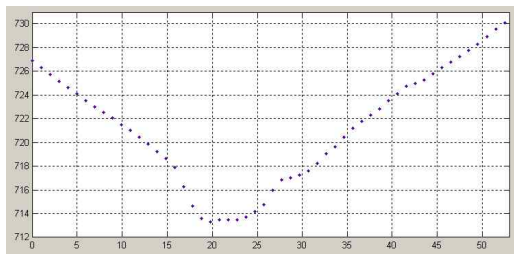
FIGURE 1. 토석류 발생전 지형복원기법 흐름도

지형복원기법을 적용하여 토석류 발생이전 지형을 추정하게 되면 이를 바탕으로 토석류 발생 후의 지형자료를 이용하여 변화된 토사량을 추정할 수 있다. 그림 2의 점선은 토석류 발생 후의 지형자료에서 추출한 횡단면이

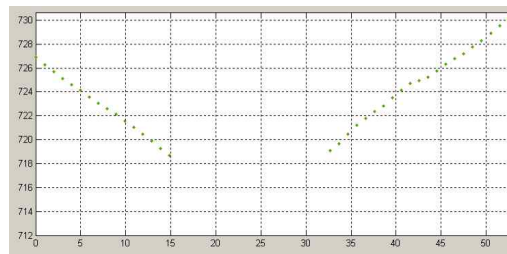
고 실선은 가우시안혼합모델을 이용하여 토석류 발생이전 지형을 재현한 결과이다. 이 두 선의 차이가 바로 토사량을 가리키는데 토석류 발생구간에서 적색선보다 점선이 위에 있을 경우에는 토사가 퇴적된 것을 나타내고 점선이 적색선보다 아래에 있을 경우에는 발생원에서는 붕괴, 유하구간에서는 침식된 것을 나타내게 된다. 또한 적색선과 점선의 차이가 나타나지 않은 부분은 지형변화가 없는 부분으로 토사가 유하된 것을 나타낸다.

1) 가우시안혼합모델(Gaussian Mixture Model)

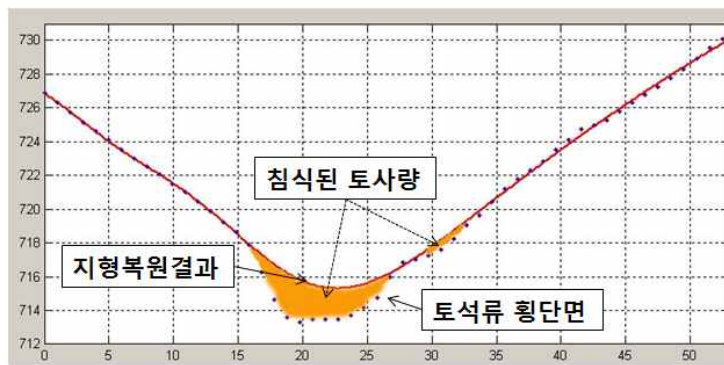
가우시안혼합모델은 주어진 표본 데이터 집합의 분포밀도를 단 하나의 확률밀도함수로 모델링하는 방법을 개선한 밀도추정방법으로 복수의 가우시안 확률밀도함수로 데이터의 분포를 모델링하는 방법이다. 즉, 여러 개의 그



<전체 횡단면>



<토석류 발생구간 데이터 제거>



<지형복원결과>

FIGURE 2. 토석류 발생이전 지형복원의 개요

룹으로 분포하는 데이터를 하나의 분포로 표현하면 그 특성을 제대로 표현하기가 어렵기 때문에 여러 개의 분포를 가우시안분포의 합으로 여러 그룹의 특성을 잘 나타내기 위한 방법이다. 가우시안혼합모델은 가우시안분포 하나로 나타낼 수 없었던 분포특성뿐 아니라 복잡한 형태의 분포라도 충분한 개수의 가우시안함수를 사용하면 원하는 만큼 정확하게 근사할 수 있는 장점이 있다(한학용, 2005).

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i \exp\left(-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2\right) \quad (1)$$

식 1에서 a는 진폭(amplitude), b는 peak로 평균을 나타내며 c는  $\sqrt{2}$ 가 곱해진 표준편차로 peak의 폭과 관련된 파라미터, n은 분포의 개수이다. 가우시안혼합모델은 n을 증가시킬수록 근사정확도가 높아져 복잡한 형태의 분포를 정확하게 근사할 수 있지만 함수의 파라미터가 증가하여 수식이 복잡해진다. 가우시안혼합모델은 패턴인식분야에서 분포 내에 여러 그룹을 표현하기 위해 사용되고 있으며 주로 2차원 이상의 데이터에서 많이 사용되고 있다(한학용, 2005). 본 연구에서는 1차원 기반에서 가우시안혼합모델을 적용하였다.

2) 지형복원에 따른 가우시안혼합모델의 특성

횡단면의 양쪽 두 개의 능선 사이에 존재하는 계곡은 두 개의 가우시안 분포가 연속한 형태(∧∧)로 표현할 수 있는데 이것을 가우시안혼합모델을 이용하여 근사해 보았다. 그림 3에 가우시안혼합모델의 n이 각각 2와 3일 경우로 나누어 횡단면을 근사하였고 그에 따른 함수식과 계수, RMSE, R<sup>2</sup>를 나타내었다.

$$f(x) = a_1 \exp\left(-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 \exp\left(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right) \quad (2)$$

R<sup>2</sup>: 0.9917, RMSE: 1.068

가우시안혼합모델의 n이 2일 때 가우시안 확률분포는 녹색 및 청색의 두 개의 분포가 형성된 후 다시 합쳐져서 Peak가 2개인 하나의 분포(적색)가 형성되었다. 그에 따른 계수는 6개가 구해지고 R<sup>2</sup>는 0.9917, RMSE는 1.068이었다.

3) 토석류 발생이전 계류의 중심점 추정방법

중심점 추정은 토석류로 변화되기 이전의 지형 중 계류의 중심점이라고 추정될 수 있는 위치를 찾기 위한 방법으로, 지형복원시 근사함수의 단점을 보완하고 정확도를 평가하기

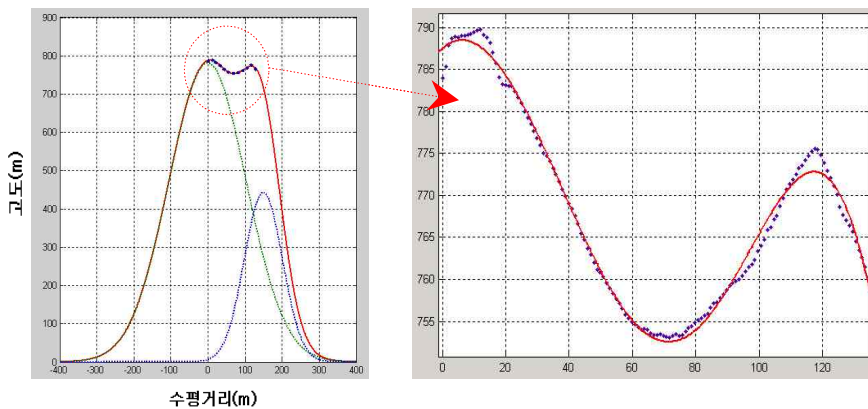


FIGURE 3. 가우시안혼합모델의 n이 2일 때 분포특징 및 근사결과

위해 매우 중요하다. 여기서 중심점을 추정하기 위해 한 가지 가정이 필요하다. 일반적으로 자연산지에서는 여러 요인에 의해서 완전한 V자형의 형태를 가지는 횡단면은 존재하기 어려워 V와 U의 중간단계가 대부분을 차지한다. 따라서 바닥부분(계류)의 횡단면은 원의 곡률을 가진다는 가정이 필요하다.

산지사면은 보통 마주하는 두 사면의 경사가 같은 경우는 드물고 주로 서로 다른 경사도를 가지는 사면이 마주하는 횡단특성을 가지고 있다. 결국 정확한 중심점 추정을 위해 마주하는 두 사면의 경사도가 다른 경우를 고려하여 중심점을 추정할 수 있어야 한다. 따라서 중심점 추정을 위해 그림 4와 같이 나타내었으며 그에 따른 수식을 제시하였다.

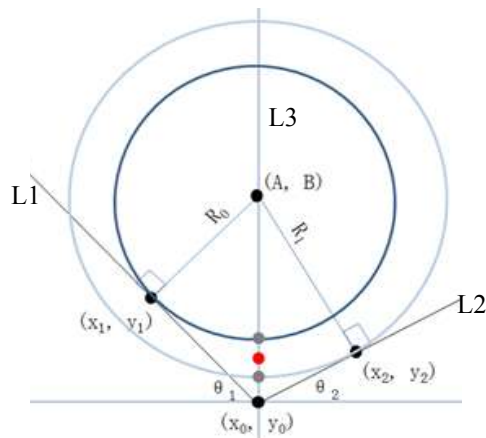


FIGURE 4. 중심점 추정을 위한 모식도

그림 4에서 linear fitting된 양쪽의 두 직선을 각각 L1, L2라고 할 때 두 직선의 교점  $(x_0, y_0)$ 을 구할 수 있다. 그리고 원과의 접점  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ 에서 원의 중심점  $(A, B)$ 을 통과하는 수직선을 구할 수 있다. 여기서 접점  $(x_1, y_1)$ 과  $(x_2, y_2)$ 는 계류의 경계점이다. 수직선을 연립방정식으로 풀어 원의 중심점  $(A, B)$ 과 반지름  $R_0, R_1$ 을 구한다. 직선 L1, L2의 교점  $(x_0, y_0)$ 과 원의 중심점  $(A, B)$ 을 이용하여 직선 L3을 구할 수 있다.

근의 공식을 이용하면 직선 L3과 각 원이 접하는 두 점의 1/2이 되는 적색점이 최종 중심점이 된다.

4) 토석류 발생이전 지형자료 제작

지형복원결과를 이용하여 토석류 발생이전 지형자료를 제작하기 위해 Figure 5와 같은 순서로 수행할 수 있다. 항공 LiDAR 자료에서 분류한 지면점 자료에서 토석류 발생구간 내의 포인트를 제거하고 지형복원결과와 포인트를 지면점 자료와 합친다. 이렇게 합쳐진 지면점 자료를 보간하여 토석류 발생이전 지형자료를 제작한다. 제작순서는 비교적 간단하지만 정확한 보간을 위해 적절한 보간법을 결정해야 한다. 보통 항공 LiDAR 자료는 점밀도가 높고 포인트가 비교적 균일하게 분포하고 있기 때문에 DEM 제작시 TIN보간법 또는 IDW보간법을 많이 사용하지만 본 연구의 경우 토석류 발생구간의 포인트가 지형복원결과로 대체되었기 때문에 점밀도가 다른 부분에 비해 낮아지게 된다. 따라서 일반적인 보간법으로 보간을 수행할 경우 토석류 발생구간 경계부에서 오차가 많이 발생할 가능성이 크다.

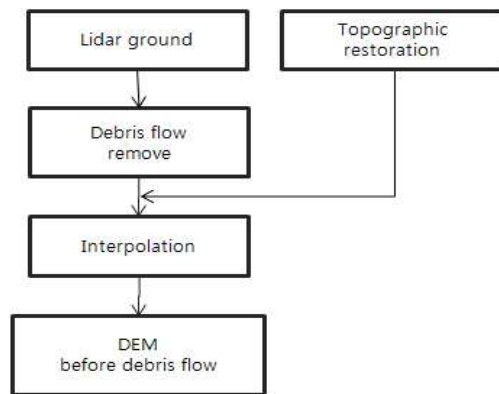


FIGURE 5. 토석류 발생이전 지형자료 제작순서

Schäppi *et al.*(2010)은 DTM과 하천을 횡단측량한 하상측량자료의 결합으로 하천하

상정보가 포함된 DTM을 제작하려 하였으나 일반적인 보간법으로는 정확한 DTM을 제작하기 어려워 새로운 보간법을 제시하였다. 그러나 이것은 하천경계에 Breakline을 이용하여 새로운 보간알고리즘으로 하상측량자료와 보간하는 방법으로 연속된 형태를 나타내는 산지지형에서는 불연속면이 형성될 가능성이 커 적용하기가 어려울 것으로 판단되었다. 결국 보간오차가 발생할 가능성이 있지만 점밀도가 낮은 부분을 선형으로 보간할 수 있는 TIN 보간법을 이용하여 토석류 발생이전 지형자료를 제작하였다.

2. 지형복원기법의 검증

지형복원기법을 두 가지 방식으로 검증하였는데 첫 번째는 토석류 발생구간에서 추출한 횡단면을 지형복원기법에 적용한 결과와 토석류 발생전 항공 LiDAR 자료의 비교를 통해 근사정확도를 검증한다. 두 번째 방식은 토석류 발생지역 대상으로 지형복원기법을 적용하여 토석류 발생전 지형자료를 제작한 뒤 실제 토석류 발생이전 지형자료인 항공 LiDAR DEM과의 오차를 분석하여 지형복원기법으로 제작된 지형자료의 정확도를 검증하는 것이다.

1) 대상지역 및 항공 LiDAR 자료처리

토석류 발생 전·후의 항공 LiDAR 자료가 존재하는 전남 광양지역을 대상으로 지형복원기법의 검증을 수행하였다. 광양는 지리산과 백운산의 영향으로 국지성 호우가 잦고 경제수종의 조림을 위해 벌채, 작업로 등 훼손이 많아 2009년 7월 15일에서 16일경에 강우가 최대일우량 180mm, 최대시우량 37mm가 내려 약 55ha의 토석류가 발생하였다.

항공 LiDAR 자료는 표 1처럼 토석류 발생

이전과 이후 두 시기를 모두 촬영하였다. 항공 LiDAR 측량은 산림의 차폐를 줄이고 토석류 발생지의 점밀도를 최대한 높이기 위해 가을에서 초겨울 사이에 촬영대상지를 두 번 이상 비행하여 촬영하였다.

항공 LiDAR 자료의 처리는 그림 6과 같이 지면점과 비지면점으로 분류하였다. 여기서 Single return(SR)이란 펄스가 투과하지 못해 한 개의 단일 신호로 수신된 것으로 보통 지면이나 인공물, 밀도 높은 식생 등에서 많이 발생한다. SR과 달리 한 위치에서 여러 신호가 수신된 것을 Multi return(MR)이라고 하며 보통 First, Second, Third, Last return 등으로 구분된다. 항공 LiDAR 시스템에 따라, 대상지역에 따라 MR의 수는 달라질 수 있으며 식생이나 건물의 모서리 등에서 MR이 많이 발생한다. SR과 MR의 신호 중 Multi-pass 또는 시스템 오류 등으로 인해 발생하는 잡음을 제거하기 위해 Noise filtering을 수행한다. Noise filtering은 초기 TIN에서 일정 임계치를 설정하여 Outlier를 제거하고 flightline의 스캔각이 일정이상인 포인트를 제거하는 것이다.

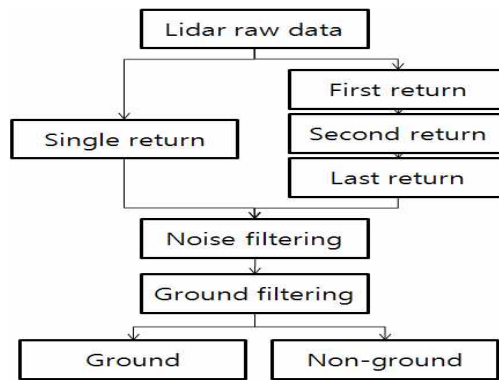


FIGURE 6. 항공 LiDAR 자료의 처리순서

TABLE 1. 광양지역의 항공 LiDAR 자료 촬영제한

면적	촬영일자	점밀도	촬영고도	촬영시스템	비고
450km <sup>2</sup>	2008.10.~11.	3점/m <sup>2</sup>	1,800m	Leica ALS50	발생전
40km <sup>2</sup>	2009.11.20	10점/m <sup>2</sup>	1,600m	Leica ALS50	발생후

TABLE 2. 수치표고모델 규격 및 정확도

격자규격	1m × 1m	2m × 2m	5m × 5m	비 고
수치지도축척	1/1,000	1/2,500	1/5,000	
RMSE	0.5m이내	0.7m이내	1.0m이내	
최대오차	0.75m이내	1m이내	1.5m이내	

\* 국토지리정보원의 항공레이저측량 작업규정 제 44조

Su *et al.*(2006)은 스캔각이  $\pm 10^\circ$  이상의 포인트는 정확도의 문제가 생길 가능성이 높아 제거해야 한다고 보고하였으나 점밀도가 낮아지는 문제가 생겨 본 연구에서는 산림지역의 특성상  $\pm 15$ 이상의 포인트를 제거하였다. 이후 정밀지형자료 제작을 위해 지면점과 비지면점을 분류해야 하는 Ground filtering 단계를 거쳐야 하는데 본 연구에서는 Terrascan s/w의 경사기반 알고리즘을 사용하여 항공 LiDAR 자료의 지면점과 비지면점을 분류하였다. 지면점 분류결과 원시자료에서는 평균 점밀도가 약 10점/m<sup>2</sup>이었으나 Ground filtering 결과 약 3점/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 분류한 지면점으로 부터 점밀도를 고려하여 IDW(Inverse Distance Weighted)보간법을 이용하여 1m 정밀지형자료를 제작하였다.

2) 지형복원기법의 정확도 기준

지형복원기법의 정확도를 검증하기 위한 기준으로 표 2와 같이 국토지리정보원 「항공레

이저측량 작업규정」 제 44조 (수치표고모델 규격 및 정확도)을 이용하였다.

이 기준은 1m DEM의 경우 RMSE가  $\pm 0.5m$  내에 분포하고 최대오차가  $\pm 0.75m$ 를 넘지 않아야 한다는 것이다. 이 기준을 지형복원기법의 정확도 기준으로 결정한 이유는 지형복원기법을 통해 제작되는 토석류 발생 이전의 지형자료가 1m 격자크기로 제작하기 때문이다.

연구결과

지형복원기법을 검증하기 위해 광양지역에 그림 7과 같이 토석류로 인해 지형이 변화된 10개 지역(사각형표시)에서 발생원 8개, 유하 구간 11개, 퇴적구역 1개로 총 20개의 횡단면을 추출하여 지형복원을 수행한 후 토석류 발생전 지형자료와의 차이를 RMSE로 산출하여 분석하였다. 퇴적구역은 대부분 촬영이전에 응급복구 및 하천유입으로 훼손되어 추출

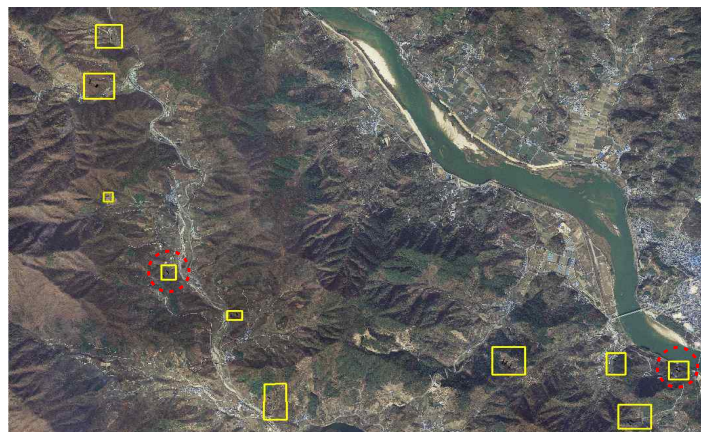


FIGURE 7. 광양지역의 지형복원기법 검증대상지



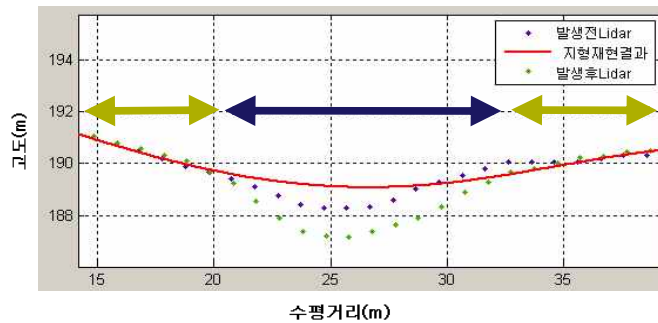


FIGURE 8. 정확도 검증방법(실제 정확도 비교구간은 중앙 화살표구간)

할 수 있는 횡단면의 수가 다소 적었다. 그리고 점선의 원형으로 표시한 두 지역을 대상으로 횡단면을 각각 29개를 추출하여 토석류 발생이전의 지형자료로 제작하였다. 이 두 지역은 실제 촬영된 토석류 발생전 항공 LiDAR DEM과 비교하였다.

그림 8은 정확도 검증방법을 나타낸 것으로 RMSE는 제거된 토석류 발생구간 내에서 지형복원된 결과만으로 분석하여 실질적인 검증을 하였다. 지형복원시 정확도를 나타내는 RMSE는 발생후 지형자료와 지형복원결과의 오차를 나타내는데 그림 8처럼 남색 화살표구간의 자료를 이용하지 않고 푸른색 화살표구간의 자료만을 이용하여 오차를 계산한다. 따라서 RMSE로는 정확한 결과를 판단할 수 없어 fitting-RMSE(fRMSE)를 따로 계산하였다. fRMSE는 발생이전 지형자료를 이용하여 남색 화살표구간내의 실제 RMSE를 계산하여 정확도를 나타낸 것이다.

표 3에서 가우시안 혼합모델은 총 20개 횡단면 모두 지형복원에 따른 RMSE 및 최대오차는 정확도 기준보다 낮았지만 발생이전 지형자료를 이용한 fRMSE 및 그에 따른 최대오차는 20개 중 3곳에서 정확도 기준을 초과하였다. 20개 횡단면의 평균 fRMSE는 0.31m, 평균 최대오차는 0.47m로 나타났다. 그러나 다항식 함수의 경우는 20개 횡단면 중에서 12개 횡단면이 정확도 기준을 벗어났다. 다항식 함수의 평균 fRMSE는 0.65m, 평균

최대오차는 0.93m로 나타나 정확도 기준인 RMSE 0.5m와 최대오차 0.75m를 벗어난 결과가 나타났다. 또한 가우시안혼합모델의 차수가 주로 2차에서 많이 결정된 것을 알 수 있는데 이것은 산지 지형이 단순한 V자형과 U자형의 많이 분포해 낮은 차수에서도 비교적 정확하게 근사되었다는 것을 설명하고 있다. 결국 지형이 복잡할수록 차수가 커지고, 단순할수록 차수가 작아진다. 결국 횡단면을 통해 정확도 검증을 한 결과 가우시안혼합모델을 이용한 지형재현결과가 기존의 다항식 함수의 결과보다 매우 좋은 결과를 나타내었고 1m 수치표고모델의 정확도 기준 또한 만족하는 것으로 나타났다.

가우시안혼합모델에서 정확도 기준을 초과한 원인을 살펴보기 위해 그림 4.9에 정확도 기준을 초과한 횡단면 12번과 8번을 나타내었다. 12번 횡단면의 경우는 임도 및 절성토 등 인공지형의 영향으로 횡단면의 변화가 생겨 지형복원결과가 정확도기준을 만족하지 못했다. 8번 횡단면의 경우는 인위적인 지형변화라기보다는 별채로 인한 산림의 훼손으로 토사의 침식이 진행되어 정확도 기준을 만족하지 못한 것으로 판단된다. 따라서 지형복원 기법은 훼손된 지형이 포함된 횡단면에서는 근사결과가 비교적 낮게 나타나는 한계를 가지고 있다.

광양지역의 두 지역을 대상으로 지형복원기법을 적용한 후 지형자료를 제작하여 토석류

TABLE 3. 가우시안혼합모델과 다항식함수의 지형복원결과

구분	가우시안혼합모델					다항식 함수					
	RMSE	n	max error	fRMSE	fmax error	RMSE	n	max error	fRMSE	fmax error	
1	0.07	2	0.18	0.50	0.60	0.08	2	-0.14	0.49	0.55	
2	0.20	2	0.50	0.31	-0.48	0.48	2	0.86	0.69	0.83	
3	0.08	3	0.18	0.20	0.27	0.25	4	0.54	0.23	-0.36	
4	0.15	2	0.32	0.57	-0.73	0.18	4	0.35	0.61	-0.78	
5	0.08	4	-0.10	0.32	-0.48	0.19	4	-0.33	0.70	-1.20	
6	0.02	2	-0.05	0.15	0.32	0.15	2	-0.34	0.43	-0.64	
7	0.07	2	0.08	0.39	-0.60	0.26	2	-0.46	1.57	-2.09	
8	0.11	2	0.17	0.54	-0.81	0.21	3	-0.37	1.82	-2.52	
9	0.08	2	0.12	0.05	0.10	0.11	2	0.16	0.74	-1.00	
10	0.15	3	-0.45	0.10	-0.14	0.30	4	-1.04	0.87	-0.85	
11	0.16	6	-0.55	0.13	-0.19	0.23	8	-0.99	0.73	-0.84	
12	0.11	4	0.24	0.68	1.20	0.23	4	0.56	0.71	-1.39	
13	0.23	4	0.50	0.41	-0.63	0.21	7	-0.82	0.61	-1.16	
14	0.04	2	0.03	0.37	0.49	0.15	2	-0.25	0.46	-0.71	
15	0.03	2	0.04	0.11	0.15	0.14	3	-0.22	0.56	-0.77	
16	0.20	2	0.29	0.36	-0.56	0.24	2	-0.73	0.79	-1.10	
17	0.15	2	0.40	0.17	-0.30	0.22	4	-0.45	0.12	-0.23	
18	0.15	2	-0.35	0.20	-0.48	0.11	3	0.21	0.20	-0.46	
19	0.23	3	-0.50	0.27	0.46	0.24	3	-0.48	0.36	-0.65	
20	0.15	1	0.20	0.28	0.45	0.14	1	-0.25	0.29	0.45	
Average_accuracy				0.31	0.47	Average_accuracy				0.65	0.93

발생전 항공 LiDAR DEM과 비교해 보았다. 이 두 지역은 토사붕괴로 인해 산사태가 발생하였고 하류로 유하하면서 사면을 침식시켰다. 퇴적구역은 항공 LiDAR 촬영시 이미 복구된 관계로 퇴적구역의 지형복원은 어렵다. 이 지역에서 횡단면을 5m간격으로 최대 80m폭으로 각각 29개를 추출하여 지형복원기법을 적용한 뒤 그림 9와 같이 토석류 발생전 지형자료를 제작하였다.

또한 토석류 발생전 지형자료와 토석류 발생전 항공 LiDAR DEM의 고도차이를 분석하였다. 즉, 지형복원결과에서 항공 LiDAR DEM을 뺀 것으로 그림 10에 나타내었다. 토석류 발생전 항공 LiDAR DEM을 기준으로 지형복원결과의 오차를 분석한 결과 오차의 범위는 검증지역 1의 경우는 -2.04~0.74m이고 검증지역 2는 -1.67~1.42m를 가진다. 모두 최대오차 기준인 ±0.75m를 넘는 부분이 나타나고 있고 특히 검증지역 1에서 최대오차

기준을 초과하는 부분이 많이 발생하였다. 이러한 분석결과를 표 4에 정리하였다.

두 검증지역 모두 지형복원기법 적용시에는 RMSE가 평균 0.1m로 근사정확도는 매우 높게 나타났다. 항공 LiDAR DEM과의 차이를 나타내는 fRMSE는 검증지역 1은 정확도 기준을 약간 초과하였고 검증지역 2는 정확도 기준 이내로 나타났다. 그러나 최대오차가 기준치인 ±0.75m를 크게 넘게 나타났다. 그림 11과 같이 히스토그램을 이용하여 오차의 분포를 살펴본 결과 두 지역은 분포는 정규분포와 유사한 평균을 중심으로 좌우 대칭인 분포를 나타내고 있다. 일반적인 통계학에서는 오차의 분포가 정규분포를 따른다고 가정할 수 있으며 RMSE는 표준편차와 유사하다고 할 수 있다(구자홍 등, 2000). 따라서 그림 11의 분포가 정규분포에 가깝다고 가정할 수 있고 RMSE는 표준편차와 같으므로 1σ이며 RMSE의 2배가 되는 95% 신뢰수준인(점선

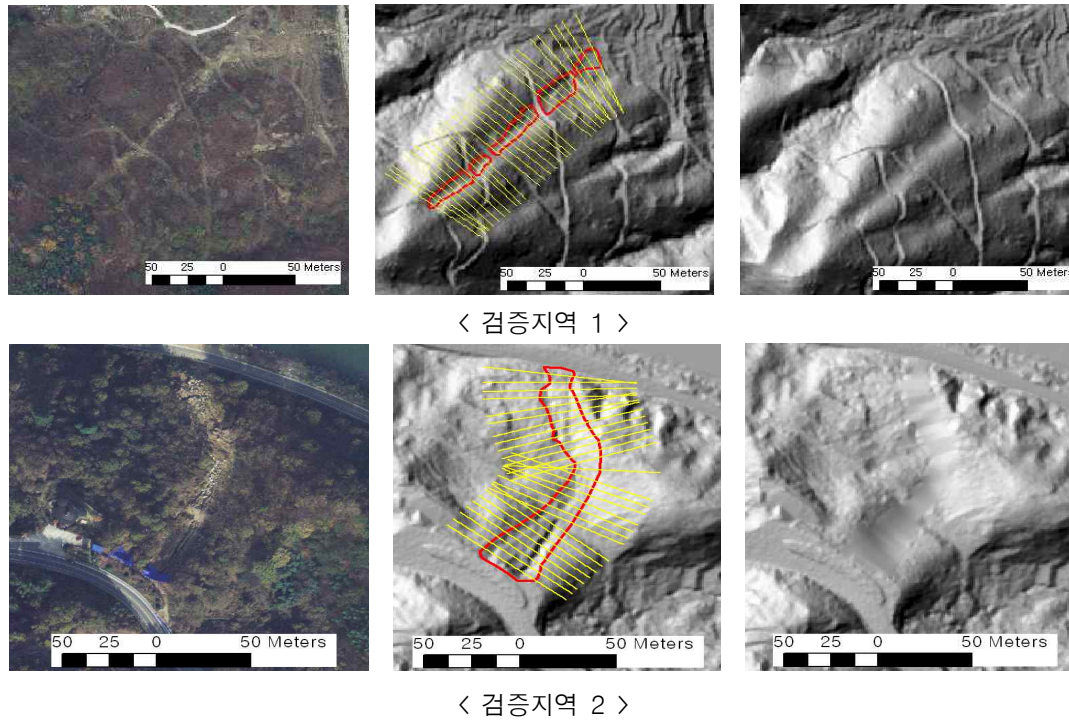


FIGURE 9. 지역별 횡단면 추출 및 토석류 발생전 지형자료 제작결과

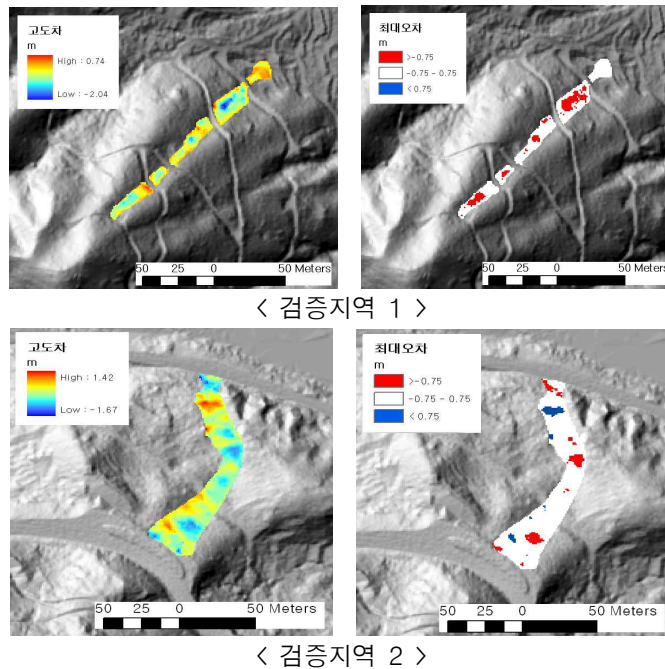
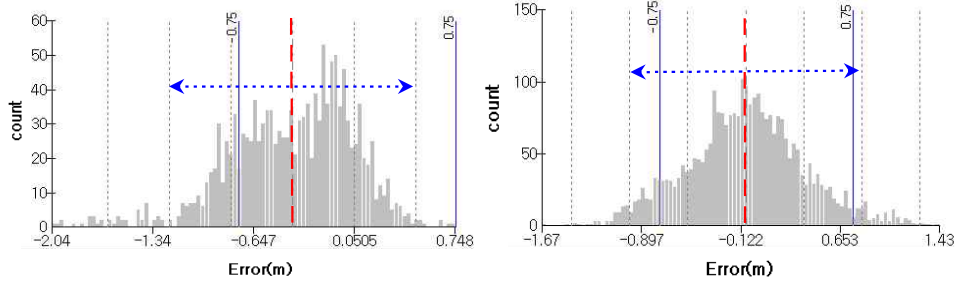


FIGURE 10. 지형복원결과의 오차분포(좌) 및 최대오차 기준의 오차분포(우)

TABLE 4. 두 연구지역에 나타난 지형복원기법의 검증결과

site	cross section	area	RMSE	fRMSE	max error (95%)	std
1	29개	1,387m <sup>2</sup>	0.10	0.57	-2.04(-1.21)	0.42
2	29개	2,881m <sup>2</sup>	0.12	0.46	-1.67(-0.90)	0.45



< 검증지역 1 >

< 검증지역 2 >

FIGURE 11. 두 검증지역에서 나타난 오차의 히스토그램

$\pm 2\sigma$ 에서 최대오차를 다시 산정하면 각각  $-1.21m$ ,  $-0.90m$ 로 나타낼 수 있다.

검증지역 1에 나타난 지형복원결과가 검증지역 2의 결과에 비해 낮은 정확도를 보이는 것은 임도로 인한 영향이 클 것으로 판단된다. 임도를 개설하기 위해서는 횡단면의 절토 및 성토가 이루어져 횡단면이 훼손될 수 밖에 없고 이러한 지역에서 지형복원기법을 적용시 만족할 만한 결과를 얻기 힘들 것이다. 그러나 검증지역의 규모 및 특성이 달라 기존연구와 직접적으로 비교하기는 어렵지만 지형학에서 가장 많이 사용되고 2차 이상의 다항식 함수를 사용하여 과거 지형을 추정한 Schott *et al.*(2003)의 연구결과와 비교할 때 매우 정확한 결과를 나타내고 있다. 기존 연구는 수미터 이상 오차를 보이고 있고, 본 연구에서 제시한 가우시안 혼합모델의 결과는 다항식 함수보다 매우 좋은 결과를 나타내고 있다.

지금까지 지형복원기법의 검증결과를 종합해보면 토석류 발생 전·후의 항공 LiDAR 자료를 이용한 검증은 전체적으로 정확도 기준에 부합되는 결과를 나타내었다. 10개 지역에서 추출한 20개의 횡단면의 검증결과 3개의 횡단면에서 정확도 기준보다 비교적 높은 결

과를 나타냈지만 평균 fRMSE는  $0.3m$ , 최대 오차는  $0.47m$ 로 정확도 기준에 충분히 만족하는 결과를 나타냈다. 또한 두 지역에 각각 29개씩 횡단면을 추출하여 제작한 토석류 발생 전 지형자료와 실제 토석류 발생전에 촬영된 항공 LiDAR DEM과 비교해본 결과 두 지역 모두 fRMSE가  $0.46m$ 과  $0.57m$ 로 비교적 기준치  $0.5m$  가까운 결과를 나타내었다. 그러나 최대오차는 95% 신뢰수준에서  $0.9m$ 와  $1.21m$ 로 기준치  $0.75m$ 보다 높게 나타났다. 그러나 기존의 대표적인 지형학적 근사모델인 고차 다항식을 이용한 과거 지형을 추정한 Schott *et al.*(2003)결과보다는 가우시안 혼합모델을 새로운 지형학적 근사모델로 이용한 지형복원기법이 매우 높은 정확도를 나타냈다. 두 검증방법에서 공통적으로 나타난 문제점은 임도 등과 같은 인공지형이 포함된 횡단면뿐만 아니라 지형이 협소하거나 토석류가 집중적으로 발생하여 훼손되지 않은 횡단면을 충분히 추출할 수 없는 장소에서 오차가 비교적 크게 발생하였다. 후자의 경우는 지형복원결과를 횡단면 추출시 반영하여 이용가능한 횡단면을 확보했지만 근사결과의 누적오차로 인해 정확도 기준에는 만족하지 못했다. 결국

이것이 지형복원기법의 한계점이기도 하지만 향후 이러한 문제점을 보완할 수 있도록 해야 할 것이다.

## 결 론

토석류는 산지에서 발생할 수 있는 재해로 우리나라의 경우 기후변화의 영향으로 매년 발생면적이 증가하고 있는 추세에 있다. 최근 원격탐사 및 GIS 등 공간정보기술을 토석류 연구에 활용하고 있지만, 토사량에 관한 연구는 아직 미비하다. 토사량은 발생 전·후의 지형자료를 이용하여 추정할 수 있어 항공 LiDAR 자료와 같은 정밀지형자료를 이용할 수 있지만 토석류 발생이전의 항공 LiDAR 자료의 확보가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 토석류 발생 후 촬영된 항공 LiDAR 자료를 이용하여 발생이전의 지형을 복원할 수 있는 지형복원기법을 개발하였다. 본 연구에서 제시한 지형복원기법은 기존의 다항식방법을 대신하여 가우시안 혼합모델을 제시하였고, 중심점 추정방법을 개발하여 가우시안혼합모델의 근사정확도를 높였다. 지형복원기법을 검증하기 위해 토석류 발생 전·후 항공 LiDAR 자료를 이용하여 두 가지 방법으로 지형복원기법을 검증하였다. 횡단면을 이용한 검증결과 fRMSE는 0.3m, 최대오차는 0.47m로 다항식 함수보다 높은 정확도를 나타냈으며 정확도 기준에도 만족하는 결과를 나타냈다. 지형자료를 제작하여 검증한 결과는 fRMSE가 0.46m과 0.57m로 기준치 0.5m 가까운 결과를 나타내었지만 최대오차는 기준치 0.75m보다 다소 높게 나타났다.

지형복원기법이 더욱 활용되기 위해서는 자연지형뿐 아니라 주거지 및 경작지 등과 같은 인공지형이 포함된 지형에서도 적용 가능할 수 있도록 보완하고 검토해야 하며 이를 위해서 꾸준한 연구가 반드시 뒤따라야 할 것이다.

지형복원기법의 개발은 좁게는 추정된 토사량을 이용하여 토석류 피해복구시 복구비용이나 규모를 산정하는데 이용할 수 있으며 토석

류의 메커니즘을 이해하는데 필요한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 지형복원기법은 토석류분야에만 국한된 것이 아니라 넓은 의미에서 바라보면 항공 LiDAR 자료의 활용범위를 크게 확장시킴으로써 항공 LiDAR의 가치를 높이는데 기여를 할 것이다. 즉, 항공 LiDAR 측량이 주로 도시지역에 집중되고 있고, 산림 지역은 주로 생태인자 및 지형자료를 제작하는데 국한되어져 있던 것을 감안하면 지형복원기법을 통해 항공 LiDAR 자료의 뛰어난 잠재가치를 드러낸 중요한 결과라고 생각한다.

**KAGIS**

## 참고문헌

- 구자홍, 김진경, 박진호, 박헌진, 이재준, 전홍석, 황진수, 2000. 통계학. 자유아카데미. 225-313쪽.
- 윤호중, 이창우, 우충식, 정용호, 이천용, 2009. 토석류 발생특성과 피해규모 예측기법 개발. 국립산림과학원. 1-2쪽.
- 한학용, 2005. 패턴인식개론. 한빛미디어. 570쪽.
- Ai, T. and J. Li. 2010. A DEM generalization by minor valley branch detection and grid filling. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65:198-207.
- Anders, N.S., A.C. Seijmonsbergen and W. Bouten. 2009. Modelling channel incision and alpine hillslope development using laser altimetry data. Geomorphology 113:35-46.
- Evans, M. and J. Lindsay. 2010. High resolution quantification of gully erosion in upland peatlands at the landscape scale. Earth Surface Processes and Landforms 35:876-886.

- Harbor, J.M. and D.A. Wheeler. 1992. On the mathematical description of glacial valley cross sections. *Earth Surface Processes and Landforms* 17:477-485.
- Hirano, M. and M. Aniya. 1988. A rational explanation of cross-profile morphology for glacial valleys and glacial valley development. *Earth Surface Processes and Landforms* 13:707-716.
- James, L.A. 1996. Polynomial and power functions for glacial valley cross-section morphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 21:413-432.
- Matsuoka, A., T. Yamakoshi, K. Tamura, Y. Nagai, J. Maruyama, T. Kotake, K. Ogawa and S. Tagata. 2009. Sediment dynamics in the mountainous watersheds based on differentiation of multi-temporal LiDAR survey data sets. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering* 62:60-65.
- O'Brien, J.S., P.Y. Julien and W.T. Fullerton. 1993. Two dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119:244-259.
- Schäppi, B., P. Perona, P. Schneider and P. Burlando. 2010. Grating river cross section measurements with digital terrain models for improved flow modelling applications. *Computers & Geosciences* 36:707-716.
- Schtott, L., G. Hufschmidt, M. Hankammer, T. Hoffmann and T. Dikau. 2003. Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology* 55:45-63.
- Su, J. and E. Bork. 2006. Influence of vegetation, slope, and LiDAR sampling angle on DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72: 1265-1274.
- Svensson, H. 1959. Is the cross-section of a glacial valley a parabola?. *Journal of Glaciology* 3:362-363.
- Veyrat-Charvillon, S. and M. Memier. 2006. Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements : calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isere, France). *Earth Surface Processes and Landforms* 31:201-219.
- Wheeler, D.A. 1984. Using parabolas to describe the cross-sections of glaciated valleys. *Earth Surf. Processes Landforms* 9:391-394. **KAGIS**