[기술보고]

LiDAR 기법의 기본원리와 지질학적 적용

김현태¹ · 김영석^{1,*} · 위광재²

¹부경대학교 지구환경과학과 지질구조해연구실, ²(주)지오스토리

[Technical Report]

Basic Concepts and Geological Applications of LiDAR

Hyun-Tae Kim¹, Young-Seog Kim^{1,*}, and Kwang-Jae We²

¹Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University

²Geostory Incorporated

지진은 인적, 물적으로 많은 피해를 야기시키기 때문에 지진피해를 저감하기 위해서 활성단층에 대한 연구가 최근 매우 다양한 방법으로 진행되고 있다. 이러한 연구를 위해서는 활성단층의 존재를 밝히는 것이 우선되어야 하는데 기존 연구에서는 주로 항공사진, 위성사진 그리고 낮은 해상도의 DEM 등을 이용하여 선형구조를 분석하여 주로 연구를 수행하였다. 하지만 단층의 활성도가 상대적으로 낮은 한국의 지체구조 및 지형특성과 수목이 많은 단점으로 인해 기존의 연구 방법은 많은 한계를 가지고 있었다. 이번 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 세계적으로 많은 주목을 받고 있는 원격탐사 방법인 LiDAR 기법에 대해 소개하고 자료 사용법에 대해 간략히 소개하고자 한다. 특히 이 논문에서는 아직 국내에서는 보편화되지 않은 항공 LiDAR 기법을 이용한 연구방법에 대한 최근의 이해를 간략히 소개하고, 국내외의 자료를 통해 지질학에 어떻게 이 기법을 적용할 수 있을지에 대해 소개하고 더 나은 방안을 모색해 보고자 하였다.

주요어 : 활성단층, 선형구조분석, 지형분석, 원격탐사, 항공 LiDAR.

Earthquakes can cause serious loss of life and significant property damage. Thus, the study of active faults is important in evaluating future fault activity and hazards caused by future earthquake events. Structural mapping and the tracing of active faults are the primary steps in studies of active faults. Until now, active faults in South Korea have been mapped using aerial photography, satellite images, and low-quality DEMs. Lineament analysis as a means of identifying active faults is relatively difficult in Korea due to geological characteristics (weak tectonic activity) and dense vegetation cover. In this paper, we introduce the basic concept of the LiDAR technique (a new prospective remote sensing method) and a data analysis method that can overcome these problems. This paper will contribute to a better understanding of the airborne LiDAR technique and its application to South Korea. Some preliminary results from Korean and USA LiDAR data show the usefulness of this technique for tracing lineaments, active faults, and terraces in South Korea.

Key words : Active faults, Lineament analysis, Geomorphic analysis, Remote sensing, Airborne LiDAR

*Corresponding author: ysk7909@pknu.ac.kr

© 2014, 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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론: 원격탐사기법의 진화

최근 전 세계적으로 지진과 관련된 많은 피해들이 보고되고 있다. 예를 들어, 2011년 일본의 도호쿠(東北) 지방에서 발생한 규모 9.0의 지진은 지진동에 의한 1차 피해뿐만 아니라 지진해일에 의한 2차 피해 및 원전시설의 파괴에 의한 3차 피해를 일으켜 심각한 인적, 물적 피해를 야기하였다(Sugawara et al., 2011). 이러한 심각한 지진피해는 지표파열을 발생시키는 규모 6 이상의 상대적으로 큰 지진과 관련되어 있는데 이는 활성단층(active faults)이 재활동되어 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 활성단층에 대한 연구는 세계적으로 매우 다양한 방법으로 진행되고 있으며, 최근에는 국내에서도 축적된 활성단층 연구기술과 수준의 향상으로 한반도에 존재하는 활성단층의 활동시기, 재발주기, 변위, 지진의 규모 등을 알아내기 위한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다(Kim et al., 2011).

지진의 활동특성을 이해하기 위해서는 이러한 활성단층의 존재를 명확히 밝히는 것이 우선되어야 한다. 지금까지의 연구에서는 주로 항공사진이나 위성사진 등을 이용하여 활성단층과 연관되었을 것으로 추정되는 지형 변화를 분석하고, 야외조사나 트랜치 조사를 통해 확인하는 방법으로 이러한 연구를 수행하였다(Kyung, 1997). 하지만 기존의 항공사진 및 위성사진 분석방법들은 식생이 울창한 지역이나 다양한 장애물이 있는 지역의 경우 유용한 지형분석이 어렵다는 한계가 있다. 또한 최근에는 지형분석을 위해 수치표고모델(DEM)을 여러 분야에서 활발하게 사용하고 있는데, 지형도에서 추출한 고도자료는 그 정확도가 상대적으로 낮고, 해상도도 상대적으로 좋지 않은 단점을 갖고 있다(Fig. 1(c)).

최근 지질조사분야에서는 눈부신 IT기술에 힘입어 새롭게 개발된 원격탐사기법들을 여러 분야에 많이 적용하고 있다. 원격탐사는 접근이 어렵거나 불가능한 지역에 대한 지질학적 자료를 얻는데 매우 유용하다. 특히, 최근에는 레이저를 이용한 원격탐사 방법인 LiDAR (Light Detection and Ranging) 기법이 개발되어 활성단층에 의한 지표변형을 인지하는데 막대한 발전을 가져오고 있다(Carter and Shrestha, 1997; Ridgeway et al., 1997; Burman, 2000; Fig. 1(d)). 외국의 경우 1990년대부터 항공 LiDAR에 대한 연구가 꾸준히 이루어져 Krabill et al. (1995)는 그린란드 남부에 분포하는 빙하의 두께 변화를 항공 LiDAR를 이용하여 정밀하게 측정하였고, 계속적인 연구를 통해 산림지역에서 항공

Fig. 1. Comparison of remote sensing images from the Samchuck area. (a) Aerial photograph (sourced from the National Geographic Information Institute), (b) satellite photograph (image is from Google Map), (c) hillshade image from a topographic map, and (d) hillshade image from airborne LiDAR.

LiDAR를 적용시키기 위해 장애물 필터링에 대한 연구도 활발히 수행하였다(Kraus and Pfeifer, 1998). 1990년대 후반에 들어 LiDAR를 이용하여 지진활동을 수반하는 단층에 대한 다양한 연구가 수행되었으며, Hudnut et al. (2001)는 1999년도 캘리포니아 헥터광산에서 발생한 단층의 변위를 LiDAR를 이용해 정량적으로 분석하고, InSAR 자료와 비교하는 연구를 수행하였다. 또한 Zielke and Arrowsmith (2012)는 산안드레아스 단층대를 따라 발달하는 하천 변위를 항공 LiDAR를 이용하여 정량적으로 분석하는 연구를 수행한 바 있다.

항공 LiDAR 기법과 기존의 원격탐사기법 사이의 가장 뚜렷한 차이는, 장애물 제거에 있다. 항공사진과 위성사진은 2차원적인 영상이기 때문에 추가적인 자료의 수정이 불가능 하였다. 하지만 LiDAR는 레이저가 닿는 모든 점이 3차원 좌표계에 투영이 되기 때문에 이를 이

용하여 특정지역에 존재하는 장애물을 제거할 수 있어 지표의 지형을 더욱 뚜렷하게 관찰할 수 있다는 장점이 있다(Fig. 1(d)). 특히, 이러한 기법을 활성단층의 연구에 적용하면 최근에 활동을 한 이력이 있는 단층들은 다른 구조들에 비하여 더욱 뚜렷한 지형변화를 유지하고 있기 때문에 더욱 용이하게 활성단층을 인지할 수 있다. 따라서 이 기법이 정밀야외조사를 위한 위치선정의 단계에서 유용하게 활용이 된다면 많은 정보를 제공할 수 있는 효과적인 지역을 선정하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다(Arrowsmith and Zielke, 2009).

LiDAR는 장비를 어떤 방법으로 사용하고 어디에서 자료를 획득하는가에 따라 지상 및 항공 LiDAR로 나뉜다. 항공 LiDAR 기법의 경우 항공기에서 지상을 레이저로 스캔한 후 3차원적인 모델링을 통하여 시각적인 이미지를 생성할 수 있고, 후처리를 통하여 지상에 존재하는 수목, 건물 등 장애물들을 제거할 수 있기 때문에 지질학에서 특히 유용한 지표 영상만을 획득할 수 있는 장점이 있다. 따라서 상대적으로 활성도가 낮고, 산악지형이 많아서 식생으로 많이 피복되어 있는 우리나라에 이 방법을 적용한다면 많은 활용 가능성이 있을 것으로 판단된다. 따라서 이번 연구에서는 지금까지 발전되어 온 LiDAR 기법을 간략히 소개하고, 국내외의 여러 지역을 대상으로 그 지질학적 활용 가능성을 검토하고자 한다. 이를 위해 LiDAR 기법의 강점을 명확히 보여주는 몇 가지 사례를 소개하고자 한다.

이번 연구는 외국의 기존연구와 한진정보통신에서 제공한 국내의 자료, 그리고 미국의 공개 자료(B4, DOGAMI)를 이용하여 주로 실시하였다. 이번 연구에서는 기존의 연구방법과 항공 LiDAR의 차이를 시각적으로 보여주고 그 활용 가능성을 보여주는 것에 초점을 맞췄으며, 우리나라에 위치한 일부 지역의 예시를 통해 한국지형에서 항공 LiDAR 연구가 얼마나 효과적인지를 검토하고자 하였다.

LiDAR의 기본개념과 자료획득 방법

기본개념

LIDAR (Light Detection and Ranging)는 레이저 스캐너를 이용한 원격탐사방법으로 감지기를 이용하여 표적과의 거리를 측정하여 자료를 생성한다. 이는 GPS (Global Positioning System)와 INS (Inertial Navigation System)를 이용하여 측정한 감지기의 위치 및 방향을 3차원 좌표계에 도시하여 표적의 이미지를 생성하는 기

법이다. 이 기법은 연구대상의 3차원 이미지를 정밀하지만 간편하고 신속하게 획득할 수 있다는 장점이 있어 기존의 원격탐사방법들을 보완하거나 대체하면서 다양한 연구들에 활용되고 있다(Lee, 2006). 일반적으로 촬영 방식에 따라 지상 LiDAR (Terrestrial LiDAR)와 항공 LiDAR (Airborne LiDAR)로 구분된다. 지상과 항공 LiDAR는 촬영 후 자료를 얻는 방식에서의 차이점은 없으나 촬영을 하는 방법에 있어 큰 차이가 있다. 지상 LiDAR의 경우 고정된 장소에서 대상물을 촬영한다. 하지만 항공 LiDAR는 항공기에 레이저 스캐너를 장착하여 이동하면서 지표를 촬영하는 방법이다. 따라서 항공 LiDAR는 넓은 지역을 대상으로 지형이나 지질 등을 연구하고자 하는 경우에 주로 사용되며, 지상 LiDAR의 경우 특정 대상물의 정밀분석을 위해 주로 사용된다.

자료획득 방법

LiDAR 기법은 레이저를 이용하여 직접적으로 대상의 3차원 좌표(x, y, z)를 획득하기 때문에 불연속적인 점 자료 형태로 이루어져 있으며 이를 점군집(Point Cloud)이라고 부른다. 이 자료를 점자료 그대로 사용하거나 전처리 과정을 통해 레스터의 격자 형태로 변환하여 사용할 수 있다. 이런 변환은 특정한 프로그램들(예, Terrscan, LasTools 등)을 이용하여 실시할 수 있다. 또한, 대부분의 연구자들은 목적에 맞게 변환된 자료를 이용하여 하나의 프로그램만이 아닌 다양한 프로그램을 복합적으로 이용하여 연구를 실시하고 있다. 이렇게 획득한 다양한 지형이미지는 여러 지질학적 연구에 활용될 수 있다(Flood and Gutelius, 1997).

지상 LiDAR (Terrestrial LiDAR)

지상 LiDAR는 레이저 스캐너를 전용 삼각대 위에 고정시켜 지상에서 촬영하는 기법이며, 고정된 지점에서 촬영하기 때문에 한 번에 촬영할 수 있는 반경이 항공 LiDAR에 비해 상대적으로 좁다. 촬영하기 위해서는 측량학적인 기본지식이 필요하며, 접근이 어렵거나 문화재 등 보전을 위해 대상에 직접 접촉하지 않고 대상의 정확한 삼차원 영상을 컴퓨터에서 구현하고자 하는 각종 자료를 취득하는데 사용된다.

이러한 지상 LiDAR는 고고학적 현장에서의 촬영을 통하여 3차원 모형을 제작하거나(Costantino and Angelini, 2011), 단층면을 촬영하여 단층면의 거칠기를 정량적으로 분석하는데 사용할 수도 있으며(Bistacchi et al., 2011), 자연적으로 발생한 석회동굴내부를 대상으로

Fig. 2. Schematic diagram for collecting airborne LiDAR data (image is from Google Map).

Fig. 3. Point cloud data from airborne LiDAR over Mt. Bomun in Daejeon.

촬영하여 동굴을 형태적으로 분석하는데도 사용 가능하다(Lerma et al., 2010). 또한, 지상 LiDAR는 촬영대상을 모든 방향으로 촬영할 수 있어 항공 LiDAR를 이용하여 촬영한 자료를 보강할 수 있다는 장점이 있다(Ruiz et al., 2003). 이러한 기법을 이용하면 좀 더 다양하고 정량적인 연구를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

항공 LiDAR

항공 LiDAR는 레이저 스캐너를 항공기에 장착하여 촬영하는 기법으로(Fig. 2) 지상 LiDAR에 비해 상대적으로 대상이 멀어 해상도가 떨어지는 단점이 있다(Bistacchi et al., 2011). 하지만 훨씬 넓은 범위의 지역에 대한 자료를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 또한 항공 LiDAR 자료는 위치추적장치인 GPS와 INS를 같이 이용하기 때문에 정확한 위치를 측정하여 지표의 3차원 좌표를 생성할 수 있어 다양한 연구에 응용할 수 있다. 이렇게 획득한 항공 LiDAR의 Binary 자료를 점군집 자료의 형식인 LAS 또는 ASCII 자료로 변환하여(Yoon et al., 2006b; Fig. 3) 사용한다. 또한 전처리를 통해 DEM (Digital Elevation Model) 자료로 변환하여 사용할 수도 있는데, 전처리는 분류와 분할과정을 거치

Fig. 4. Data processing flow chart (modified from Chung et al., 2005).

며 사용목적에 맞게 변환하게 된다(Fig. 4).

항공 LiDAR 자료는 다중반사레이저빔(Multiple Return 또는 Echo)을 기록하는 기능이 있으며, 이 정보를 이용하여 장애물을 지표면과 분리할 수도 있어 다양한 형태의 자료로 변환이 가능하며, 디지털지형모델인 DSM (Digital Surface Model)과 DTM (Digital Terrain Model)이 이에 해당된다(Fig. 5). 특히, 지질학에서는 실질적으로 많은 연구에서 빌딩이나 나무를 제거하여 순수한 지표면만을 3차원적으로 나타내는 DTM 방법이 DSM보다 널리 활용되어져 왔다(Lee, 2006). 이에 따라 다양한 장애물을 제거하는 필터링 알고리즘이 많은 연구자들을 통해 개발되고, 수정되어 왔고(Kraus and Pfeifer, 1998; Haugerud and Harding, 2001; Zhang et al., 2003), 이를 바탕으로 최근 한국에서도 국내에 맞게 도심 및 산림지역에서 LiDAR 자료의 특성과 그에 맞는 필터링 방법들이 연구되고 있다(Chung et al., 2005; Lee, 2006; Yoon et al., 2006b).

LiDAR 기법의 지질학적 적용

선진국에서는 최근 많은 지역에 대한 LiDAR 자료가 모아지고 있으며, 이를 통해 다양한 연구가 수행되고 있다(Blair et al., 1999; Haugerud et al., 2003). 우리나라도 최근에 일부지역에 대한 자료의 수집이 시작되었

Fig. 5. Comparison of images taken using different techniques. (a) Gwangreoung arboretum area in Pochun city and (b) Mt. Bomun in the Daejeon area are selected for this comparison. From left to right, the panels show satellite, full feature (DSM), and bare earth images (DTM).

으나 지질학적인 용도보다는 항공 LiDAR를 위주로 한 공간정보분석을 통해 도심지역의 침수피해 규모를 추정하는(Han et al., 2009) 등 환경재해분석 및 방재의 용도로 많이 사용되고 있다. 우리나라에서 이러한 자료를 지질학적인 용도로 사용하기 위한 처리기법이나 활용은 아직 초보적인 단계에 머물러 있다. 그러나 이 기법이 다양한 분야에서 이용되고 있고, 최근 급격한 발전을 이루고 있으며, 국내에서도 일부 연구기관과 업체들이 이러한 자료를 보유하고 계속적으로 수집하고 있어 발전의 가능성이 높아 보인다.

LiDAR 자료를 이용해 지질학적인 연구를 실시할 경우 기존의 방법에 비해 크게 세 가지의 장점이 있다.

- 1) 기존에 지형분석을 위해 사용되고 있던 항공사진 및 위성사진의 경우 대부분 2차원적인 이미지를 이용한 분석을 실시하였으나 LiDAR 자료의 경우

3차원 좌표상에 자료를 나타낼 수 있고, 이미지에 존재하는 장애물(수목, 건물)을 필터링을 통해 제거할 수 있어 순수 지형정보만을 추출하여 분석할 수 있다(Fig. 5).

- 2) 일반적으로 위성영상에서 추출할 수 있는 DEM은 30 m와 90 m의 해상도를 가지고 있어 넓은 지역에 대한 지형 분석은 용이하나 좁은 지역의 분석에서는 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 또한 식생과 지표층을 분리할 수 없기 때문에 실제 지표의 높이와는 많은 오차가 생긴다. 하지만 LiDAR 자료의 경우 약 1 m 내외의 해상도를 가지고 있으며, 실제 지표자료만을 얻을 수 있기 때문에 정밀한 분석에 더욱 용이하다(Fig. 1(c); (d)).
- 3) 지금까지는 지형의 고도를 정하기 위해 실제로 목표지점에 가서 측량을 하거나 GPS를 이용하여 측정하였고, 원격으로 정확한 고도를 측정하는 데는

Fig. 6. Location maps of the study areas. (a) Locations of the four sites selected in Korea. (b) Locations of two sites selected in the USA (image is from Google Maps).

많은 제약이 있었다. 하지만 항공 LiDAR를 이용해 촬영한 영상을 이용하면 지형의 높낮이를 정량적으로 분석할 수 있어 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 지질학적인 응용의 한 예로 해안단구 및 하안단구를 연구함에 있어 단구층의 분류 및 높이의 차이를 정량적으로 분석할 수 있다. 이를 기존의 한국 동남부에 대한 해안단구 연구(Choi et al., 2008)등에 접목시킨다면 보다 정밀한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

이번 연구를 위해 선정된 지역은 국내는 강원도 삼척시 일대와 경북 경주시 월성 일대, 대전광역시 보문산 일대 및 경기도 포천시 광릉수목원 지역이며, 국외는 미국 오리건(Oregon)주의 케이프 블랑코(Cape Blanco) 주립공원 지역과 캘리포니아(California)주의 켄(Kern) 지역이다(Fig. 6).

한국의 지형은 산악지역이 많고 식생의 밀도가 높은 특징을 보인다. 따라서 자료의 필터링이 용이하지 않으나 최근 각종 필터링 기법의 발달로 인해 상당히 높은 해상도의 지표자료를 얻을 수 있게 되었다. 또한 한반도는 상대적으로 활성화도가 낮은 지형적 특성을 보이고 있어 활성단층 연구에 많은 어려움이 있다. 하지만 항공 LiDAR 자료를 통해 식생을 제거하여 관찰할 경우 기존에 사용하던 항공사진이나 위성사진을 사용하는 경우보다는 월등히 우수한 자료를 제공하는 것으로 나타났다.

포천 광릉수목원의 경우, 지형기복이 적고 수목원의

특성상 식생의 밀도가 높아 위성사진과 식생을 제거하지 않은 항공 LiDAR 자료에서는 뚜렷한 지형을 인지할 수 없었다. 하지만 항공 LiDAR 자료에서 필터링을 통해 식생을 제거한 후 관찰한 결과, 계곡들과 하천들의 형태를 확실히 인지할 수 있었다(Fig. 5(a)). 특히, 포천 광릉수목원 일대의 경우 노년기의 지형적 특성을 보여주고 있어서, 이를 분석하는 훈련을 하게 되면 선형구조의 분석기술을 향상시키는데 도움이 될 것으로 판단된다. 대전광역시 보문산 일대의 자료를 살펴본 결과 포천 광릉수목원 일대와 마찬가지로 위성사진과 식생을 제거하기 전의 항공 LiDAR 자료보다 식생을 제거한 후의 영상에서 지형적 특성 및 변형이 더욱 뚜렷하게 인지되었다. 또한 항공사진 및 위성사진에서는 잘 인지되지 않았던 계곡 및 하천의 유로도 인지할 수 있어 이를 잘 활용한다면 활성의 가능성이 높은 단층의 위치를 인지하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다(Fig. 5(b); 7(c)).

국외 연구대상 지역은 한국과 유사하게 식생의 밀도가 높은 오리건 지역과 건조한 지역이지만 단층의 발달이 잘 알려진 캘리포니아 지역으로 선정하였다. 먼저 오리건의 케이프 블랑코 지역은 Daniel et al. (1990)에 의해 지질분류가 이루어졌으며, 단구층에서 산출되는 화석을 이용하여 연대를 분류하는 연구가 수행되었던 지역이다. 하지만 이 연구에서 단구지형에 대한 정량적인 연구는 수행되지 않았기 때문에 이번 연구에서는 항공 LiDAR 자료를 이용해 이 지역에서 나타나는 단구지형에 대한 지형 프로파일링을 실시하였고, 정량적인 결과

Fig. 7. Satellite image and airborne LiDAR mosaic image of Mt. Bomun in Daejeon. (a) Before removing vegetation (DSM), (b) after removing vegetation (DTM), and (c) image comparison among satellite, DSM, and DTM images for the same area. Arrows in the DTM image indicate a stream that is offset across the lineament.

를 얻을 수 있었다. 두 번째로 캘리포니아 지역은 활동성이 높은 활성단층으로 알려진 산안드레아스(San Andreas) 단층이 통과하는 지역이라 선정하였으며, 항공 LiDAR 자료는 있지만 기존에는 연구되지 않은 지역을 중심으로 분석하였다. 이를 통해 실제 활성단층 지역에서 어떠한 지형변화가 나타나는 지에 대해 분석하여 활성단층을 추적해 보고자 하였다.

이번 연구에서 사용한 국내 항공 LiDAR 자료는 (주)한진정보통신에서 제공하였으며, 미국의 자료는 Open Topography 홈페이지에 공개되어 있는 자료를 이용하였고, 2005년 촬영한 B4 project 자료와 2006년 촬영한 DOGAMI 자료를 사용하였다.

선형구조분석

선형구조의 분석은 활성단층 분석을 위한 가장 기초적인 조사방법 중 하나로, 뚜렷한 지형적 특성을 조사하여 최근의 단층활동에 대한 중요한 정보를 얻는 방법이다(O'Leary et al., 1976). 일반적으로 항공사진을 입체

경으로 관찰하여 지형의 변화를 인지하였으며, 최근 위성사진이 보편화되면서 위성사진과 함께 사용되어지고 있다. 선형구조들은 일반적으로 단층, 단열 및 절리와 같은 지질구조와 밀접한 관련이 있으며(Richard, 1999), 특히 활성단층의 경우 지형변위 및 변형을 유발한 단층운동이 상대적으로 오래되지 않아서 더욱 직선적이고 명확한 지형적 특징을 보인다. 이번 연구에서는 캘리포니아 지역의 유명한 활성단층인 산안드레아스 단층을 따른 항공 LiDAR 자료를 이용하여 활성단층에서 나타나는 지형변화를 인지하고 단층을 추적해 보고자 하였으며(Fig. 8), 국내의 사례로 대구광역시 보문산 일대와 경기도 포천 광릉수목원 일대의 항공 LiDAR 자료를 이용해 선형구조 분석을 실시하였다.

먼저, 캘리포니아 지역에 대한 자료의 경우 활성단층을 따라 하천이 우수향의 운동감각을 보이며 변위되어 있는 것을 관찰할 수 있었으며(Fig. 8(d)), 이러한 지형의 변화를 따라 단층을 추적할 수 있었다(Fig. 8(b)). 또한 지형의 고도가 산안드레아스 단층을 경계로 급격하

Fig. 8. Analysis of airborne LiDAR data from the Kern area of California, USA. (a) Study area, (b) fault traces (red line), (c) elevation changes along the San Andreas Fault, and (d) offset streams (red arrows).

Fig. 9. Analysis of airborne LiDAR data from Mt. Bomun in Daejeon city. (a) Bare earth image, and (b) recognized lineaments (red lines). Dashed lines indicate unclear lineaments.

게 변화하는 것을 관찰 할 수 있었다(Fig. 8(c)). 국내 자료에도 이와 유사한 분석을 실시한 결과, 대전광역시 보문산 일대의 경우 항공사진, 위성사진 그리고 식생이 제거되지 않은 항공 LiDAR 이미지에서도 어느 정도 큰

선형구조들은 인지되나, 식생에 덮여있는 지형과 소규모의 선형구조들은 인지하기 어려웠다. 하지만 식생을 제거한 후의 이미지와 비교분석한 결과 이러한 문제점들이 상당히 해결되어 정밀한 분석이 가능한 것을 확인할

Fig. 10. Analysis of airborne LiDAR data from the Weolsung area, SE Korea. (a) Satellite image of the study area (image is from the Daum map), and (b) bare earth image with geological map (modified from Korea Institute of Geoscience and Mineral). Red arrows indicate lineaments. Ksh: black shale, Kgr: Bulguksa Group biotite granite, Ktgh: Bulguksa Group hornblende granite, Qa: Quaternary deposit.

Fig. 11. Arboretum area in Pochun city. (a) Full-feature image and lineament analysis from airborne LiDAR data of the Gwangreung area. Dashed lines indicate lineaments. (b) Recognized offset streams (red arrows).

수 있었다(Fig. 9).

두 번째로 월성지역에 대한 지형변화를 분석한 결과, 위성사진에서 인지하지 못했던 지형 변화와 선형구조를 관찰할 수 있었으며, 항공 LiDAR 자료와 지질도를 함께 사용하여 지질이 변함에 따라 지형의 발달형태도 달라지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 10(b)). 마지막으로 경기도 포천시 광릉수목원 일대의 경우, 다른 지역보다 특히 높은 밀도의 식생으로 덮여 있는 것을 위성사진 및 식생을 제거하지 않은 항공 LiDAR 자료에서 확인할 수 있었고, 이를 필터링을 통해 제거한 결과 북북서-남

남동 방향이 우세한 다수의 선형구조가 관찰되었고, 몇 조의 하천유로가 같은 방향으로 어긋난 양상을 관찰할 수 있었다(Fig. 11). 이는 미국 캘리포니아 지역의 산안드레아스 단층을 따라 나타나는 지형변화와 매우 유사한 지형인 것으로 판단되며, 이는 활성단층 및 지표변형에 대한 야외조사를 실시할 대상지역이 될 수 있음을 의미하기 때문에 단층활동의 정보를 제공할 수 있는 최적의 위치를 선정하는데 이러한 분석이 기여할 수 있음을 잘 보여준다.

Fig. 12. Airborne LiDAR image with a DEM. (a) LiDAR image of the study area, Cape Blanco State Park, Oregon, USA. (b) Terrace topography analyzed from LiDAR data (each color indicates a different terrace). (c) Cross-sections (A-A' and B-B') of elevation profiles.

지형분석에의 적용

지질학적 연구에 있어서 정밀한 지형분석은 상당히 중요한 정보를 제공할 수 있다. 특히 활성단층 연구를 위해 해안 및 하안단구에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며, 한반도 남동부의 해안을 따라 단구의 높이를 정량적으로 측정하는 연구도 진행되었다(Choi et al., 2008). 이번 연구에서 지형분석을 위해 사용한 자료는 미국의 DOGAMI 자료에 포함되어 있는 오리건 주의 한 지역이며, 이 지역에서는 이미 과거에 이 지역에 발달하는 해안단구와 그 주변 지질에 대한 연구가 일부 수행되었으나(Daniel et al., 1990) 이는 주로 지질과 해안단구의 용기울에 대한 분석에 초점이 맞추어져 있었으며, 각 단구층을 고도에 따라 분류하는 연구는 수행되지 않았다. 따라서 이번 연구에서는 항공 LiDAR 자료를 이용하여 기존 연구에서 수행되지 않은 단구지형에 대한 정량적 분석을 실시하였다. 그 결과 Fig. 12에서 나타나는 A-A' 단면의 최고위 단구층은 약 180 m의 높이를 보였으며, B-B' 단면의 최고위 단구층은 170 m의

고도를 보여 10 m 정도의 차이를 보이며 뚜렷이 구분되는 것을 확인할 수 있었다.

비록 이 지역에 대한 실질적인 야외조사를 실시할 수 없어 이번 분석에서 나타나는 단구층의 고도차이가 어떠한 원인에 의해서 발생하였는지는 알 수 없었지만 단구지역에서의 활성단층 연구에 대한 활용 가능성을 보여줄 수 있다는 점에서 큰 의미를 가진다. 이처럼 항공 LiDAR 자료를 이용한 정량적인 지형분석과 야외조사가 병행된다면 활성단층을 탐색하는데 기존의 방법(항공사진, 위성사진)에 비해 더 나은 결과를 도출할 것으로 사료된다.

토론 및 향후 연구

한반도 활성단층의 존재는 1990년대 초에 최초로 보고되었다(Okada et al., 1994). 이후 해안단구를 정량적으로 조사·분석하여 이를 이용한 활성단층 연구가 진행되었다(Lee et al., 2000; Choi et al., 2008). 단구의

용기는 해수면 변동이나 제4기 동안 일어난 지각운동을 말해주는 것으로, 이는 해수면 변동주기, 지각평형 혹은 조구조적인 운동에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있다. 한반도의 제4기 지구조사와 고기환경을 감안하여 볼 때, 우리나라는 지각평형보다는 해수면변동과 지구조운동에 의하여 일어난 용기작용으로 해석된다.

기존에 보고된 바에 따르면, 동해안을 따른 용기율이 지역에 따라 0.19 m/ky~0.88 m/ky 정도로 다소 차이가 있음을 알 수 있다(Chwae and Choi, 2007). 이는 지역 간의 불연속면이 존재함을 지시한다. 이러한 불연속면은 해수면 변동에 단층활동과 같은 지구조운동이 결합되었을 가능성을 지시하기 때문에 이러한 지역에 대한 조사는 활성단층 연구에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 내륙지역에서의 활성단층 연구는 단구층의 부재, 한반도의 기후특성 및 식생의 분포 등으로 인해 많은 제약이 있기 때문에, 이러한 활성단층 연구를 항공 LiDAR와 연계하여 실시한다면 상당히 유용할 것으로 판단된다.

항공 LiDAR 자료를 획득함에 있어 식생의 분포 및 특성은 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 우리나라의 경우, 지형 및 식생의 특성상 다양한 종류의 수목이 분포하며 계절별로 식생의 밀도도 다양하게 변화한다. 일반적으로 침엽수와 활엽수가 분포하고 있는 지역의 레이저 투과율은 20-40%이며, 겨울철 활엽수 지역에서는 70% 이상이 투과하는 것이 특징이다(Yoon and Lee, 2006a). 때문에 이러한 특성을 고려하여 LiDAR 자료를 획득한다면 한국의 특성에 맞는 양질의 자료를 획득할 수 있을 것으로 사료된다.

지상 LiDAR 분야에서도 최근 고고학 등 다양한 분야에서 많은 활용과 연구가 수행되고 있으며, 특히 Costantino and Angelini (2011)에 의한 연구에 따르면 지상 LiDAR로 촬영한 고고학적 유물 및 장소에 대한 3차원 좌표자료를 이용하면 3차원적인 모형을 제작할 수도 있다. 이는 문화재의 변형에 대한 모니터링에도 활용할 수 있어서 문화재의 보존에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 단층대에 대한 정량적인 분석을 하는데 있어서도 많은 정보를 줄 수 있으며, 항공 LiDAR 자료에서 지형적 특성에 의해 빠진 부분을 지상 LiDAR를 이용해서 보충할 수도 있다(Bistacchi et al., 2011). 이러한 국외사례를 바탕으로 우리나라에서도 LiDAR를 이용한 다양한 연구가 수행될 수 있을 것으로 기대되며, 자료가 축적됨에 따라 LiDAR를 이용하는 연구들이 빠른 속도로 발전할 것으로 기대된다.

결론

이번 연구에서는 항공 LiDAR 자료의 지질학적 적용 가능성을 검토하고자 국내외 LiDAR 자료의 분석을 수행하였다. 연구지역은 국내에서는 대전, 포천, 삼척지역을 선정하였고, 국외에서는 미국의 오리건주, 캘리포니아주를 선정하였다. 국내 연구지역은 대부분 수목으로 덮여있는 지역으로서 기존의 자료(항공사진, 위성사진)를 통해서 정밀한 선형구조 분석이 힘든 지역이지만 항공 LiDAR 자료를 분석한 결과 기존 연구방법으로는 인지하기 힘들었던 지형적 특징들과 선형구조들이 선명하게 관찰되었다. 국외 연구지역인 오리건주의 경우 기존에 수행되던 지형분석에 비해 더욱 정량적인 자료를 획득할 수 있었으며, 캘리포니아주의 산안드레아스 단층대를 따라 분석한 방법은 국내자료의 분석에도 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

이번 연구는 항공 LiDAR 자료의 활용 가능성을 보여주는 것으로 선형구조분석과 지형분석 등 다양한 지질학적 연구에 많은 기여를 할 것으로 기대된다. 또한 향후 식생을 제거하는 필터링 알고리즘의 지속적인 발전이 있을 것으로 판단되어, 이에 맞춰 해상도가 더 뛰어난 이미지를 획득할 수 있을 것으로 기대된다. 최근 세계적으로 LiDAR 기법을 이용한 연구가 급속도로 발전하고 있기 때문에, 우리나라에서도 앞으로 항공 LiDAR의 자료가 더 많이 축적된다면 더욱 의미 있는 연구결과들이 도출될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 특히, 이러한 기법들이 지상 LiDAR 기법 및 야외조사 기술과 적절히 결합된다면 지표변형과 활성단층의 연구에 획기적인 발전을 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 연구는 2013년 국토해양부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안지질위험요소연구). 이 연구를 위하여 많은 도움을 주신 부경대학교 지질구조해연구실원들에게 감사하며, 이 논문이 더욱 다듬어질 수 있도록 꼼꼼하게 검토하고 문제점을 지적해주신 서용석 편집위원장과 익명의 심사자분들에게도 진심으로 감사를 드린다.

References

Arrowsmith, J. R. and Zielke, O., 2009, Tectonic geomorphology of the San Andreas Fault zone from high

- resolution topography: An example from the Cholame segment. *Geomorphology*, 113, 70-81.
- Bistacchi A., Griffith, W. A., Smith, S. A. F., Toro, G. D., Jones, R., and Nielsen, S., 2011, Fault roughness at seismogenic depths from LIDAR and photogrammetric analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 2345-2363.
- Blair, J. B., Rabine, D. L., and Hofton, M. A., 1999, The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 54, 115-122.
- Burnman, H., 2000, Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 125p.
- Carter, W. E. and Shrestha, R. L. 1997, Airborne laser swath mapping: instant snapshots of our changing beaches. In *Proceedings of the Fourth International Conference: Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, 1, 298-307.
- Choi, S. -J., Merritts, D. J., and Ota, Y., 2008, Elevations and ages of marine terraces and late Quaternary rock uplift in southeastern Korea. *Journal of Geophysical Research*, 113, B10403.
- Chung, D. K., Goo, S. H., Eo, J. H., and Yoo, H. H., 2005, DTM Extraction from LiDAR data by filtering method. *GIS/RS Joint Spring Symposium, Construction Engineer's Hall*, 19 May 2005, 355-361.
- Chwae, U. -C. and Choi, S. -J., 2007, Active fault study of Korea: the past, present and future. *Quaternary Tectonics of Southeastern Korea*, Korea Institute of Geoscience and Mineral, 31p.
- Costantino, D. and Angelini, M. G., 2011, Terrestrial LiDAR survey of archaeological site for prototyping. *Journal of Earth Science and Engineering*, 1, 1-8.
- Daniel R. M., Harvey M. K., Gifford H. M., George L. K., Joseph F. W., and Galan W. M., 1990, Age estimates and uplift rates for late pleistocene marine terraces' Southern Oregon portion of the Cascadia forearc. *Journal of Geophysical Research*, 95, 6685-6698.
- Flood, M. and Gutelius, B., 1997, Commercial implications of to-pographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 63, 327-329 and 363-366.
- Han, J. -G., Kim, S. -P., Chang, D. -H., and Chang, T. -S., 2009, Estimation of inundation damages of urban area around Haeundae beach induced by super storm surge using airborne LiDAR data. *The Journal of GIS Association of Korea*, 17(3), 341-350.
- Haugerud, R. A. and Harding, D. J., 2001, Some algorithms for virtual deforestation (vdf) of lidar topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34-3(W4), 211-217.
- Haugerud, R. A., Harding, D. J., Johnson, S. Y., Harless, J. L., Weaver, C. S., and Sherrod, B. L., 2003, High-resolution LiDAR topography of the Puget Lowland, Washington-a bonanza for earth science. *GSA Today, Geological Society of America* 13(6), 4-10.
- Hudnut, K. W., Borsa, A., Glennie, C., and Minster, J. -B., 2001, High-resolution topography along surface rupture of the 16 October 1999 Hector Mine, California, Earthquake (Mw7.1) from airborne laser swath mapping. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1570-1576.
- Kim, Y. -S., Kihm, J. -H., and Jin, K., 2011, Interpretation of the rupture history of a low slip-rate active fault by analysis of progressive displacement accumulation: an example from the Quaternary Eupcheon Fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society*, 168, 273-288.
- Krabill, W. B., Thomas, R. H., Martin, C. F., Swift, R. N., and Frederick, E. B., 1995, Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet. *Int. J. Remote Sensing*, 16(7), 1211-1222.
- Kraus, K. and Pfeifer, N., 1998, Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 193-203.
- Kyung, J. -B., 1997, Paleoseismological study on the Mid-northern part of Ulsan Fault by trench method. *The Journal of Engineering Geology*, 7(1), 81-90.
- Lee, B. -J., Kim, Ju-Y., Yang, D. -Y., and Jung, H. -K., 2000, The characteristics of quaternary fault and coastal terrace around Suryumri area. *The Journal of Engineering Geology*, 10(2), 133-149.
- Lee, I., 2006, A feature based approach to extracting ground points from LiDAR data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(4), 265-274.
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., and Villaverde, V., 2010, Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Pálpallo' as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, 499-507.
- O'Leary, D. W., Friedman, J. D., and Pohn, H. A., 1976, Lineament, linear, lineation, some proposed new standards for old terms: *Geological Society of America*, 87, 1463-1469.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M. S., Jo, W. R., Kim, S. K., Jeon, J. S., Chi, H. C., and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, southeast Korea. *Journal of Geography*, 103, 111-126.
- Richard, H. G. Jr., 1999, 3-D Structural Geology : a practical guide to surface and subsurface map interpretation. Springer, New York, 320p.
- Ridgway, J. R., Minster, J. -B., Williams, N., Bufton, J. L., and Krabill, W. B., 1997, Airborne laser altimeter survey of Long Valley, California. *Geophysical Journal International*, 131(2), 267-280.
- Ruiz, A., Kornus, W., Talaya, J., and Colomer, J. L., 2003, Terrain modeling in an extremely steep mountain: a combination of Airborne and Terrestrial LiDAR. *Workshop on airborne laser scanning, Dresden*, 8-10 October 2003, 35p.
- Sugawara, D., Goto, K., Chague-Goff, C., Fujino, S.,

- Goff, J., Jaffe, B., Nichimura, Y., Richmond, B., Szczucinski, W., Tappin, D. R., Witter, R., and Ylianto, E., 2011, Initial field survey report of the 2011 East Japan Tsunami in Sendai, Natori and Iwanuma Cities. UNESCO-Ioc International Tsunami Survey Team, 16p.
- Yoon, J. -S. and Lee, K. -S., 2006a, Prospects for understanding forest structure using LiDAR. Proceedings of the KSRS spring conference, Korean Journal of Remote Sensing, 149-152.
- Yoon, J. -S., Lee, K. -S., Shin, J. -I., and Woo, C. -S., 2006b, Characteristics of airborne LiDAR data and ground points separation in forested Area. Korean Journal of Remote Sensing, 22(6), 533-542.
- Zhang, K., Chen, S. -C., Whitman, D., Shyu, M. -L., Yan, J., and Zhang, C., 2003, A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(4), 872-882.
- Zielke, O. and Arrowsmith, J. R., 2012, LaDiCaoz and LiDARimager-MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement. Geosphere, 8(1), 206-221.
-
- 원고접수일: 2013년 12월 16일
수정본채택: 2014년 3월 4일
게재확정일: 2014년 3월 6일

김현태

부경대학교 지구환경과학과 지질구조재해연구실
608-737 부산광역시 남구 용소로 45(대연동)
Tel: (051) 629-7909
Fax: (051) 629-6623
Email: kimht0709@gmail.com

김영석

부경대학교 지구환경과학과 지질구조재해연구실
608-737 부산광역시 남구 용소로 45(대연동)
Tel: (051) 629-6633
Fax: (051) 629-6623
E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

위광재

(주)지오스토리(www.geostory.co.kr) 대표이사
157-840 서울특별시 강서구 화곡로68길 82(등촌동)
Tel: (02) 6961-5874
Fax: (02) 6961-5879
E-mail: wkj777@naver.com