

## 컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용한 수목 개체 및 수고 추정

장안진\* · 유기윤\* · 김용일\* · 이병길\*\*

\*서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부, \*\*(주)타스테크

### Estimation of Individual Tree and Tree Height using Color Aerial Photograph and LiDAR Data

Chang, An Jin\*, Yu, Ki Yun\*, Kim, Yong Il\*, and Lee, Byung Kil\*\*

\*School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

\*\*TAS Tech Co., Ltd.

**Abstract :** Recently efforts to extract information about forests by using remote sensing techniques for efficient forest management have progressed actively. In terms of extraction of tree information using single remote sensing data, however, the accuracy of tree recognition and the quantity of extracted information is limited. The objective of this study is to carry out tree modeling in domestic environment applying the latest core technique for tree modeling using color aerial photographs and LiDAR data and to estimate the result of tree modeling. A small-scale coniferous forest was investigated in Daejeon. It was 0.77 that the  $R^2$  of accuracy test of tree numbers that estimated with color aerial photography and LiDAR data. In terms of tree height, there was no difference between the estimated value and the field measurements in the case of the group accuracy test of the recently unchanged area. Moreover  $R^2$  was 0.83 in the case of the individual accuracy test.

**Key Words :** Aerial photography, LiDAR(Light Detection and Raging), tree numbers, tree height.

**요약 :** 산림의 효율적인 관리를 위해 최근 원격탐사 기법을 이용하여 산림에 관련된 정보를 추출하려는 노력들이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 단일 원격탐사 데이터를 이용하는 경우 수목 인식의 정확도 및 추출되는 정보의 양적인 면에서 많은 한계를 가진다. 본 연구는 최근의 수목모델링을 위한 핵심기술들을 컬러항공사진과 LiDAR 데이터에 적용하여 국내 환경에서의 수목 모델링을 수행하고, 그 결과를 평가하는데 그 목적을 두고 있다. 대전광역시 내에 존재하는 소규모 산림 지역 중 침엽수만으로 이루어진 단순림을 대상 지역으로 하였다. 컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용하여 추정된 개체수의 정확도 평가 결과  $R^2$ 값이 0.77로 나타났다. 수고의 경우 집단 정확도 평가 결과 최근 변화가 일어나지 않은 지역은 측정값과 추정값의 차이가 없는 것으로 나타났고, 개별 정확도 평가의 경우  $R^2$ 값이 0.83으로 높은 상관도를 보였다.

## 1. 서론

산림지역이 차지하는 면적의 비율이 높은 우리나라의 경우 산림의 관리가 중요하다. 효율적이고, 경제적인 산림관리를 위해서는 수목 개체수, 수고, 흉고직경 등의 산림에 관련된 정보를 보다 쉽고, 정확하게 취득할 수 있어야 한다. 산림에 관련된 정보의 취득을 통해, 산림지역의 산림규모의 추측, 산림지역의 변화탐지 등과 함께 도심지 내의 수목과 가로수 관리 등을 보다 효율적으로 진행할 수 있다.

그러나 산림은 차지하는 면적이 크고, 지형적인 특성상 접근이 용이하지 않기 때문에 현장조사를 통해 산림관리를 위한 정보의 취득에는 한계가 있다. 현장조사의 경우 시간, 경비, 인력, 취득되는 정보의 양, 정확성 등의 측면에서 효율적이지 못하고, 산림의 특성을 정량적, 정성적으로 측정하기 어렵다. 따라서 최근 산림관리에 필요한 여러 가지 정보의 취득을 위한 효율적인 방법으로 원격탐사 기법을 이용한 수목 모델링에 관한 연구의 필요성이 높아지고 있다. 여기서 수목 모델링이란 산림에 관련된 정보인 수목의 위치, 높이, 넓이, 개체 수 등 수목의 주요정보를 취득하는 것을 말한다.

이전부터 원격탐사 분야에서 수목 모델링에 관한 연구는 다양한 방법으로 이루어졌다. 위성영상의 특정 밴드의 화소값에 국부적 최대값 필터(Local Maximum Filter)를 적용하여 수목의 중심점을 추정하는 연구가 진행되었다(Wulder *et al.*, 2000). Persson(2002)과 Brandtberg(2003)은 높은 점밀도의 LiDAR (Light Detection And Ranging) 데이터를 이용하여 개체목을 추정하였으며, Soderman(2004)은 도시의 수목과 비수목 지역의 3차원 모델을 생성하였다. 수목 경계의 지름과 줄기 지름과의 상관관계를 이용하여 줄기 지름을 추정한 연구도 진행되었다(Hyyppä *et al.*, 2001). 하지만 이러한 기존의 연구는 위성영상, 항공사진, LiDAR 데이터 등의 단일 데이터를 사용하였기 때문에 산림지역을 추출하거나 수목 개체 및 수고를 추정하는데 문제점이 발생한다. 따라서 최근에는 광학영상과 LiDAR 데이터를 모두 이용하여 수목모델링을 수행하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. Sorin(2004)은 위성영상으로 산림지역의 수종을 구분하고, 현장자료에서 취득한 수종에 관한 정보와 LiDAR 데이터를 통해 얻은

높이 정보에 따라 크기가 다른 윈도우를 적용하여 수목의 높이를 추정하였다. 또한 항공사진과 LiDAR 데이터를 융합 후 분할기반 분류기법을 이용하여 수목 개체를 구분하고, 국부적 최대값 필터를 이용하여 수목높이를 추정하는 연구도 진행되었다(Juan *et al.*, 2005).

국내의 경우 산림지역이 많은 면적을 차지함에도 불구하고 수목 모델링에 관련된 연구가 미진한 실정이다. 국내에서는 최근 광두안(2005)이 LiDAR 데이터를 이용하여 수고와 지하고를 추정하고, 현장조사 자료와 항공사진을 이용하여 흉고직경, 흉고 단면적, 임분체적, Biomass 등의 산림정보를 추출하였다. 하지만 현장조사를 통해 수집한 자료가 차지하는 비중이 높고, LiDAR 데이터를 이용한 수고, 지하고 추정 of 경우 LiDAR 데이터의 멀티리턴(Multi-Return)을 이용하여 구성한 각각의 TIN (Triangulated Irregular Network)에서 수목의 위치에 해당되는 좌표의 높이치를 이용하였다. 또한 항공사진은 수목지역의 넓이 추출에 사용되었다. 이는 LiDAR 데이터와 광학영상을 모두 사용하여 개체별로 수목 모델링을 수행하는 국외의 기술에 비교하여 현장조사를 통해 수목의 실제위치를 알지 못하면 LiDAR 데이터를 통해 수고, 지하고를 추정할 수 없고, 개체별 수목모델링을 수행할 수 없다는 한계점이 있다.

국외의 넓은 면적과 단일 수종으로 이루어진 오래된 산림지역과는 달리 국내 산림지역은 단일 수종이 아닌 혼합림 지역이 많고, 인공조림이 이루어짐에 따라 수종이 조밀하다. 또한 국내의 수종, 토양, 지형, 기후 등 산림에 영향을 미치는 인자가 국외와는 크게 다르다. 따라서 본 연구에서는 최근 진행되고 있는 국외 수목모델링의 최신 기술들을 조합하여 국내 산림지역을 대상으로 수목 모델링의 평가를 수행하고자 한다.

본 연구는 컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용하여 수목지역을 추출하고, LiDAR 데이터의 높이정보를 이용하여 수목의 개체 추출 및 높이를 추정하였으며 현장조사 자료를 바탕으로 정확도 평가를 수행하였다. 이와 같은 방법은 광학영상과 LiDAR 데이터를 통해 산림지역의 수목정보를 추정함으로써, 기존의 현장조사 방법보다 효율적인 산림정보 취득을 가능하게 해 준다. 또한 이러한 작업을 통해 흉고직경, 임분의 체적, Biomass 등의 추가적인 산림정보를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구 지역 및 영상

본 연구의 대상지역은 대전광역시의 중구와 서구 지역에 위치한 소규모 산림지역이다. 연구 지역은 주로 소나무류의 침엽수로 이루어졌으나 지역에 따라 툼리나무, 상수리나무 등의 활엽수가 함께 존재하는 혼합림이 존재하였고, 현장조사 결과 최근 새로운 수목으로 인공조림이 진행된 지역도 있었다. 대상지역의 컬러항공사진 및 LiDAR 데이터는 동시에 취득되었으며(Fig. 1, 2), 데이터의 계원은 Table 1과 같다.

대전지역 중 수목 모델링이 용이한 장소(Site) 4곳(Fig. 1)을 선정하였고, 수목 모델링을 수행한 4군데 장소에서 총 8개의 테스트 지역(Plot)을 설정하여 정확도 평가를 수행하였다. 정확도 평가를 위한 현장조사 자료

를 얻기 위해 테스트 지역을 정사각형의 조사구로 하여 단순림 형태의 산림지역의 정보를 수집하였다. 조사구의 크기는 10m×10m를 기본으로 하였으며 현장조건에 따라 20m×20m 크기로 조사한 곳도 있었다. 조사구 내에 존재하는 수목의 개체수와 수고를 측정하여 본 연구에서 추정한 개체수와 수고의 정확도를 검증하였다. 그리고 LiDAR 데이터의 취득 시기가 활엽수가 제대로 측정되지 않는 시기임을 감안하여 침엽수만을 대상으로 정확도 평가를 실시하였다. 테스트 지역별 현장조사 자료는 Table 2와 같다.

Table 1. Data specification.

	항공사진	LiDAR
취 득 일	2005년 4월 26일	
해상도 및 점밀도	0.25 m	4.76 p/m <sup>2</sup>
밴드 정보	3개(R, G, B)	1개(Height)

Table 2. Field measurement data.

ID	크 기	개체수	수고 평균(m)
1	10m×10m	17	9.28
2	10m×10m	13	11.58
3	20m×20m	30	10.96
4	10m×10m	12	7.20
5	10m×10m	14	7.79
6	10m×10m	22	11.47
7	10m×10m	20	12.20
8	10m×10m	29	9.78

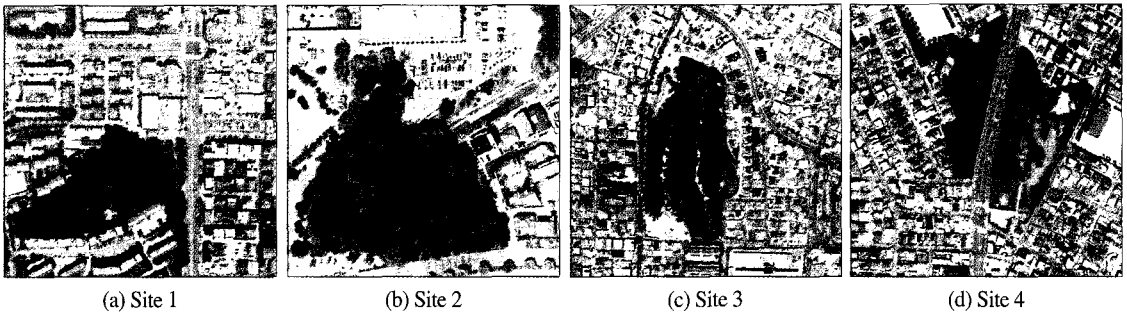


Fig. 1. Color aerial photograph.

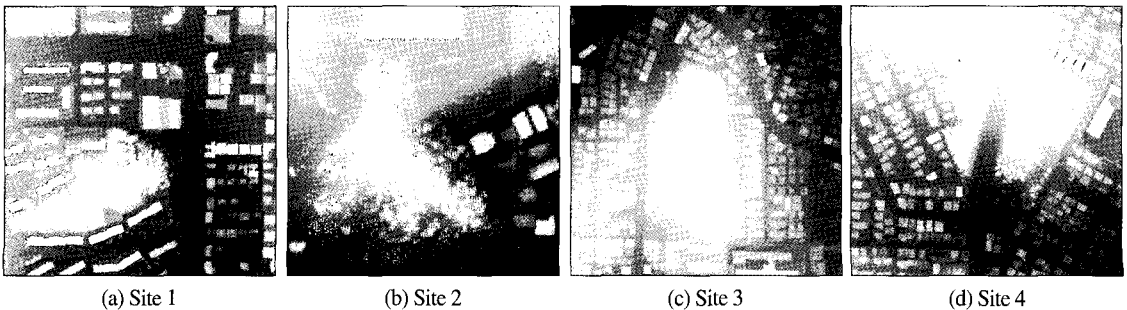


Fig. 2. LiDAR Data.

### 3. 연구방법

본 연구에서는 기본적으로 항공사진에 K-Means 알고리즘을 적용해 수목예상 지역을 결정한 뒤 LiDAR 데이터를 이용하여 생성한 NDSM(Normalized Digital Surface Model)을 이용하여 일차적으로 수목지역을 추출한다. 추출된 수목지역은 다시 수목의 넓이, 이심률, 높이의 편차 등을 이용하여 오분류된 부분을 제거한 뒤 단일개체 집단과 군집개체 집단으로 나누어 유역분할(Watershed Segmentation) 알고리즘을 이용하여 수목개체를 결정하였다. 결정된 개체에 국부적 최대값 필터를 적용하여 수목 모델링을 완료한다. 추정된 수목 인자들은 현장조사 자료와 비교하여 정확도를 평가하였다.

#### 1) 수목 예상지역 추출

컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용하여 수목지역을 추출한다. 먼저 컬러항공사진에 K-Means 알고리즘을 적용하여 분류를 수행한다. 본 실험에서는 총 15개의 클래스로 영상을 분류하였고, 지역에 따라 2~3개의 클래스가 수목지역으로 예상되었다.

LiDAR 데이터의 3차원 높이 정보를 이용하여 DSM(Digital Surface Model)과 DTM(Digital Terrain Model)을 생성한다. DSM의 경우 포인트 기반의 X, Y, Z 좌표로 되어 있는 LiDAR 데이터를 격자로 변환하였다. 이때 LiDAR 데이터의 포인트가 충분히 밀집되어 있고, 수목의 임관 형태는 완만한 표면으로 나타나기 때문에, 주변의 가까운 점으로부터 선형으로 결합된 가중치를 사용하여 새로운 셀의 값을 결정하는 보간방법인 IDW(Inverse Distance Weight) 알고리즘을 적용하였다. 격자의 크기는 항공사진의 해상도와 동일한 0.25m로 생성하였다. DSM에 모폴리지의 오프닝 연산을 적용하여 DTM을 생성한다. 본 연구에서 생성하는 DTM은 도심지의 건물이나 인공 구조물이 모두 제거될 필요가 없고, 필터의 크기가 커질수록 오차가 발생하기 때문에 산림지역의 수목이 제거되는 크기로 결정하였다. 따라서 산림지역의 모폴로지 필터는 반복적인 실험을 통해 반지름 9m의 원형으로 결정하였다(Fig. 4). NDSM(Normalized Digital Surface Model)은 앞에서 생성된 DSM과 DTM의 차를 통하여 얻어지며, 지면 높이가 제거된 지상물의 높이를 나타낸다(Fig. 5).

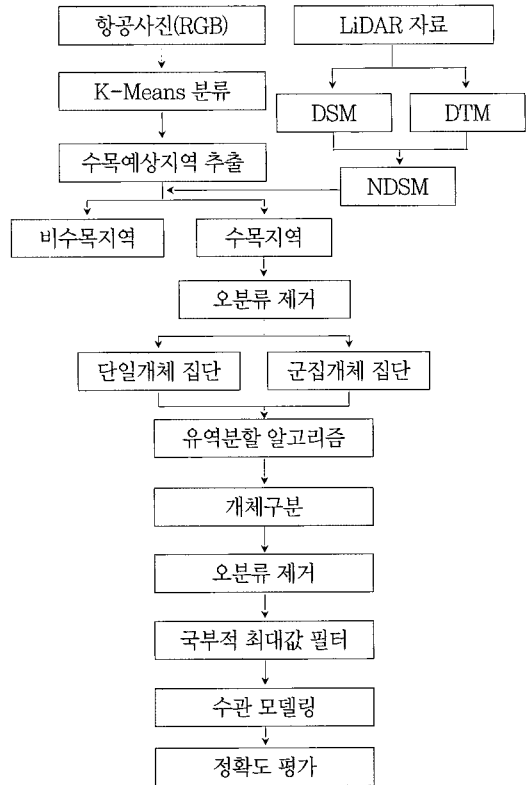


Fig. 3. Flow chart of tree modeling using LiDAR data and color aerial photograph.

컬러항공사진을 분류하여 선정한 지역과 LiDAR 데이터로부터 생성한 NDSM의 높이값을 이용하여 수목예상지역을 추출한다. 높이조건을 이용하여 높이가 높은 인공물과 지면, 초지, 관목 등을 제거하고 관심대상인 수목지역만을 추출하게 된다(Fig. 6).

#### 2) 오분류 제거

컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용하여 일차적으로 수목지역을 추출하였지만 수목과 비슷한 특성(높이, 분광특성 등)을 나타내고 있는 주변 지형물, 인공물 등이 수목지역으로 오분류되어 있다. 이러한 오분류 지역은 단순히 임계치를 적용하는 방법으로는 제거하기 어렵기 때문에 개체에 따른 기하학적인 정보를 가지고 오분류를 제거하기로 한다. 먼저, 수목 예상지역으로 추출된 결과를 레이블링(Labeling)하고 넓이를 이용하여 단일 수목의 크기 이하 개체를 제거한다. 넓이를 통하여 작은 개체와 기존에 제거되지 않은 관목, 낮은 높이의

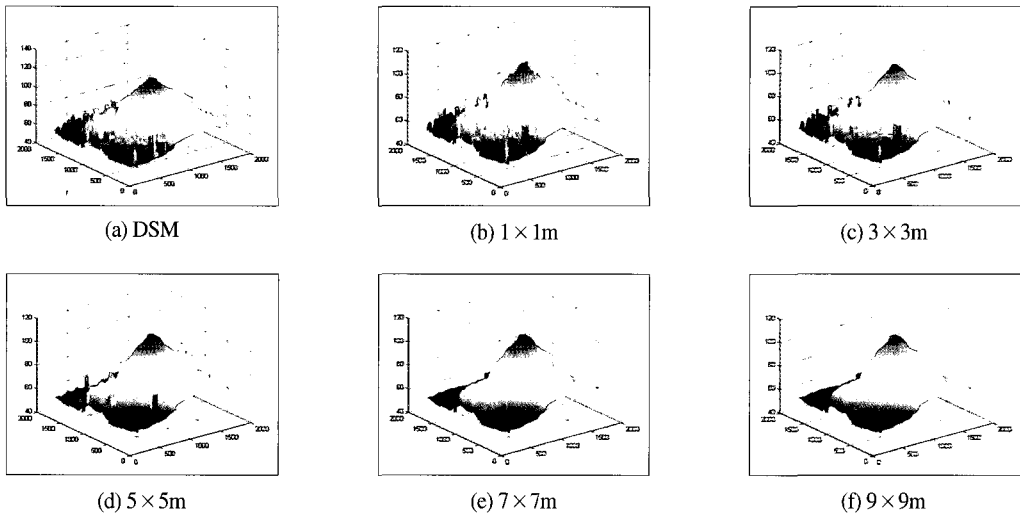


Fig. 4. Morphology filtering process by opening operation using variable mask sizes. Example obtained from site 3.

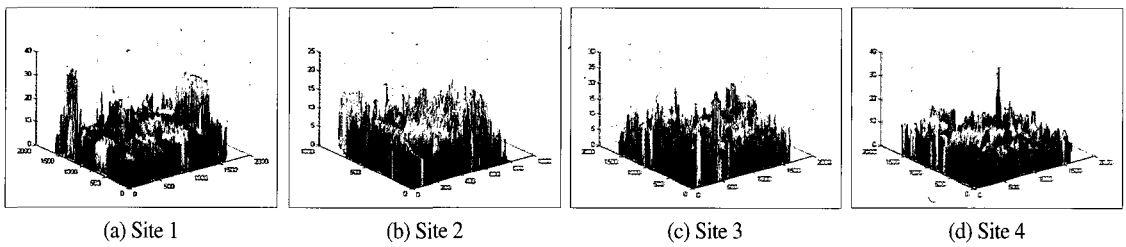


Fig. 5. NDSM (Normalized Digital Surface Model).

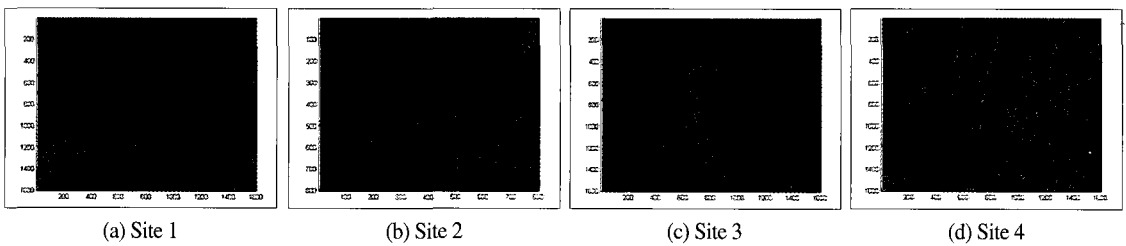


Fig. 6. Presumptive forest region extracted initially.

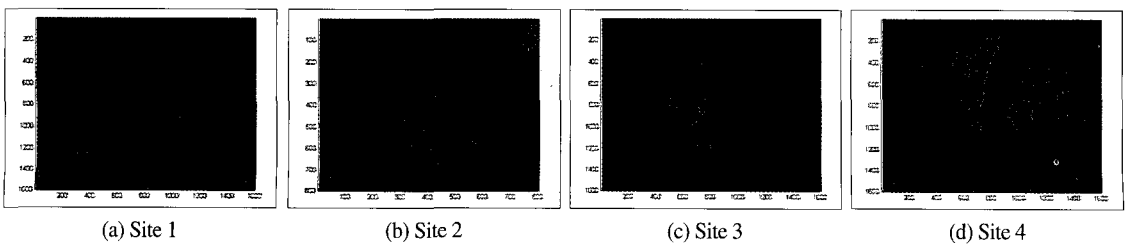


Fig. 7. Presumptive forest region eliminated error finally.

구조물 등을 제거할 수 있다. 넓이로 제거되지 않는 개체는 개체가 포함하는 화소의 NDSM 값의 표준편차와 개체의 이심률을 산출하여 판단할 수 있다. 자동차, 공터 등의 경우 포함된 화소의 NDSM 값이 비교적 일정하므로 표준편차를 이용하여 제거할 수 있다. 또한 수목의 형태는 대부분 원의 형태를 나타내므로 그림자나 건물의 일부분의 경우 이심률을 이용하여 제거할 수 있다 (Fig. 7).

### 3) 개체 분할

추출된 수목지역을 LiDAR 데이터를 이용하여 개체별 분할을 수행한다. 수목지역을 넓이에 따라 단일개체 집단과 군락개체집단으로 나누고 각각의 집단에 대해 개체분할을 수행한다. 단일개체집단의 경우 모든 개체가 하나의 수목을 나타내는 것이 아니라 소수의 수목 개체가 근접해 있는 경우도 존재한다.

각 개체는 유역분할 알고리즘을 통해 분할한다. 유역(Watershed)은 지리학에서 서로 다른 강의 지류들에 의해 배수되는 영역들을 나누는 능선이다. 집수 지역(Catchment Basin)은 물을 강이나 저수지로 흘려보내는 지리학적 영역이다. 유역분할 알고리즘이란 이 아이디어를 명암단계(Gray-Scale) 영상에 적용한 것이다. 그레이-스케일 영상의 화소값을 높이로 해석하여 위상학적 표면으로 생각한다면, 빗방울이 3차원 표면에 떨어졌을 때 집수지역으로 모이게 된다. 이때 2곳 이상의 집수 지역으로 모일 확률이 같은 곳이 능선이 된다. 이러한 집수지역과 능선을 찾아 각 지역을 분할하는 것을 유역분할 알고리즘이라 한다. 유역분할 알고리즘에는 각 화소간의 거리를 이용하는 방법과 기울기 크기를 이용하는 방법이 있다. 본 논문에서는 LiDAR 데이터를 3차원 표면으로 하여 유역분할 알고리즘을 통해 개체분할을 수행하였다.

### 4) 국부적 최대값 필터를 이용한 수목 모델링

유역분할 알고리즘을 통하여 확정된 각각의 개체 내에 존재하는 화소들의 높이 값에 국부적 최대값 필터를 적용하여 수목의 개체별 중심점을 추출하였다. 중심점 추출을 통해 개체수, 수목의 위치, 수고를 추정할 수 있다. 수목 모델링을 통하여 추정된 수목의 개체수와 수고는 현장조사 자료를 통하여 정확도 검증을 수행하였다.

## 4. 정확도 평가

### 1) 개체수 도출

개체수 검정의 경우 현장조사를 통해 얻은 테스트 지역의 자료와 실험영상에서 테스트 지역의 크기에 해당되는 지역을 선정하여 내부에 존재하는 수목 중심점의 수를 비교하였다. 현지 사정상 2번 테스트 지역 이외의 모든 테스트 지역의 크기가 10m×10m이고, 2번 테스트 지역의 크기는 20m×20m 이다. 테스트 지역의 넓이가 다르기 때문에 단위면적당 개체수를 계산하여 현지조사 자료와 비교해본 결과 R<sup>2</sup>값이 0.47로 산출되었고, 대부분의 테스트 지역에서 추정 개체수보다 실제로 측정된 개체수가 많았다.

이는 하나의 개체에서 2점 이상의 중심점이 존재하였고, 항공사진과 LiDAR 데이터를 이용하여 수목지역을 추출하여 오분류를 제거하는 과정에서 오차가 발생한 것으로 생각된다. 또한, 현장조사 결과 수목이 굉장히 조밀하게 조림되어 있어 실제 항공사진 촬영시 상공에서는 보이지 않는 개체들이 다수 포함되어 있었다. 테스

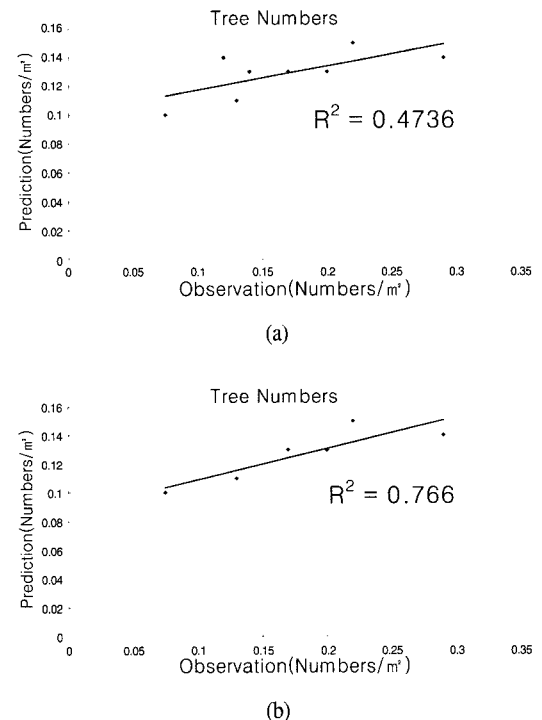


Fig. 8. Tree numbers regression analysis.

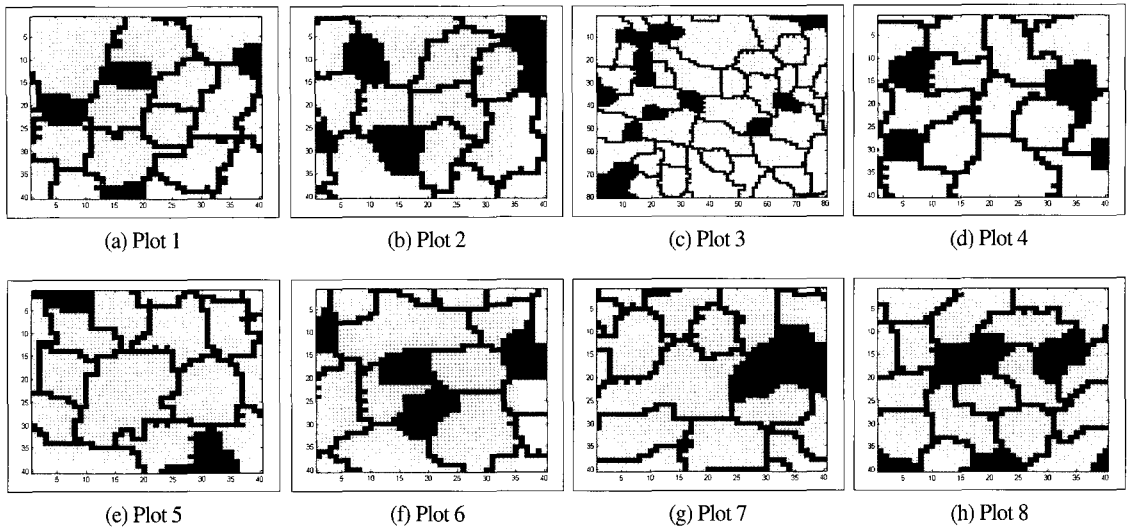


Fig. 9. Plots of accuracy test.

트 지역 3번의 경우 침엽수만을 대상으로 하기위해 현장조사 자료에서 활엽수의 개체수를 제외한 것과 4번과 5번 테스트 지역의 경우 최근 인공조림으로 인하여 수목의 분포가 변화되어 오차가 발생한 것으로 생각된다.

수목 분포의 변화가 가장 심한 3번과 4번 테스트 지역을 제외하면 R<sup>2</sup>값이 0.77로 높게 산출된다. 즉 최근 변화되지 않는 수목지역인 경우 추정값과 실제 측정값이 높은 상관도를 보인다고 볼 수 있다(Fig. 8).

## 2) 수고 도출 평가

LiDAR 데이터로부터 취득된 개체의 높이정보에 국부적 최대값 필터를 적용하여 해당 개체의 수고를 도출하였다. 정확도 평가는 크게 수고 추정치와 측정치를 테스트 지역 전체 집단을 비교하는 집단 정확도 평가와 수목 개체별 수고를 비교하는 개별 정확도 평가로 나누어 검정하였다.

집단 정확도 평가의 경우 테스트 지역의 수목 높이를 실제 현장조사를 통한 실측수고집단과 실험을 통해 추정된 추정수고집단으로 나누어 두 집단에 대해 T-test를 수행하였다. 3, 4, 5번 지역의 경우 활엽수가 포함되어있는 혼합림 이거나 최근 산림이 변화된 지역이기 때문에 두 집단이 유의하지 않게 나타난 것으로 추정되어 정확도 평가에서 제외시켰다. T-test를 수행한 결과 8곳의 테스트 지역 중 3, 4, 5번 테스트 지역을 제외한 5곳은 5% 유의수준 내에서 추정치와 측정치 사이에 차이

Table 3. T-test result of group tree height.

ID	T-value	P(T ≤  t )	비 고
1	-1.164	0.26	
2	0.743	0.47	
3	3.745	0.0003	제 외
4	-5.098	0.00009	제 외
5	-3.997	0.0008	제 외
6	-0.379	0.71	
7	-1.095	0.32	
8	0.127	0.90	

가 없는 것으로 산출되었다(Table 3).

개별 정확도 평가에서는 수고의 추정값과 실제 측정값의 R<sup>2</sup>값이 0.83으로 산출되었다. LiDAR 데이터의 포인트가 수목의 최고점에 반사되지 않은 것과 자료의 형태가 포인트 기반인 LiDAR 데이터를 격자로 변환할

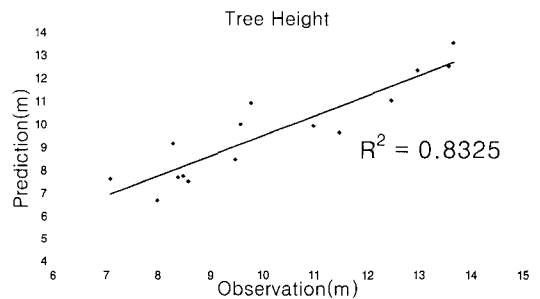


Fig. 10. Individual tree height regression analysis.

때 생기는 오차가 존재한다고 볼 수 있다. 하지만 본 연구에서 정확도 평가를 위해 사용된 수고 측정도구인 하그로프 수고측정기(Haglof Hypsometer)의 경우 여러 요인으로 인한 측정오차가 1~2m 정도 발생하기 때문에 이러한 점을 감안하면 수고 추정치와 실측값이 높은 상관도를 보인다고 할 수 있다(Fig. 10).

### 5. 결론

국내의 경우 수목 모델링에 관련된 연구가 부족한 실정이다. 이에 반해 국외에서는 다양한 수목모델링이 진행되고 있다. 국내의 경우 국외와는 산림에 관련된 여러 조건들이 다르기 때문에 국내 실정에서도 이들 수목모델링이 유효한가에 관한 정보가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국외의 최신 수목모델링 기술을 조합하여 국내의 산림지역에 적용, 그 효용성을 평가해 보았다.

본 연구를 통해 LiDAR 데이터와 컬러항공사진을 이용하여 기존의 광학영상만을 통해 쉽게 추정할 수 없었던 수고, 개체수 등을 보다 효율적이고, 정확하게 산출할 수 있었다. 이는 단일 데이터를 이용한 경우보다 이종 데이터를 통한 수목 모델링이 보다 정확하고 많은 양의 정보를 추출할 수 있는 가능성을 보여주는 것이다.

인공조림 등의 변화가 없는 산림지역의 경우 수목의 개체수 추정은 R<sup>2</sup>값이 0.77로 높게 산출되었다. 수고의 정확도 평가에서는 집단 비교의 경우 T-test 결과 혼합림이거나 최근 변화되지 않은 산림지역은 추정치와 실측치의 차이가 없는 것으로 산출되었고, 개별 비교 결과는 R<sup>2</sup>값이 0.83으로 추정값과 실측값이 서로 높은 상관도를 보였다. LiDAR 데이터 취득 시기상 활엽수가 포함된 지역과 최근 인공조림으로 인해 산림구성이 바뀐 지역은 정확도 평가에서 제외시켰다.

그러나 실험 결과 수목지역 추출과정과 수목의 개체를 분할하는 과정에서 오차가 발생하였다. NDSM을 생성할 때 발생하는 오차와 포인트 기반의 LiDAR 데이터를 격자화하는 과정에서 발생하는 오차도 무시할 수 없을 것으로 보인다. 또한 데이터를 취득한 시기상의 문제와 현장조사 자료를 수집하는 시기 등의 문제도 존재하였다.

추후 연구에서는 LiDAR 데이터의 처리 방법 및 수목

지역 추출 방법을 보완해야 할 것으로 보인다. 또한 추정된 수고와 개체수를 기반으로 흉고직경, 흉고 단면적, 임분 체적, Biomass 등의 추정에 관한 연구도 필요할 것이며 이를 통해 국내 산림의 탄소수지를 정량적으로 산출할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

곽두안, 이우균, 손민호, 2005. 개체목 및 임분조사를 위한 LiDAR 응용에 관한 연구, 한국임학회지, 94(6): 431-440.

Andersen, H., S. E. Reutebuch, and G. F. Schreuder, 2001. Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LIDAR-Based Canopy Surface Model, Proc. of The First International Precision Forstry Cooperative Symposium, Seattle, WA, Jun. 17-20, 2001. Vol.1, 11-22.

Bleau, A. and L. J. Leon, 2000. Watershed-Based Segmentation and Region Merging, *Computer Vision and Image Understanding*, 77(3): 317-370.

Brandtberg, T., T. A. Warner, R. E. Landenberger, and J. B. McGraw, 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forests in north america, *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 290-303.

Hyypä, J., O. Kelle, M. Lehtikainen, and M. Inkinen, 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5): 969-975.

Nilsson, M., 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system, *Remote Sensing of Environment*, 56(1): 1-7.

Persson, A., J. Holmgren., and U. Soderman, 2002.



- Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(9): 925-932.
- Schardt, M., M. Ziegler, A. Wimmer, R. Wack, and J. Hyypä, 2002. Assessment of forest parameters by means of laser scanning, Proc. of the ISPRS Technical Commission III Symposium 2002, Graz, Austria, Sep. 9-13, 2002. Vol. A, 302 ff.
- Söderman, U., S. Ahlberg, M. Elmqvist, and A. Persson, 2004. Three-dimensional environment models from airborne laser radar data, Proc. of SPIE Defense Security Symposium Vol. 5412: Laser Radar Technology and Applications IX, Orlando, FL, Apr. 12, 2004. Vol. 5412, 333-344.
- Sorin, C. P., and R. H. Wynne, 2004. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(5): 589-604.
- Suarez, J. C., C. Ontiveros, S. Smith, and S. Snape, 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry, *Computers & Geosciences*, 31: 253-262.
- Wulder, M., K. O. Niemann, and D. G. Goodenough, 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery, *Remote Sensing of Environment*, 73(1): 103-114.
- Zimble, D. A., D. L. Evans, G. C. Carlson, R. C. Parker, S. C. Grado, and P. D. Gerard, 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR, *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3): 171-182.

