

# 항공 LiDAR 데이터를 이용한 산림의 이산화탄소 고정량 추정

## Estimation of Carbon Dioxide Stocks in Forest Using Airborne LiDAR Data

이상진<sup>1)</sup> · 최윤수<sup>2)</sup> · 윤하수<sup>3)</sup>  
Lee, Sang Jin · Choi, Yun Soo · Yoon, Ha Su

### Abstract

This paper aims to estimate the carbon dioxide stocks in forests using airborne LiDAR data with a density of approximate 4.4 points per meter square. To achieve this goal, a processing chain consisting of bare earth Digital Terrain Model(DTM) extraction and individual tree top detection has been developed. As results of this experiment, the reliable DTM with type-II errors of 3.32% and tree positions with overall accuracy of 66.26% were extracted in the study area. The total estimated carbon dioxide stocks in the study area using extracted 3-D forests structures well suited with the traditional method by field measurements upto 7.2% error level. This results showed that LiDAR technology is highly valuable for replacing the existing forest resources inventory.

Keywords : LiDAR Filtering, Digital terrain modeling, Individual tree detection, Biomass, Carbon dioxide stocks

### 초 록

본 논문은 Pulsed LiDAR 시스템에 의해 취득된 고밀도 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 산림의 이산화탄소 고정량의 객관적이고 과학적인 추정을 목적으로 한다. 이를 위해, 산림지형의 라이다 필터링, 효율적인 개개목 탐지 알고리즘을 통해 취득된 수목의 성장인자를 이용하여 바이오매스 및 이산화탄소 고정량을 추정하는 일련의 방법을 개선하고 통합하여 연구대상지에 적용하였다. 그 결과, 추출된 연구대상지의 DTM은 3.32%의 Type- II 에러를 가진 것으로 나타났고, 개개목 탐지 알고리즘에 의해 식별된 개개목 위치 및 개체수 추정결과는 66.26%의 정확도를 나타냈다. 이와 같은 3차원 산림구조를 이용하여 산출된 연구대상지의 이산화탄소 고정량은 연구대상지의 약 15%에 이르는 면적을 현장조사하여 산출된 이산화탄소 고정량과 비교해 볼 때 약 7.2%의 차이를 나타냈다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 항공 LiDAR 기술이 전통적인 산림조사방법을 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다.

핵심어 : 라이다 필터링, 수치지형모델링, 개개수목 탐지, 바이오매스, 이산화탄소 고정량

## 1. 서 론

지난 20세기 동안 급증한 화석연료의 사용은 이산화탄소와 같은 온실가스의 지속적인 증가로 이어져 지구온난화의 주요 원인으로 분석되고 있다. 이러한 지구온난화에 대응하기 위한 노력이 필요하다는 인식이 확산됨에 따라 1992년 UN환경회의에서 기후변화협약이 채택되어 1994년 발효되었고, 이어 교토의정서, 마라케쉬합의문에서 산림

이 지구전체의 탄소배출을 완화하는데 중요한 자원임을 확인하였고, 산림흡수원을 탄소배출권으로 인정하였다.

앞으로 우리나라가 온실가스 의무 감축국이 될 경우 온실가스의 흡수·배출 통계 및 정책 전반에 대한 국가보고서를 의무적으로 제출해야 하며 국제기준에 부합하는 국가 온실가스 배출통계 시스템을 구축하는 것은 산림부문 기후변화 관련 협상 및 정책을 과학적으로 뒷받침하기 위해 매우 중요하다(손영모 외, 2007).

1) 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 석사(E-mail:lsj@uos.ac.kr)  
2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 정교수(E-mail:choiys@uos.ac.kr)  
3) 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 박사수료(E-mail:hasu9@uos.ac.kr)

현재 우리나라가 IPCC에 제출하는 국가보고서는 전국 산림자원조사를 토대로 작성되는데 이 조사는 10년 주기로 매년 1개 시·도에 대한 4km 격자의 표본현지조사를 실시하는 체계이다. 하지만 이러한 방법은 매우 노동집약적이고 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라 각 표본조사구별로 투입된 조사원의 주관적인 판단이 포함되어 오차가 발생할 가능성이 크다. 또한 동일한 시간단위의 이산화탄소 집계현황을 작성하기 어렵고, 산지를 지역별, 소유자별로 세분화하여 계산할 경우 이산화탄소 고정량이 중복 계산 혹은 누락될 수 있다.

항공 LiDAR는 지형의 수직적 구조를 측정할 수 있는 원격탐사기술 중 하나로서 지형고도자료를 제작하는데 있어 사진측량, 레이더간섭기법과 비교해 볼 때 가장 높은 정확도를 나타낸다(Baltsavias, 1999; Hyypä et al., 2000; Hese et al., 2000). 이러한 LiDAR의 수직정확도가 널리 알려지면서 1980년대 초반 이를 이용한 임분고, 체적 그리고 바이오매스 추정에 대한 관심이 고조되었고(Schreier et al., 1985; Aldred et al., 1985), 곧이어 산림체적 예측모델에서 높은 상관계수( $0.72 \leq R^2 \leq 0.89$ )를 도출하였다(MacLean et al., 1986). 현재 LiDAR 시스템의 점밀도는 각 입목의 수고 추정을 가능하게끔 하며(St-Onge et al., 1999; Lim et al., 2001; Persson et al., 2002), 뿐만 아니라 임분고와 체적, 특히 바이오매스 추정과 줄기의 수직적 분포에 관한 많은 연구가 진행되었다(Lefsky et al., 1999). Clark(2004)는 LiDAR 데이터를 기반으로 DSM과 DTM을 제작하고 두 데이터의 높이차를 이용하여 수고를 측정하였다. 또한 LiDAR 데이터로부터 도출된 수고와 현지조사로부터 얻어진 흉고직경의 관계식을 이용하여 기존의 LiDAR 데이터만으로는 한계가 있었던 흉고직경을 추정하였다(Means et al., 1999; Nilson et al., 1996). 수목의 성장인자 가운데 수관폭은 현장에서 직접 조사할 수 있지만 지형적인 영향이 너무 커 오차를 하기 쉽고 하층식생으로 인해 측정하기 곤란한 경우가 많다. 이러한 조사의 문제점을 해결하기 위해 Persson(2002)는 수관고모델(CHM, Canopy Height Model)을 제작하고 가우시안 필터를 이용하여 수관을 스무딩 한 후 수관폭을 측정하였고, Holmgren(2003)은 CHM을 2차원 평면으로 제작한 후 수관을 분할하여 수관폭을 측정하였다. 하지만 이러한 연구들에서는 산림생장인자를 추출하는데 있어서 지형의 특성에 따라 필터링 결과가 다르게 나타날 수 있다는 점을 고려하지 않고, 여러 사용소프트웨어의 필터링 모듈을 사용함으로써 나타나는 결과의 설명이 없었다. 또한 기존의 개개목 추출을

위해 사용되는 유역분할 방식을 입목밀도가 높은 지역에 적용하게 되면 과다/과소분할이 상당수 발생할 뿐만 아니라 선택되는 변수에 의존하기 때문에 결과의 신뢰도가 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 이러한 LiDAR 기술의 장점을 이용하여 산림생장인자를 추출하는 방법에 있어서 각 단계별로 다양한 알고리즘을 실험해보고 그 중 최적의 결과를 나타낸 방법을 적용하여 수목 성장인자 추출의 정확도 향상을 이루고자 하였으며, 추출된 수목 성장인자를 이용하여 IPCC 우수실행지침(GPG)의 방법론을 융합하여 이산화탄소 고정량을 추정해 보고자 한다.

## 2. 연구범위

### 2.1 연구대상지

연구대상지는 경기도 포천시 소흘읍에 위치한 국립수목원 내의 침엽수원 일대로서, 연구대상지의 주요수종은 약 90년생 전나무로 이루어져있어, LiDAR 데이터의 취득 시기와 현지조사시기 간에 수목의 생장은 거의 이루어지지 않았을 것으로 판단된다. 본 연구대상지는 지속적인 산림경영활동이 이루어졌기 때문에 교토의정서에서 정의한 탄소배출권을 인정하는 산림에 부합하는 지역이다. 연구대상지의 지리적 범위는 위도  $37^{\circ} 44' 52.87'' \sim 37^{\circ} 44' 56.77''$ , 경도  $127^{\circ} 9' 39.41'' \sim 127^{\circ} 9' 50.74''$ (WGS84 타원체 기준)에 해당되며, 표고는 약 107.7m~138.9m(타원체고 기준) 사이에 분포한다(그림 1).

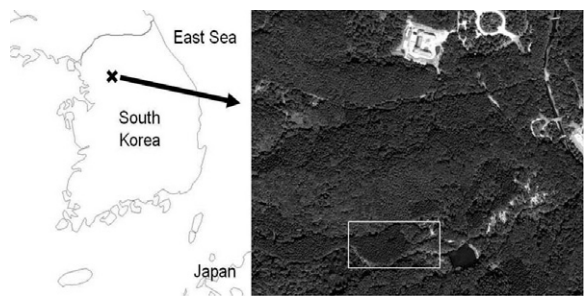


그림 1. 연구대상지

### 2.2 사용데이터 개요

실험에 사용된 LiDAR 데이터는 Optech사의 ALTM 30/70 시스템에 의해 취득되었으며, 상세한 데이터 명세는 아래 표 1과 같다.

표 1. LiDAR 데이터 명세

반사펄스	FR	148,142 pts
	LR	148,065 pts
	UR	8,060 pts
점밀도	4.4 - 4.4 - 0.24, FR-LR-UR(pts/m <sup>2</sup> )	
취득시기	2007년 4월	
측정고도	약 1,300m	
X 범위	127° 9' 39.41" ~ 127° 9' 50.74"	
Y 범위	37° 44' 52.87" ~ 37° 44' 56.77"	
면적	33,607.368m <sup>2</sup> (약 3.36ha)	

### 2.3 현지측량 및 표본지조사

연구대상지에서 실제 이산화탄소 고정량을 산출할 영역과 20×20m의 표본지 5곳과 표본지내의 수목의 위치를 조사하기 위해 GPS(Trimble 5700)과 TS(Topcon GTS 750)을 이용하여 현지측량을 실시하였고, 수신된 GPS 데이터는 Bernese를 사용하여 처리하였다. 이처리 확정된 경계 내(빛금)의 총 면적은 1.3ha로 나타났다(그림 2).

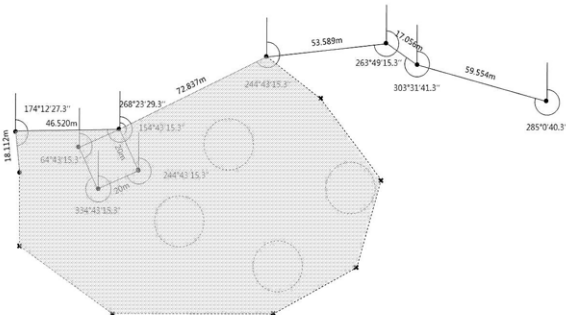


그림 2. 현지측량 결과

표본지조사에서는 표본지 5곳(0.2ha)내에 분포한 전체수목의 수고와 흉고직경(DBH)을 측고기(Suunto)와 직경테이프를 이용하여 조사하였다. 그 결과, 표본지내에 총 114그루의 수목이 분포하였으며, 조사된 수목의 DBH는 최소 23.90cm, 최대 51.80cm, 평균 35.28cm, 표준편차는 6.16cm였고, 수고는 최소 18.3m, 최대 33.4m, 평균 27.07m, 표준편차는 2.79m로 조사되었다.

### 3. 연구방법

이산화탄소 고정량이란 수목이 이산화탄소를 흡수해 산소를 배출하고 수목 내에 유기물로 고정시켜 놓은 양을 의미 하는 것으로서, 이산화탄소 고정량 추정실험에는 상용소프트웨어를 사용하지 않고 Matlab을 이용하여 각 단계 별로 구현된 소스코드형태의 모듈을 이용하여 실험을 수행하였다.

이를 위해 그림 3과 같은 체계로 프로그램 모듈을 구현하였다. 우선, 획득한 데이터를 First Return(FR), Last Return(LR)과 Unique Return(UR)으로 분리한 후 FR과 LR은 각각 DSM과 DTM 제작에 사용되었다. 이후 이를 이용하여 CHM을 생성하고 이로부터 개체목의 위치 및 수고를 추출하였다. 수목의 흉고직경(DBH, Diameter at Breast Height)은 현장조사에서 취득한 수목정보를 이용하여 6개의 DBH-수고 관계식을 유도한 후 그로부터 가장 적합한 관계식을 이용하여 추출된 전체수목의 DBH를 계산하였다. 이와 같이 산출된 수목정보를 이용하여 각 개체목의 체적을 도출한 후 국립산림과학원에서 발표한 바이오매스 평가 방법과 국가고유계수를 적용하여(손영모 외,2007) 최종적으로 연구대상지의 이산화탄소 고정량을 추정하였다.

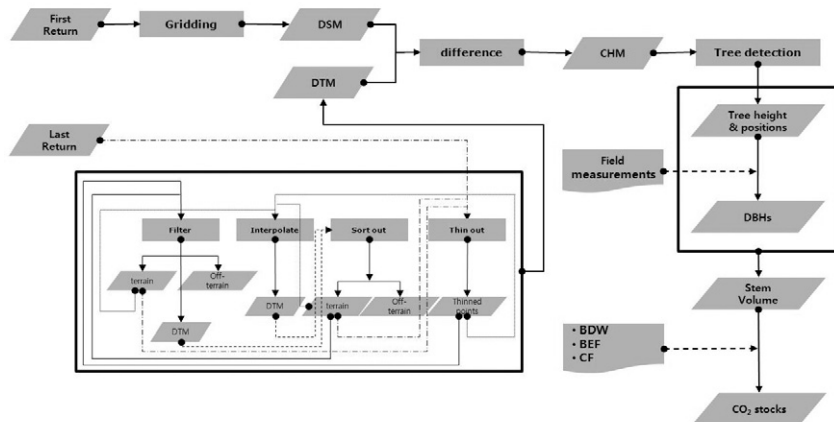


그림 3. 산림의 이산화탄소 고정량 추정 체계

### 3.1 DTM 및 DSM 생성

DTM 생성 이전에, 취득된 데이터로부터 지면점과 비지면점을 추출하는 필터링과정이 선행되어야 한다. 이 과정은 막대한 데이터의 양 때문에 필터링과정은 자동화 된 알고리즘으로 수행되어질 필요가 있다. 현재까지 여러 가지 필터링 알고리즘이 개발되었으나, 지형의 특징이 매우 다양하기 때문에 각 알고리즘 마다 지형특성에 따라 정확도가 다르다. 따라서 지형특성에 맞는 필터링 알고리즘을 적용해야 한다.

지금까지 개발된 여러 라이다 필터링 알고리즘 중에서 Hierarchical robust interpolation 알고리즘이 산림지형에서 가장 좋은 성능을 나타내고 있다(Sithole, G 외, 2003). 따라서 본 연구에서는 LiDAR 데이터를 필터링 하는 데 있어서 Hierarchical robust interpolation 알고리즘을 적용하였다.

Hierarchical robust interpolation은 각 관측점의 가중치를 고려한 선형예측기법을 기반으로 필터링과 동시에 DTM을 점차 세밀화시켜 최종적으로 DTM을 생성하는 방법이다(Kraus et al., 1998). 이 방법은 몇 차례의 단계를 반복하여 DTM을 점차 세밀화하는 coarse to fine 방법으로서 영상처리분야에서 사용하는 영상 피라미드와 유사한 데이터 피라미드를 이용한다. LiDAR 데이터 필터링 수행을 위한 초기 지표면 생성에 사용되는 수식은 아래와 같다.

$$\bar{z}(x, y) = c^T C^{-1} z \quad (1)$$

$$c = (C(PP_1), \dots, C(PP_n))^T \quad (2)$$

$$z = (z_1, \dots, z_n)^T \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} V_{zzp1} & C(P_1, P_2) & \dots & C(P_1, P_n) \\ C(P_1, P_2) & V_{zzp2} & \dots & C(P_1, P_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(P_1, P_n) & C(P_2, P_n) & \dots & V_{zzpn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 사용된 공분산함수는 아래의 수식 과 같으며, 1단계 필터링과정에서는 생성된 데이터 피라미드의 점밀도를 고려하여 수식(5), 나머지 2단계부터는 수식(6)을 사용하였다.

Straight line :

$$C(P_i P_k) = 1 - |(P_i P_k)|/c \quad (5)$$

Bell curve :

$$C(P_i P_k) = 1 / (1 + (P_i P_k)^2 / c^2) \quad (6)$$

여기에서,

$C(0)$  = 거리가 0일때의 공분산

$c$  = 상관관계를 가지는 최대거리

또한, 각 관측점의 가중치를 고려한 분산  $V_{zzpi}$  는 아래 수식(7)과 같다.

$$V_{zzpi} = C(0) + \frac{\sigma_0^2}{w_i} \quad (7)$$

그림 4는 앞서 설명한 Hierarchical robust interpolation을 이용하여 DTM을 생성하는 단계를 나타낸 그림이다.

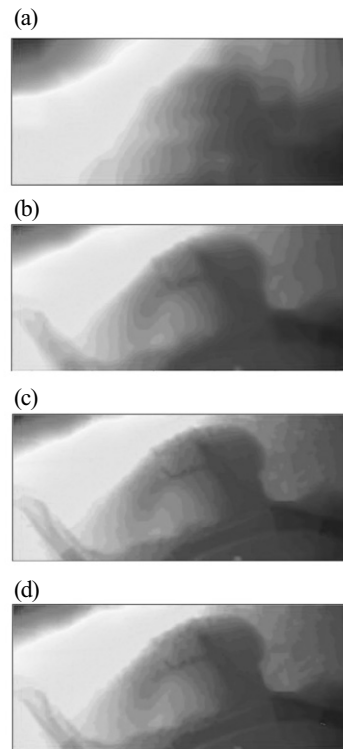


그림 4. 위계적 접근방법을 이용한 DTM 생성과정  
(a):10m해상도, (b):2m해상도, (c):0.5m해상도,  
(d):최종DTM(0.5m해상도)

DSM 생성은 내삽 시 임목의 수관형태를 부드러운 곡선으로 표현하기 위해 1m<sup>2</sup>당 최고점을 추출하여 4.4개/m<sup>2</sup>의 점밀도를 1개/m<sup>2</sup>로 감소시키고, 부드러운 수관의 형태를 표현하기 위해 정규크리깅 기법을 이용하여

DSM을 생성하였다(그림 5).

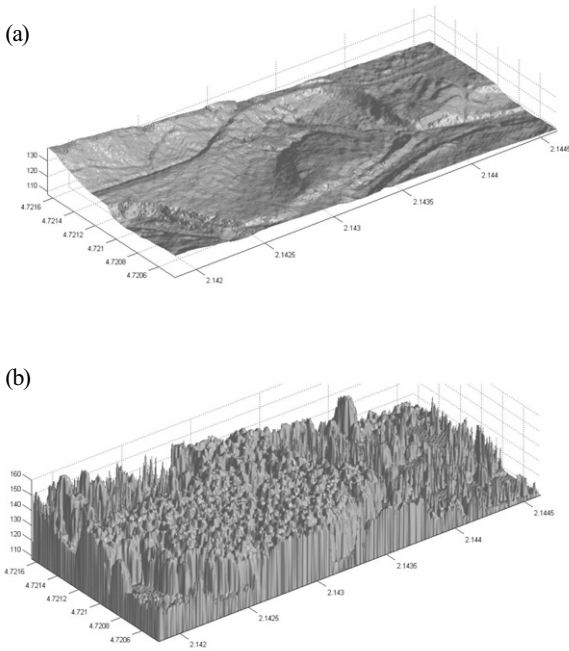


그림 5. 도출된 DTM과 DSM  
(a):DTM, (b):DSM

CHM은 앞서 생성된 DSM과 DTM의 높이차로써 도출할 수 있다(그림 6).

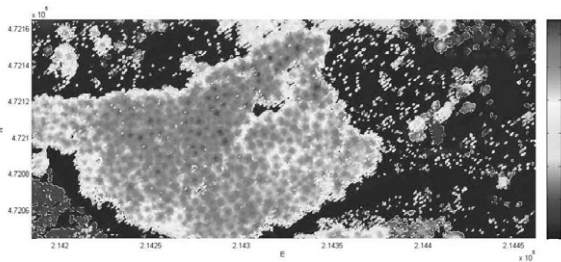


그림 6. 연구대상지의 CHM

### 3.2 개체목의 위치 및 수고 추출

본 연구에서 CHM을 통해 각 개체목의 정보를 추출하는데 있어서 다음과 같은 두 가정을 전제로 하고 있다.

- 하나의 수목은 최대값(peak)을 갖는다.
- 최대값(peak)을 갖는 위치는 줄기의 위치이다.

그림 7은 CHM을 이용한 수고, 위치 등 각 수목의 정보를 추출하는 개념을 나타낸 그림이다.

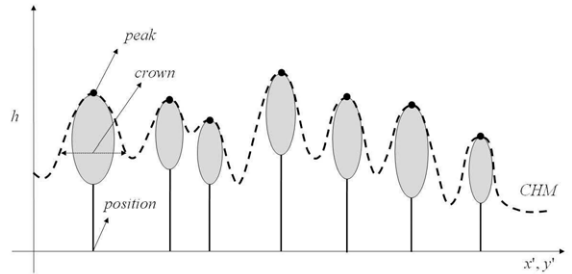


그림 7. CHM을 이용한 수목정보 추출

각 개체목의 위치와 수고는 Local maxima 연산을 CHM 상에 적용시켜 추출하였다. Local maxima 연산은 이진 매트릭스 모양의 구조요소에 의해 결정되는 이웃화소들의 집합에서 최대값이 취해지며 아래와 같이 정의된다(Vincent, 1993; Gonzalez et al., 2004).

$$f \oplus b(x, y) = \max\{f(x - x', y - y') \mid (x', y') \in D_b\} \quad (8)$$

이 연산은 항상 구조요소( $D_b$ )가 정의된 모든 좌표들에서  $b$ 의 값(높이)가 0인 평평한 구조요소를 사용하여 수행된다.

$$b(x', y') = 0 \text{ for } (x', y') \in D_b \quad (9)$$

본 연구에서는 상공에서 바라본 수관의 모양과 수목간의 최소간격을 고려해 그림 8과 같은 원과 비슷한 형태( $5 \times 5$  pixel)의 평평한 구조요소를 적용하였다.

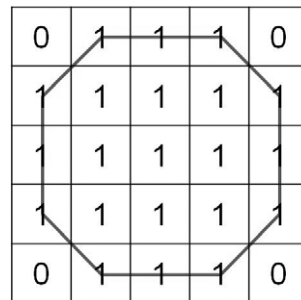


그림 8. 사용된 구조요소

그림 9는 앞서 설정된 구조요소를 이용해 CHM상에서 Local maxima 연산을 수행하고 그레이 영상으로 나타낸 그림이다.

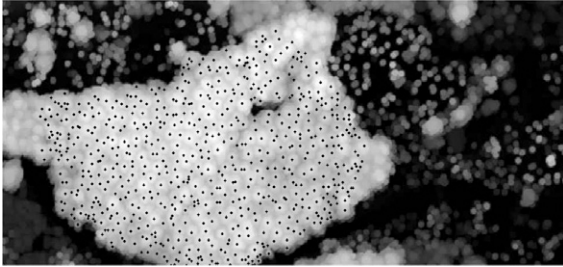


그림 9. 개개목의 위치 및 수고 추출 결과

### 3.3 DBH 추정

DBH는 수목의 재적산출에 있어서 필수적인 변수이다. 하지만 항공 LiDAR 데이터에서 직접적으로 산출하기 어렵다. 따라서 현지조사에서 측정된 수목의 수고와 DBH 정보를 이용하여 아래와 같은 6개의 DBH-수고 관계식을 도출하였다.

$$DBH = a + bH_t \tag{10}$$

$$DBH = a + bH_t + cH_t^2 + dH_t^3 \tag{11}$$

$$DBH = a + bH_t + cH_t^2 \tag{12}$$

$$DBH = 1.3 + bH_t + cH_t^2 \tag{13}$$

$$DBH = a + b/H_t + cH_t \tag{14}$$

$$DBH = 1.3 - bH_t/(H_t + 1) + cH_t \tag{15}$$

그 결과, 수식(12)의 결정계수(R<sup>2</sup>)가 가장 높았기 때문에 이를 이용하여 전체수목의 DBH를 추정하였다(그림 10).

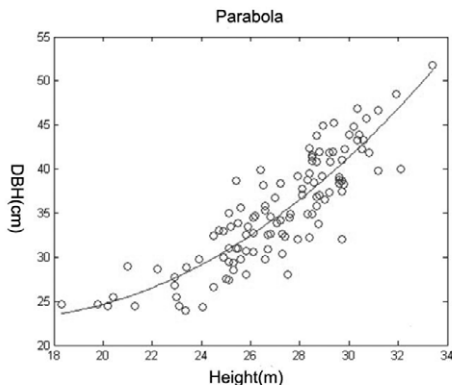


그림 10. DBH-수고 관계식  
( $DBH=a+bH+cH^2$ ,  $a=46.0567$ ,  
 $b=2.8975$ ,  $c=0.0914$ ,  $r^2=0.7574$ )

### 3.4 수목의 줄기재적계산

본 연구에서 수목의 줄기재적(VS, Volume of Stem)을 계산 위해 사용한 방법은 흉고형수법이다. 흉고형수법은 DBH와 같은 지름을 가지며 높이가 같은 원기둥의 부피와 줄기재적과의 관계를 고려한 것으로서, 수식은 아래와 같다(Brouard, 2009).

$$VS(m^3) = \pi/4 \times (DBH)^2 \times H \times ff \tag{16}$$

여기에서, VS 는 줄기재적, ff 는 흉고형수이다.

### 3.5 개체목의 이산화탄소 고정량 산출

현재 우리나라에서는 임상별 바이오매스를 산출하기 위해 목재기본밀도, 지상부/지하부 확장계수(BEF, Biomass Extension Factor)를 이용하여 추정하는데(손영모 외, 2007), IPCC에서는 이를 탄소량으로 변환하기 위해서 탄소변환계수(CF, Carbon Fraction) 0.5를 기본값으로 권장하고 있다. 그리고 변환된 탄소량은 이산화탄소분자내의 탄소원자량 구성비 44/12를 곱해줌으로써 이산화탄소량으로 전환이 가능하다. 아래 그림 11은 그 체계를 나타낸 것이다.

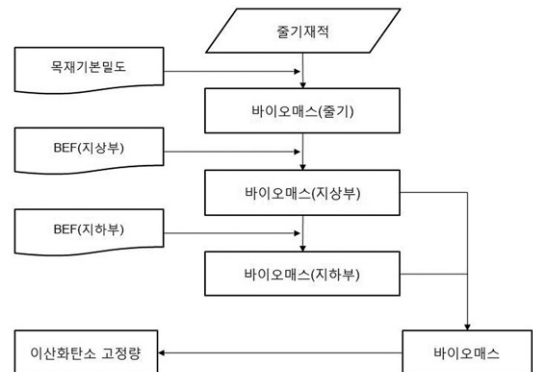


그림 11. 수목의 이산화탄소 고정량 추정체계(손영모 외, 2007)

## 4. 결과 및 정확도 평가

본 연구에서 최종적으로 산출하고자하는 이산화탄소고정량은 추출된 산림생장인자의 정확도와 밀접한 관련이 있다. 하지만 각 단계를 거치면서 추출된 정보에는 오차를 포함하게 되는데, 이러한 오차를 정량화할 필요가 있다.

### 4.1 필터링 알고리즘 평가

수목정보의 정확도와 오류는 필터링의 정확도와 직결

된다. 따라서 본 연구에 적용된 필터링 알고리즘 중대한 오류가 있는지를 판단하기 위해 정량적인 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 적용된 필터링 알고리즘을 평가하기 위해서 ISPRS commission III에서 제공하는 기준데이터 중 산림지역의 데이터를 선택하여 평가를 실시하였다. 그 결과 지면점을 비지면점으로 잘못 분류된 정보를 나타내는 2중 오류가 기준에 발표된 결과와 비교해볼 때 다소 적은 것으로 본 연구에서 구현된 필터링 알고리즘이 필터링 역할을 제대로 수행하고 있는 것으로 판단할 수 있다(표 2).

표 2. 필터링 알고리즘 평가 결과

	2중 오류의 크기	
	Pfeifer(2003)	구현된 알고리즘
Site 5	449pts(3.87%)	408pts(3.32%)

그림 12는 경험적 관계식(Karel, 2006)을 이용하여 추정된 DTM의 수직정확도를 나타내는 그림으로서 각 내삽점의 추정 수직정확도는  $\pm 0 \sim 1.17m$ 로 나타났으며,  $1\sigma$  내에서  $-0.0416m \sim +0.2794m$ 로 나타났다.

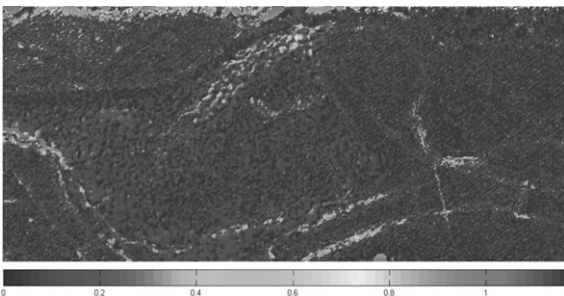


그림 12. 추정된 DTM 수직정확도 오차맵

#### 4.2 개체목 추출 평가

표본지-1 내에서 현지조사와 LiDAR 데이터를 기반으로 추출된 수목의 위치를 나타낸 결과 총 28그루의 수목 중 25개의 수목이 추출되었다

표본지-1내의 각 수목의 수고와 DBH를 추정하여 현지 조사를 통해 측정된 수목정보와 비교한 결과, 평균수고는 0.86m(RMSE : 1.4388), 평균DBH는 1.37cm(RMSE : 6.1542)의 차이가 나타났다. 전체 연구대상지에 대하여 본 연구의 방식으로 추정한 수목의 정보는 표 3과 같다.

표 3. 실험대상지역에서 추정된 수목정보

추출된 수목 본수	692 본	
수고	최소	17.62m
	최대	32.31m
	평균	26.25m
	표준편차	2.79m
흉고직경	최소	13.88cm
	최대	47.84cm
	평균	33.69cm
	표준편차	4.96cm

또한 실험대상전체를 대상으로 추출된 수목의 정확도를 평가하기 위해 항공사진을 통해 육안으로 수관의 중심점을 판독하여 제작한 기준데이터(그림 13)을 통해 비교하였다.

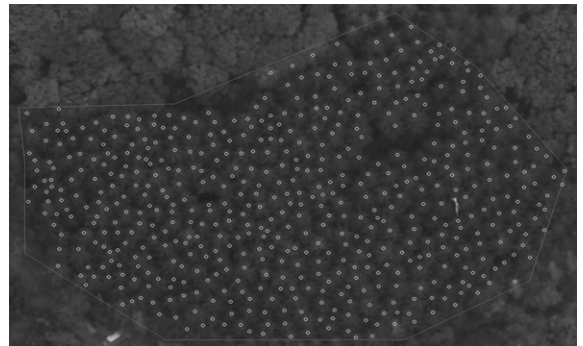


그림 13. 육안판독을 통한 기준데이터

전체정확도의 평가는 기준데이터의 수목중심점을 기준으로 수관의 평균지름(5m)을 고려하여 지름 2.5m의 원 내에 포함되는 LiDAR로부터 추출된 포인트들을 매칭된 것으로 간주하여 수행하였다. 그리고 이 거리 내에서 중복 추정된 포인트와 벗어난 포인트는 오류로 간주하였다(그림 14).

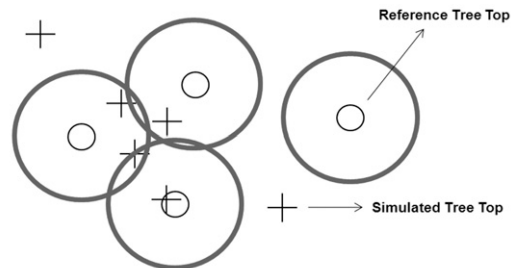


그림 14. 추정된 수목의 개체수 평가방법

추출된 개체목의 정확도 평가에는 전통적인 오차행렬 평가방법(Girard, 2003)을 이용하였으며, 전체정확도(OA), 추가오류(CE), 누락오류(OE)의 정량화에 사용된 수식은 아래와 같다.

$$OA = 100(N_m) / ((N_r - N_m) + (N_s - N_m) + N_m) \quad (17)$$

$$CE = 100((N_s - N_m) / N_s) \quad (18)$$

$$OE = 100((N_r - N_m) / N_r) \quad (19)$$

여기에서,  $N_m$ 은 매칭된 개체목의 수,  $N_r$ 은 기준데이터의 개체목 수,  $N_s$ 은 LiDAR 데이터로부터 추정된 개체목 수이다.

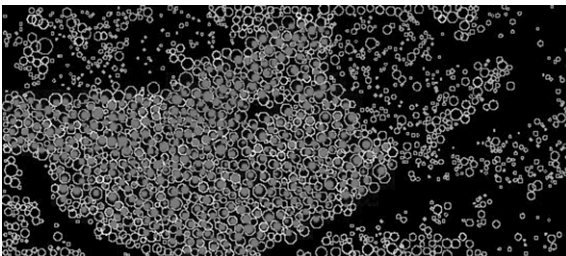


그림 15. 추출된 개체목과 기준데이터 비교

전체정확도 평가결과 매칭된 개체목의 수는 493그루로서 전체정확도는 66.26%로 나타났으며, 추가오류는 28.76%, 누락오류는 10.55%로 나타났다. 이러한 결과는 표본지-1에 분포하는 수목이 28그루인데 반해 항공사진에서는 25그루만이 식별되는 점을 미루어 볼 때 항공사진을 통해 제작된 기준데이터 자체에 육안으로 식별이 어려운 피압목으로 인해 상당수 누락된 수목이 존재하였기 때문에 많은 추가오류가 발생한 것으로 판단된다.

### 4.3 이산화탄소 고정량 산출 결과

항공 LiDAR 데이터를 이용하여 연구대상지 전체(1.3ha)의 수목에서 고정하고 있는 이산화탄소량을 추정한 결과 총 1,033.58tCO<sub>2</sub>의 이산화탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났다.

### 4.4 전통적인 이산화탄소 고정량 산출 방법과의 비교

항공 LiDAR 데이터를 이용한 이산화탄소 산출과는 별

도로 앞서 현지조사를 통하여 전체 연구대상지 1.3ha 중 0.2ha의 표본지(총 면적 대비 15.4%)에서 조사된 수목정보를 바탕으로 이산화탄소량을 산출하였다. 하지만 연구대상지내에는 임도, 하천, 무림목지가 존재하고 있어 디지털링을 통해 이 지역의 면적을 산출한 결과 0.15ha 가량이 실제 수목이 존재하지 않는 지역이었기 때문에 이 지역을 제외하고 산출하였다(그림 16).

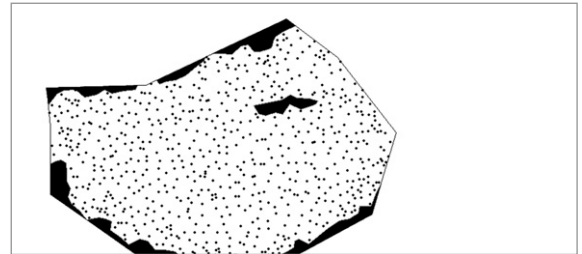


그림 16. 실험대상지역내 무림목지의 분포

그 결과 연구대상지에서 총 1113.21tCO<sub>2</sub>의 이산화탄소를 고정하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 산출한 결과보다 79.63tCO<sub>2</sub> 가량 더 많은 산출결과를 나타내어 두 조사방법 간에는 약 7.2%의 차이가 있는 것으로 나타났다(표 4).

표 4. 실험대상지역의 전체 CO<sub>2</sub> 고정량 산출 결과 비교

	LiDAR (2007년 4월)	현지조사 (2011년 7월)	차이량 (4년 3개월)
면적	1.3ha	1.3ha	-
입목본수	692본	114본(0.2ha)	-
평균수고	26.25m	27.08m	-0.83m
평균DBH	33.69cm	35.28cm	-1.59cm
줄기재적	726.45m <sup>3</sup>	782.42m <sup>3</sup>	-55.97m <sup>3</sup>
바이오매스	563.77ton	607.21ton	-43.44ton
탄소고정량	281.88tC	303.60tC	-21.72tC
CO <sub>2</sub> 고정량	1,033.58tCO <sub>2</sub>	1113.21tCO <sub>2</sub>	-79.63tCO <sub>2</sub>

## 5. 결 론

본 연구에서는 고해상도의 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 산림 내 분포하는 수목의 성장인자를 추정하고 이를 이용하여 IPCC에서 인정하는 이산화탄소 고정량을 추정 방법을 융합하여 연구대상지의 이산화탄소 고정량을 추정하였고, 정확도 평가를 수행하였다.



그 결과 선정된 대상지내에서 1,033.58tCO<sub>2</sub>이 산출되었다. 한편, 연구대상지 1.3ha 중 약 3.1%인 0.04ha에 대한 표본지조사(1곳)를 통해 산출된 총 이산화탄소량은 1,732.27tCO<sub>2</sub>로 나타나 LiDAR 방식으로 산출한 결과와 차이가 컸으나, 약 15.4%인 0.2ha에 대한 표본지조사(5곳)를 통해 산출된 총 이산화탄소량은 1,113.21tCO<sub>2</sub>가 산출되어 두 조사방법 간에는 약 7.2%의 차이가 난 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 현행의 현장조사 방법을 수행할 시 같은 수종과 연령, 소규모 면적일지라도 수목의 생장상태가 다를 수 있기 때문에 잘못된 표본을 선택하게 되면 큰 오차를 나타낼 수 있다는 문제가 있었다.

한편, LiDAR 방식을 이용해 산출된 이산화탄소 고정량은 5곳의 표본조사를 통해 이루어진 현장조사와 비교해 볼 때 IPCC에서 탄소배출권 발행을 허용하는 차이량 9% 이내로서, 항공 LiDAR 기술이 현지조사를 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다.

그러나 이러한 차이량은 누락오류와 추가오류가 상쇄되어 나타난 결과이며, 보다 복잡한 수종이 혼재된 지역에 대한 적용가능성 여부도 검증이 이루어져야 할 것이다. 향후 연구 과제로서 개체목 추출의 정확도 향상을 목표로 하고 있으며, 좀 더 신뢰도 있는 검증을 위해 정밀한 기준데이터 제작이 이루어질 것이다. 또한 보다 정밀하고 다양한 산림생장인자 추출을 위해 플랫폼자료 자료를 적용하는 방법이 진행될 것이다.

마지막으로 본 연구는 향후 탄소배출권거래제도 시행 시 개인이 소유한 소규모 산지 뿐 만 아니라 대규모의 산림에서 고정하고 있는 이산화탄소량에 대한 보상 근거를 마련할 수 있는 기술로 사용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고문헌

손영모, 김중찬, 이경학, 김래현 (2007), 우리나라 산림 바이오매스 자원평가, 연구보고 07-22, 국립산림과학연구원, pp. 11-26.  
 Aldred, A. H. and bonnor, G. M. (1985), *Application of airborne lasers to forest surveys*, Information Report PI-X-51, Canadian Forestry Service of Petawawa National Forestry

Centre, p. 62.  
 Baltsavias, E. (2000), A comparison of between photogrammetry and laser scanning, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 54, pp. 83-94.  
 Brouad, J. S., 2009, "Genetic Gain", <http://www.abtreegene.com/toolkit/#>  
 Clark, M. L., Clark, D. B. and Roberts, D. A. (2004), Small-footprint LiDAR estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 81(2-3), pp. 68-89.  
 Girard, M. C. (2003), *Processing of Remote Sensing Data*, Taylor & Francis, London, pp.306-307.  
 Gonzalez, R. C. and Richard E. W. and Steven L. E. (2004), *Matlab을 이용한 디지털 영상처리(Digital Image Processing using MATLAB)*, 유현중, 김태우 옮김, ITC, pp. 358.  
 Hese, S. and Lehmann, F. (2000), Comparison of digital surface models of HRSC-A and LASER scanner for forest stand characteristics, *X IXth ISPRS Congress*, ISPRS, Amsterdam, pp. 525-532.  
 Holmgren, J., Nilsson, M. and Olsson, H. (2003), Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning, *Forest Science*, Vol. 49, pp. 419-428.  
 Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, H., Engdahl, M., Linko, S. and Zhu, Y.H. (2000), Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, Vol. 128, pp. 109-120.  
 Karel, W., Pfeifer, N. and Briese, C. (2006), DTM QUALITY ASSESSMENT, *Proceedings of ISPRS Technical Commission II Symposium.*, Vienna,  
 Kraus, K. and Pfeifer, N. (1998), Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol 53, pp. 193-203.  
 Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. and Harding, D. (1999), Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, *Remote sensing of Environment*, Vol. 70, pp. 339-361.  
 MacLean, G. A. and Krabill, W. B. (1986), Gross-merchabtable timber volume estimation using an airborne LiDAR system, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 12, pp. 7-18.  
 Means, J. E., Acker, S. A., Harding, D. J., Blair, J. B., Lefsky,

- M. A., Cohen, W. B., Harmon, M. E. and McKee, W. A. (1999), Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the Western Cascade of Oregon, *Remote Sensing of environment*, Vol. 67, pp. 298-308.
- Nilson, M. (1996), Estimation of tree heights and stand volume using an airborne laser data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56, pp. 1-7.
- Persson, A., Holmgren, J. and Soderman, U. (2002), Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68, pp. 925-932.
- Schreier, H., Loughheed, J. Tucker, C. and Leckie, D. (1985), Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 6, pp. 101-113.
- Sithole, G. and Vosselman, G (2003), Report : ISPRS Comparison of Filters, Working Group III/3 of ISPRS Commission III, <http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/index.html>.
- St-Onge, B. A (1999), Estimating individual tree height of the boreal forest using airborne laser altimetry and digital videography, *ISPRS workshop on "Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers"*, Commission III of working Group 3, pp. 179-184.
- Vincent, L. (2003), Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis : Applications and Efficient Algorithms, *IEEE Transactions on image processing*, Vol. 2, No. 2, pp. 176-201.

---

(접수일 2012. 03. 02, 심사일 2012. 03. 23, 심사완료일 2012. 06. 27)