

개체목 및 임분조사를 위한 LiDAR 응용에 관한 연구

곽두안 · 이우균* · 손민호

고려대학교 환경생태공학부

Application of LiDAR for Measuring Individual Trees and Forest Stands

Doo Ahn Kwak, Woo Kyun Lee* and Min Ho Son

Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

요 약: LiDAR(Light Detection and Ranging)는 개체목의 위치, 수고, 지하고 등을 직접적으로 측정할 수 있으며, LiDAR로부터 측정된 수고정보로부터 흉고직경을 간접적으로 측정할 수 있다. 이상의 성장인자로부터 임분의 체적 및 생체량을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 LiDAR로 부터 측정된 개체목의 수고, 지하고, 흉고직경 등을 현장조사 자료와 비교하여 정확도 검정을 실시하였다. 경기도 가평 유명산 일대의 잣나무림, 낙엽송림, 참나무류림 등의 단순림을 대상으로 연구를 수행하였으며, LiDAR로부터 측정된 수고의 결정계수는 0.66으로 나타났다. 수종별로는 잣나무가 0.68, 낙엽송이 0.66, 참나무류가 0.60으로 나타났다. 그리고 LiDAR로부터 측정된 지하고의 결정계수는 0.79로 나타났으며 수종별로는 잣나무가 0.73, 낙엽송이 0.79, 참나무류가 0.68로 나타났다. 수종별로 예측된 흉고직경의 결정계수는 잣나무가 0.73, 낙엽송이 0.73, 참나무류가 0.85로 나타났으며, ha당 흉고단면적의 결정계수는 잣나무가 0.82, 낙엽송이 0.92, 참나무류가 0.95로 나타났다. LiDAR로부터 측정된 성장인자를 이용하여 추정한 연구지역의 수종별 ha당 생체량은 잣나무가 40,306 tdm/ha, 낙엽송이 94,150 tdm/ha, 참나무류는 94,481 tdm/ha로 나타났다.

Abstract : Location, height and clear-length of individual tree can be measured directly by LiDAR Remote Sensing, and dbh(diameter at breast height) can be estimated indirectly by tree height measured by LiDAR. In addition, stand volume and stand biomass are computed from estimated growth factors. In this study, each estimated growth factor was compared to the field measurements to validate accuracy. The coefficient of determination of total tree heights was 0.66 for total trees, 0.68 for *Pinus koraiensis*, 0.66 for *Larix leptolepis* and 0.60 for *Quercus* spp. The coefficient of determination of clear-length was 0.79 for total trees, 0.73 for *Pinus koraiensis*, 0.79 for *Larix leptolepis*, 0.68 for *Quercus* spp. The coefficient of determination of dbh predicted was 0.73 for *Pinus koraiensis*, 0.73 for *Larix leptolepis* and 0.85 for *Quercus* spp. Moreover The coefficient of determination of basal area was 0.82 for *Pinus koraiensis*, 0.92 for *Larix leptolepis* and 0.95 for *Quercus* spp. Biomass per ha computed by growth factor using LiDAR was 40,306 dm/ha for *Pinus koraiensis*, 94,150 tdm/ha for *Larix leptolepis* and 94,481 tdm/ha for *Quercus* spp. by species.

Key words : biomass, forest survey, light detection and ranging(LiDAR), tree height, volume

서 론

산림은 면적이 넓고 접근이 어려운 지형적인 특성을 지니고 있기 때문에 산림을 과학적으로 관리하기 위해서는 다양하고 광범위한 정보를 수집하여 이를 정량화·정성화하는 다각적 분석이 요구된다. 기존의 지상에서 이루어지는 현장조사는 시간 및 경비, 정확성 면에서 많은 한계를 지니고 있다. 또한, 산림의 성장, 생태 및 환경변화는

계량화가 어렵고 그에 필요한 자료의 양 또한 방대하다. 결국, 산림과 연관된 성장, 생태 및 환경정보에 대한 시간적, 공간적, 양적 제한을 극복할 수 있을 때 산림관리 및 이용의 지속성을 달성할 수 있는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 산림관리에 항공사진 또는 위성영상 등의 원격탐사(Remote Sensing)기술을 이용하고 있다. 시차를 두고 촬영된 항공사진 및 위성영상을 통해 성장, 생태 및 환경정보를 모니터링 할 수 있으며, 이들 원격탐사자료는 대면적을 대상으로 할 수 있어 산림성장, 생태 및 환경정보의 공간적 광범위성을 해결할 수 있다(Lefsky, 2002). 항

*Corresponding author
E-mail: leewk@korea.ac.kr

공사진은 입체시(立體視)를 통해 수고 측정 등 개체목에 대한 자료를 획득할 수 있고 항공사진삼각측량법에 의해 위치정보나 수치표고모델(Digital Elevation Model; DEM)을 제작할 수 있다. 일부 위성영상도 해상도는 다소 떨어지지만 입체영상 획득에 의해 DEM을 제작할 수 있다. 그러나 이러한 방법으로 DEM을 제작하기 위해서는 추가적인 장비가 필요한 뿐만 아니라 위성영상의 경우는 스테레오 영상을 얻기 위해 다른 각도에서 재촬영을 해야하므로 추가적인 비용이 소요된다. 또한 기존의 원격탐사는 광학 센서를 이용하여 항공사진 또는 위성으로부터 영상을 취득하는 수동형 방식으로 3차원 데이터를 얻을 수 없는 단점을 가지고 있었다. 그러나 직접 레이저를 발사하여 그 반사파를 취득하는 능동형 방식의 LiDAR 센서는 임관의 3차원분포를 측정할 뿐만 아니라 임관 밑의 지형까지 측정할 수 있는 특징을 지니고 있다(Wulder 등, 2003). 따라서 LiDAR를 이용할 경우 고해상의 지형도를 제작할 수 있고 임목의 수고, 수관, 임분전체의 임관구조 등을 정확하게 측정할 수 있다(Lefsky 등, 2002). 또한 LiDAR를 이용하여 개체목의 수고 및 수관의 울폐율을 측정할 수 있고(Aldred와 Bonner, 1985), DSM(Digital Surface Model)과 DTM(Digital Terrain Model)의 차이를 이용하여 수고를 측정할 수 있다(Clark 등, 2004). LiDAR로부터 추정된 수고값을 현장조사자료로부터 유도된 수고에 따른 흉고직경 함수식에 대입하면 흉고직경의 추정이 가능하고(Means 등, 1999; Nisson, 1996), 임목의 수고, 흉고직경, 지하고 등을 추정하면 개체목의 부피를 추정할 수 있다(Persson 등, 2002). 개체목의 부피를 이용한 대상지 전체 Biomass의 추정은 단목의 흉고직경 및 수고를 이용하거나 임분의 체적을 이용하여 산출할 수 있다(김규현 등, 1998). 그러므로 본 연구에서는 LiDAR를 이용한 수고, 흉고직경 및 지하고 등의 정확도 검정을 통하여 대상지의 체적 및 Biomass를 추정함으로써, 전통적으로 수행해왔던 조사방법을 탈피하여 보다 정확하고 효율적인 산림측정을 이룰 수 있도록 하고, 교토의정서의 발효로 더욱 중요시된 탄소배출권 에 대한 대응책의 초석을 마련하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 경기도 가평군 유명산 일대를 중심으로 좌상단(127° 29' 0.19380"E , 37° 36' 16.43433"N), 우하단(127° 30' 1.09830"E , 37° 35'42.94258"N)에 해당하는 지역이다(Figure 1). 유명산지역은 산림기후대 구분에서 온대 중부에 속하는 전형적인 대륙성 기후지역으로 연평균기온은 -13.0°C이고, 연평균 상대습도는 69%, 연평균 강우량은 1,347.8 mm이다(기상자료, 2004). 또한 대상지의

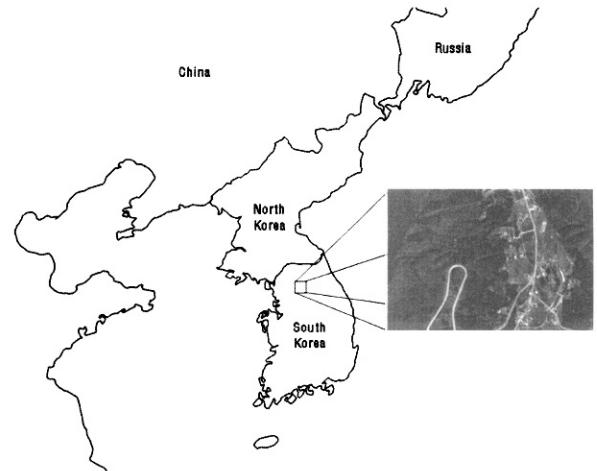


Figure 1. Study area.

표고는 252~677 m 범위 내에 분포한다.

2. 연구자료

1) LiDAR Data 및 디지털항공사진

본 연구에서는 지상 3,000 m에서 취득한 20±10cm의 해상도를 가진 LiDAR 자료(Figure 2)와 근적외선밴드가 제외된 25 cm 해상도의 디지털항공사진(Figure 3)을 이용하였다.



Figure 2. LiDAR Data composed of points.



Figure 3. Digital aerial photograph.

2) 현장조사 자료

유명산 일대의 산림지역을 대상으로 잣나무림, 낙엽송림, 참나무류림을 조사하였다. 조사임분은 자료의 정확도를 높이기 위해 단순림 형태의 임분을 조사하였고, 표고에 따른 수고측정의 오차를 줄이기 위해 경사가 완만한 지역을 대상으로 하였다. 조사구의 크기는 각 임분별로 10m×10m로 하였으며 가능한 많은 임목이 포함되도록 설정하였다. 총 조사임목본수는 잣나무(*Pinus koraiensis*) 47본, 낙엽송(*Larix leptolepis*) 46본, 참나무류(*Quercus* spp.) 43본으로 하였으며, LiDAR에서 산출된 수고, 지하고, 흉고직경, 흉고단면적(Basal Area)의 정확도를 검증하기 위해 각 개체목의 수고, 지하고, 흉고직경 등을 측정하였다. 개체목의 위치정보를 획득하기 위해 Trimble GPS 수신기를 사용하여 개체목의 근주부부터 약 1.3m되는 수간(樹幹)에서 좌표를 취득하였다.

3) 사용 소프트웨어

본 연구에서는 ArcView GIS 3.2a, ArcGIS 8.3, ERDAS Imagine 8.5와 MicroStation V.8.0 및 Extension Program인 TerraScan과 TerraModeler를 이용하여 LiDAR 데이터를 분석하였다. 또한 수고에 대한 흉고직경 함수식을 SAS 9.1을 이용하여 유도하였으며, eCognition 4.0을 이용하여 디지털항공사진을 분류한 후 수종분포도를 제작하였다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 우선적으로 LiDAR 자료로 임목의 위치를 파악하고 각 임목의 수고, 지하고 등을 측정하였다. LiDAR로부터 추정된 수고를 수고에 대한 흉고직경 추정 함수식에 적용하여 임목의 흉고직경을 추정하였다. 이와 같이 추정된 수고, 흉고직경, 본수로부터 임분의 흉고단면적 및 체적을 추정하였다(Figure 4). 추정된 성장인자들을 실측자료와 비교하여 정확성을 검증하였다.

1) LiDAR를 이용한 수고 및 지하고 도출

산림부분의 LiDAR 데이터는 식생의 최상부에서 반사

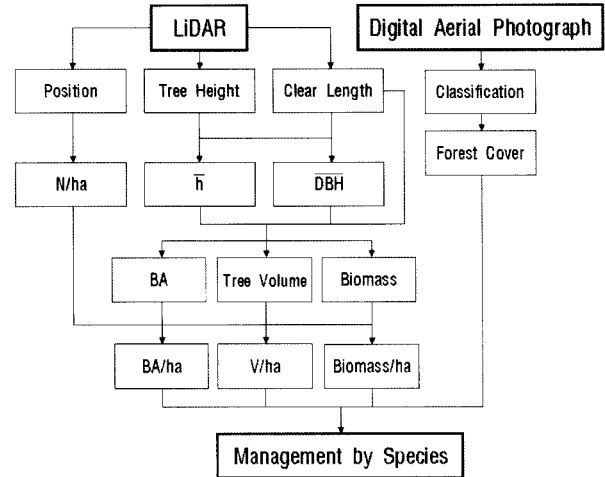


Figure 4. Forest survey using LiDAR and digital aerial photograph.

되는 High Vegetation Pulse, 그 다음 중간 식생부분에서 반사되는 Medium Vegetation Pulse, 그리고 하층식생에서 반사되는 Low Vegetation Pulse, 마지막으로 식생을 모두 통과하여 지표면에서 반사되는 Ground Pulse로 분류를 할 수 있다(Figure 5). 조사임분의 수고는 High Vegetation Pulse와 Ground Pulse의 표고 차이로 산출하였다. High Vegetation Pulse와 Ground Pulse의 좌표는 정확하게 일치하지 않으므로 먼저 High Vegetation Pulse와 Ground Pulse를 이용하여 DSM_{max} (maximum of Digital Surface Model)과 DSM_{min} 을 제작하고, 조사지점의 위치정보를 이용하여 DSM_{max} 과 DSM_{min} 에서 동일한 위치를 찾아 조사지점의 두 DSM의 표고차를 이용하여 개체목의 수고를 산출하였다(Figure 6). 또한, 조사임분의 지하고는 LiDAR의 Low Vegetation Pulse와 Medium Vegetation Pulse 중에서 어느 반사파가 지하고의 높이를 나타내는지 먼저 검증하였다. Low Vegetation Pulse와 Medium Vegetation Pulse를 이용하여 DSM_{low} 와 DSM_{medium} 을 제작한 다음 조사지점의 DSM_{min} 과의 높이차를 이용하여 지하고를 산출하였다.

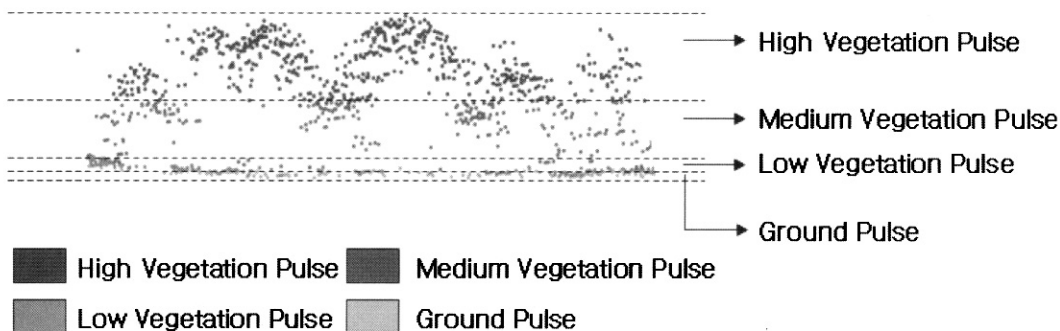


Figure 5. Classified pulses of LiDAR.

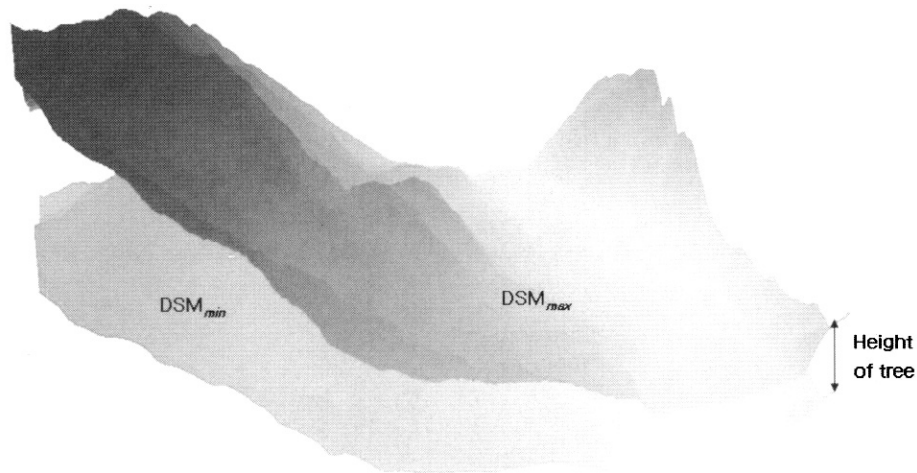


Figure 6. Estimated height of tree by DSM_{max} and DSM_{min}

2) 현장조사자료를 이용한 흉고직경 추정

조사임분의 수고 및 흉고직경을 이용하여 개체목의 흉고 직경(DBH)을 수고(H)로부터 추정할 수 있는 다양한 함수식에 성장자료를 적용한 후 각 식의 회귀계수를 비선형회귀분석을 실시하여 추정하였다(Table 1). 각 함수식의 적합도는 FI(Fitness Index)를 이용하여 검증하였으며 추정된 계수들의 평균자승오차의 근(\sqrt{MSE})과 T-test를 실시하여 FI 값이 높게 추정되었지만 \sqrt{MSE} 값이 높거나 혹은 T-test의 결과값이 매우 낮아 추정된 계수들이 통계적으로 유의하지 않고 일반적인 성장법칙에 적합하지 않은 곡선식은 제외시켰다(Table 2, 광두안 등, 2004). 수종별로 추정된 $DBH=f(H)$ 함수식에 LiDAR 데이터로부터 산출된 수고정보를 입력하여 관측치와 예측치의 정확도를 검증하였다.

3) LiDAR를 이용한 임분체적 및 Biomass 산출

(1) 최대우도법에 의한 분할영상기반 분류

고해상도 위성영상 및 사진을 기존의 화소기반으로 분류하면 소규모의 지피 유형이 혼합되는 문제(salt and pepper effect)가 발생한다(Cho 등, 2003). 본 연구에서는 분할영상기법(segment based classification)을 이용하여 디

Table 2. Fit statistics for evaluating performance of DBH-H Function.

Statistics	Equation
Fitness Index(FI)	$FI = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2 / (Y_i - \hat{Y})^2$
Mean Square Error(MSE)	$MSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2 / (n - m)$

n : number of observation

m : number of parameter used in the estimation

Y_i : observed diameter, \hat{Y} : predicted diameter

지털항공사진의 수종분류를 수행하였다(Figure 7). 분류결과에의 정확도는 분류오차표를 통해 평가하였고, 잘못되었을 경우 분류체계 설정의 단계부터 다시 반복하였다.

(2) 임분체적 산출

임분체적은 임관체적에 지하고 아래 수간(樹幹)부위의 재적(수간재적)의 합으로 나타낼 수 있다. 조사임분의 평균 지하고를 계산하여 지하고 수간의 재적을 추정한 다음 전체 대상지의 임목본수를 곱하여 대상지 전체의 수간재적을 산출하였다(Figure 8). 임관체적은 High Vegetation

Table 1. DBH-Height curve functions(Sit 등, 1994).

No.	Function Name	Function
1	Combined Exponential and Power Function	$DBH = a \cdot H^b \cdot c^H$
2	Power Function	$DBH = a \cdot H$
3	Exponential Function I	$DBH = a \cdot e^{b \cdot H}$
4	Exponential Function II	$DBH = a \cdot e^{a-b \cdot H}$
5	Exponential Function III	$DBH = a \cdot e^{\frac{b}{H}}$
6	Exponential Function IV	$DBH = a \cdot e^b$

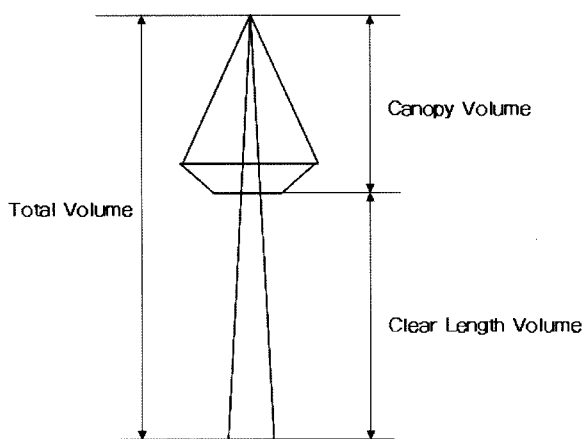
DBH : Diameter at Breast Height (m)

H : Height of tree(cm)

a, b, c : Parameters



Figure 7. Segmented imagery using digital aerial photograph.



$$CLV = 0.8 \cdot \pi \cdot \left(\frac{DBH}{200}\right)^2 \cdot CL \dots\dots\dots (Eq. 1)$$

CLV: Clear Length Volume(m³)

CL: Clear Length(m)

DBH: Diameter at Breast Height(cm)

Figure 8. Volume calculation.

Pulse와 지하고를 나타낼 수 있는 Medium Vegetation Pulse의 TIN을 제작하여 산출하였다. TIN을 이용한 임관 체적계산은 Traditional end area method로 계산하였다(Eq. 2, 3). 제작된 TIN이 삼각기둥으로 이루어져 있다고 가정하고 각 삼각기둥의 부피를 구한 다음 수종별 삼각기둥 부피의 합으로 전체 체적을 계산할 수 있다. 이를 위해 ArcGIS 8.3의 ArcInfo Workstation을 이용하였다.

$$End\ area = \frac{l \times h}{2} \dots\dots\dots (Eq. 2)$$

l : The base length of triangle

h : Height of triangle

$$Volume = End\ area \times H \dots\dots\dots (Eq. 3)$$

H : Height of TINs

TIN에서의 체적은 최대 높이값(Z_{max})과 사용자가 입력하는 기본 높이값(Base value)에 의해서 결정된다(ESRI, 1997). 기본 높이값이 최대 높이값보다 크게 되면 체적은 0이 된다. 또한 기본 높이값이 Z_{min} 보다 크거나 작으면 체적이 과대, 과소치를 나타낸다. 그러므로 본 연구에서는 기본 높이값을 0으로 하여 체적을 계산하였다(Figure 9).

(3) Biomass 추정

Biomass를 추정하는 식은 단목의 흉고직경과 수고를 이용하여 산출하는 단목 Biomass 추정식(Eq. 4)과 임분단위의 체적을 이용하여 산출하는 임분 Biomass 추정식(Eq. 5)이 있다(김규현 등, 1998).

$$Y = a \cdot D^2 \cdot H \dots\dots\dots (Eq. 4)$$

a : parameter

D : DBH

H : Height of tree

$$Y = A \cdot B \cdot C \dots\dots\dots (Eq. 5)$$

A : stant volume (km³)

B : oven-dry gravity (tdm/m³)

C : parameter

단목 Biomass 추정식은 흉고직경과 수고를 이용하여 Biomass를 추정하기 때문에 보다 정확한 추정을 하는데 유용하며, 임분 Biomass는 대면적을 대상으로 총체적인 Biomass를 추정하는데 유용하게 사용된다. 주요 수종별 추정계수는 Table 3과 같다(김규현 등, 1998). 본 연구에서는 개체목의 흉고직경과 수고를 이용하여 조사임분의 Biomass를 추정하였고, 추정된 대상지역 전체의 체적을 이용하여 임분 Biomass를 추정하였다.

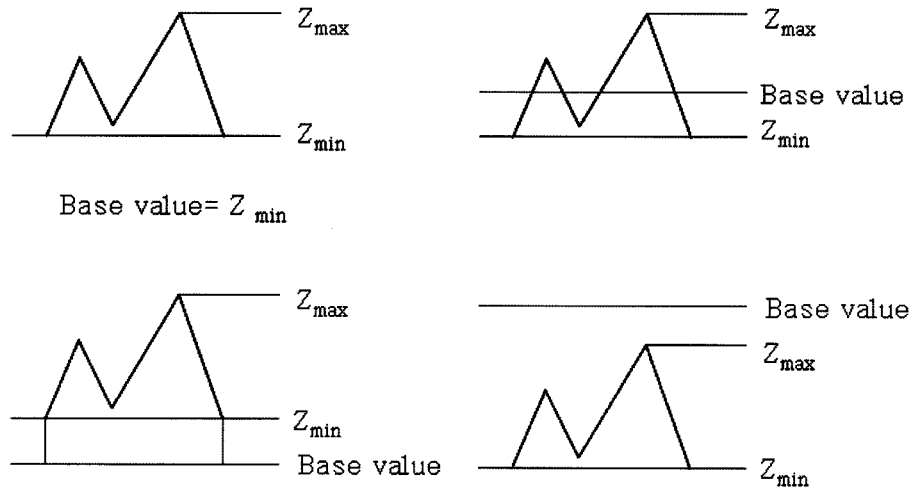


Figure 9. Volume calculated with different base value settings.

Table 3. Parameters of estimated species.

Unit	Parameter	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.
single tree	a	0.024250	0.026211	0.026849
stand	B	0.4	0.51	0.69
	C	1.65	1.65	1.72

결과 및 고찰

1. 수고 및 지하고 도출

1) 수고의 도출 및 정확도 검정

LiDAR의 High Vegetation Pulse와 Ground Pulse를 이용하여 조사지역의 수고를 도출하였다. 그리고 조사된 개체목의 GPS 좌표와 일치하는 지점을 검색하고, 수종별로 추정된 수고와 조사임분의 실제 수고와의 정확도 비교를 상관도 분석을 통하여 수행하였다(Figure 10). Clark 등 (2004) 은 전체 수종에 대한 결정계수가 0.51로 평가 되었으나 본 연구에서는 전체 수종에 대한 결정계수가 0.66으로 산출되었다. 그리고 잣나무는 0.68로 추정이 되었고, 낙엽송은 0.66으로 나타났으며 참나무류는 0.60으로 판명되었다. 기존의 연구와 비교해 보았을 때, LiDAR를 이용하여 산출된 수고의 정확도는 더욱 향상되었음을 알 수 있었다.

2) 지하고 도출 및 정확도 검정

지하고는 임관체적을 구하기 위해 Medium Vegetation Pulse와 Low Vegetation Pulse 중 어느 것이 지하고와 가까운 값을 나타내는가를 살펴보았다. 조사점의 위치에서 Medium Vegetation Pulse와 Low Vegetation Pulse의 높이값을 산출한 후, 실제 조사한 지하고와 비교하여 정확도를 검정하였다. 그러나 검정 결과 Low Vegetation Pulse는 높이가 -1.778~2.221 m의 범위로 추정되어 일반적인

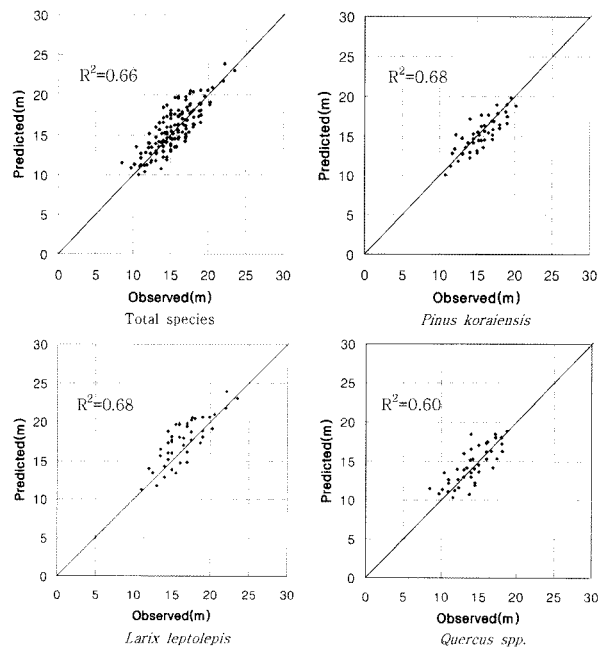


Figure 10. Accuracy analysis of tree height.

지하고와 부합되지 않아 검정에서 제외시키고, Medium Vegetation Pulse는 1.139~9.913 m의 범위로 추정되어 일반적인 지하고와 부합되므로 관측치와 예측치의 정확도를 검정해 보았다(Figure 11). 전체 수종에 대한 검정을 한 결과 결정계수는 0.79로 산출되었다. 그리고 잣나무는 0.73으로 추정되었고 낙엽송은 0.79로 나타났으며 참나무류는 0.68로 판명되었다. 세 수종 모두 비교적 높은 상관도를 나타내어 현지조사자료와 LiDAR의 Medium Vegetation Pulse로부터 산출한 지하고가 실제 조사지점의 지하고와 비슷한 것으로 판명되었다. 검정된 Medium Vegetation Pulse를 이용하여 제작된 DSM_{medium}과 High Vegetation Pulse로 제작된 DSM_{max}의 차이로 임관체적을 산출할 수 있다.

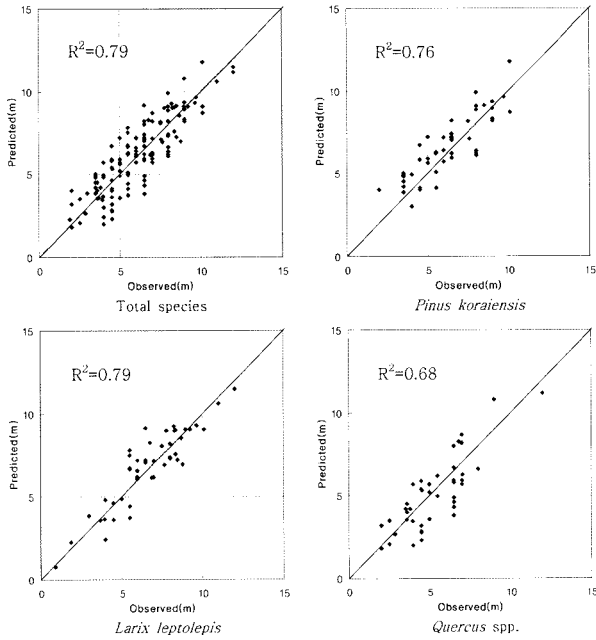


Figure 11. Accuracy analysis of Clear-Length Height.

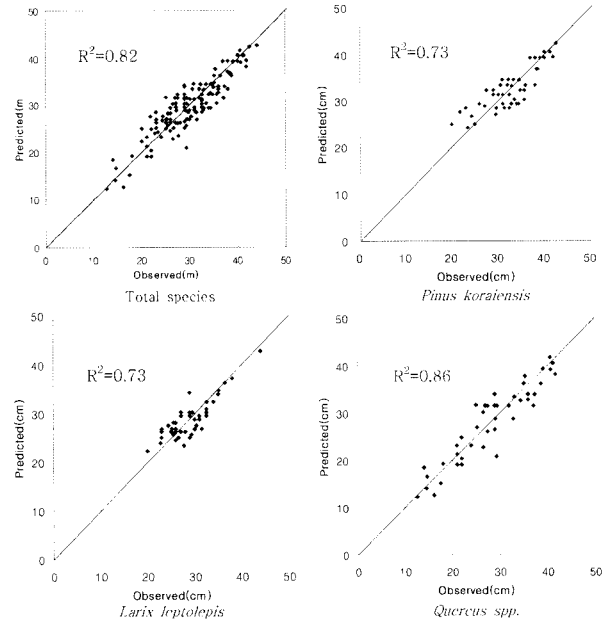


Figure 12. Accuracy analysis of DBH.

2. 수종별 흉고직경 추정식 및 정확도 검정

1) 수종별 흉고직경 추정식의 정확도 검정

조사임분의 수고 및 흉고직경을 이용하여 개체목의 흉고직경을 수고로부터 추정할 수 있는 수종별 흉고직경 추정식의 정확도 검정은 FI, T-test 값, \sqrt{MSE} 값의 비교를 통하여 수행하였다. 그리고 통계적으로는 유의하게 검정된 함수식이 일반적인 생장법칙에 부합하는가를 평가하여 최종 함수식을 추정하였다. 그 결과, Table 4와 같이 잣나무림, 낙엽송림, 참나무류림 모두 Exponential Function IV가 가장 적합한 생장 함수식으로 판명되었다.

2) LiDAR를 이용한 흉고직경의 정확도 검정

흉고직경 추정식에 LiDAR의 수고를 대입함으로써 LiDAR를 이용한 흉고직경을 산출하였다. 산출된 흉고직경과 조사임분의 실제 흉고직경과의 정확도 비교는 상관도 분석을 통하여 수행하였다. 전체수종에 대한 결정계수는 0.82로 나타났으며, 수종별 결정계수는 잣나무림이 0.73, 낙엽송림은 0.73, 참나무류림은 0.86으로 추정되어 비교적 높은 정확도를 나타내는 것으로 판명되었

다(Figure 12).

3. 흉고단면적(Basal Area)의 정확도 검정

임분의 밀도를 나타내는 지수로 사용되어 산림경영시 관리방법의 인자가 되는 흉고단면적(Basal Area)을 현장 조사자료와 LiDAR를 이용하여 산출하여 수종별 정확도를 검정하였다. 검정을 한 결과 전체 수종에 대해서는 결정계수는 0.96으로 산출되었다. 수종별로 보면, 잣나무는 0.82로, 낙엽송은 0.92로 산출되었으며 참나무류의 경우 0.95로 나타났다(Figure 13).

4. 디지털항공사진 분류 및 수종분포도 작성

수종별 임분체적을 산출하기 위해 DC4K02로 촬영된 대상지역의 디지털항공사진을 eCognition 4.0과 ERDAS Imagine 8.5를 이용하여 최대우도법에 의한 분할영상기반 분류(segment based classification)를 실시하였다. 분류항목은 잣나무림(*Pinus koraiensis*), 낙엽송림(*Larix leptolepis*), 참나무림(*Quercus spp.*), 비식생지역(Non Forest)으로 하고 분류작업을 시행하였다(Figure 14). 분류오차표를 이용하여 검사지역에 대한 분류의 정확도를 검증한 결과는

Table 4. DBH-Height function and statistics in nonlinear regression analysis.

Species	Function	FI	T(Prob> T)	\sqrt{MSE}
<i>Pinus koraiensis</i>	$DBH = 11.4296 \cdot 1.0673^H$	0.9927	a : 10.0014 (0.0001) b : 167.0266 (0.0001)	2.8979
<i>Larix leptolepis</i>	$DBH = 13.4179 \cdot 1.0475^H$	0.9933	a : 14.3261 (0.0001) b : 247.6359 (0.0001)	2.4389
<i>Quercus spp.</i>	$DBH = 8.0521 \cdot 1.0980^H$	0.9875	a : 10.4954 (0.0001) b : 156.1877 (0.0001)	3.3931

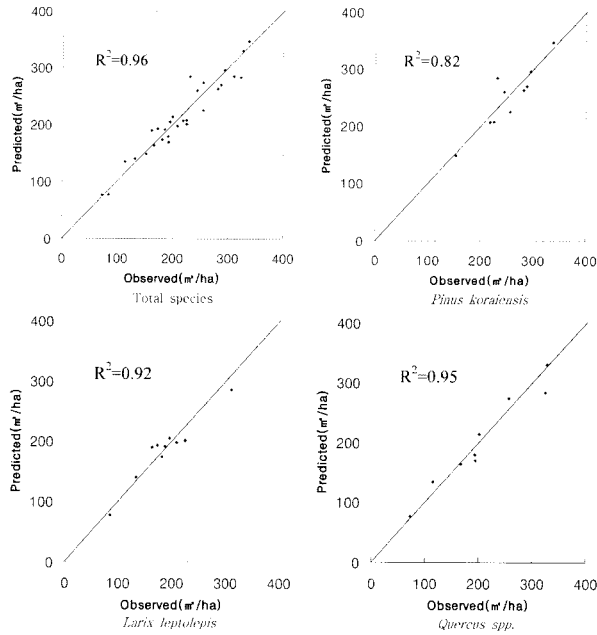


Figure 13. Accuracy analysis of basal area.

Table 5과 같다. 분류의 정확도는 약 0.77로 비교적 높게 추정되었고, 분류작업을 통해 작성된 수종분포도를 이용하여 대상지의 면적 및 임분체적 그리고 Biomass를 산출하였다.

5. 임분체적 산출

분류된 파일을 ArcView GIS 3.2a의 shape file로 전환하

Table 6. Canopy volume using ArcInfo 8.3.

Estimate	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.
Total Area (m ²)	330,210.000	103,601.016	367,441.094
Total Volume (m ³)	2,001,578.250	1,155,002.250	2,916,860.750
Volume per ha (m ³ /ha)	60,615.312	111,485.610	79,383.084

Table 7. Clear Length (CL) volume.

	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.
mean DBH (cm)	32.7	28.7	28.3
mean CL (m)	7.2	6.7	4.1
Nha	940	1150	1100
Total N	31,045	11,914	40,418
CL Volume (m ³)	0.484	0.347	0.206
CL Total Volume (m ³)	15,017.565	4131.198	8,338.951
CL m ³ /ha	454.711	398.764	226.950

고 LiDAR의 각 클래스별 포인트 데이터를 수종별로 잘라서 임관을 나타내는 TIN을 제작하였다. 그리고 임관체적은 High Vegetation과 Medium Vegetation Pulse를 이용하여 순수한 임관높이정보만을 이용하여 산출하였다(Table 6). 임관체적은 Base value를 0으로 하고 그래픽상의 표고의 고저를 나타내기 위해 사용된 Z factor는 1로 하여 과대치가 나오지 않도록 하였다. 각 수종별 지하고 아래 수간재적에 단목의 지하고 아래 수간재적에 대상지 전체의 본수(N)를

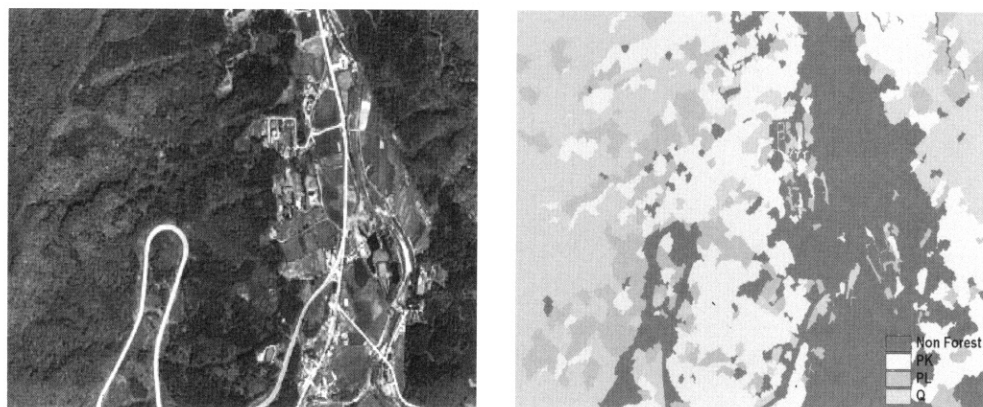


Figure 14. Segment based classification of digital aerial photograph.

Table 5. Error matrix of segment based classification.

Classified Data	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.	Non Forest	Row Total	User's Accuracy
<i>Pinus koraiensis</i>	8	1	1	0	10	0.8000
<i>Larix leptolepis</i>	3	7	0	0	10	0.7000
<i>Quercus</i> spp.	0	0	9	1	10	0.9000
Non Forest	10	1	2	27	40	0.6750
Column Total	21	9	12	28	70	
Producer's Accuracy	0.3810	0.7778	0.7500	0.9643		0.7688

Table 8. Stand volume by species.

	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.
Total Stand Volume (m ³)	2,016,595.815	1,159,133.448	2,925,199.701
Stand Volume (m ³ /ha)	61,070.023	111,884.374	79,610.034

Table 9. Mean Biomass of single tree (kg).

<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.
376.09	422.83	409.86

Table 10. Biomass using stand and canopy volume (tdm).

	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Quercus</i> spp.
Canopy Biomass tdm/ha	1,321,041.645	971,934.393	3,461,730.338
Stand Biomass tdm/ha	40,006.106	93,815.141	94,211.844
Stand Biomass tdm/ha	1,330,953.238	975,410.796	3,471,627.005
Stand Biomass tdm/ha	40,306.215	94,150.701	94,481.188

급한 후 대상지의 지하고 아래 수간 총체적 및 ha당 총 체적을 산출하였다(Table 7). 지하고 아래 수간체적은 조사된 지하고 및 흉고직경을 이용하여 수종별로 추정하였다. 지하고 아래 수간체적과 임관체적을 합산하여 수종별 임분의 체적총량 및 ha당 체적을 계산하였다(Table 8).

6. Biomass 추정

Biomass는 소규모지역을 측정하고자 할 때에는 단목의 흉고직경과 수고를 이용하여 단목 Biomass를 추정하고, 대상지 전체에 대한 Biomass를 추정하고자 할 때에는 임분체적을 이용하여 Biomass를 추정한다. LiDAR를 이용하여 수고와 흉고직경을 추정된 값을 이용하여 각 수종별 단목의 평균 Biomass를 추정한 결과는 Table 9과 같다. 또한 LiDAR를 통하여 산출된 체적을 이용하여 수종별 임분 Biomass 및 임관부위 Biomass를 추정할 수 있다(Table 10). 대상지 전체의 수종별 Biomass는 면적이 가장 넓은 참나무류가 가장 많이 산출되었으며, 점유면적이 가장 좁은 낙엽송림이 가장 적게 산출되었다.

결 론

LiDAR는 기존의 원격탐사에 사용되던 항공사진 및 위성영상과는 달리 표고정보 및 위치정보를 제공함으로써 지형의 3차원 분석을 할 수 있기 때문에 산림의 개체목 조사는 물론 산림지형을 정밀하게 표현할 수 있다. LiDAR를 이용하여 수고정보를 얻음으로써 개체목의 흉고직경을 추정할 수가 있으며, 지하고를 추정하여 임목의 체적 및 Biomass를 산출할 수 있다. 또한 LiDAR와 함께 촬영

된 디지털 항공사진으로 임상분류를 실시하여 대상지의 수종별 체적 및 Biomass를 추정할 수 있다. 본고에서는 LiDAR로부터 개체목의 수고를 도출하여 흉고직경을 추정하였다. 잣나무의 흉고직경 결정계수는 0.73으로 추정되었고, 낙엽송은 0.73, 참나무류는 0.86으로 추정되었다. 흉고직경을 이용하여 추정할 수 있는 흉고단면적(Basal Area)의 결정계수는 잣나무가 0.82로 추정되었고, 낙엽송은 0.92, 참나무류는 0.95로 추정되었다. 나타냈다. 임목의 체적은 잣나무의 경우 2,016,595.8 m³로 나타나 임목 1본 당 약 380 kg의 Biomass를 생산할 수 있는 것으로 추정되었고, 낙엽송은 체적이 약 1,159,133.4m³로서 1본 당 약 420 kg의 Biomass를 생산할 수 있는 것으로 나타났으며, 참나무류는 체적이 2,925,199.7m³로서 1본 당 약 410 kg의 Biomass를 생산할 수 있는 것으로 추정되었다. 대상지 전체의 Biomass는 잣나무가 약 1,330,953.2 tdm, 낙엽송이 약 975,410.8 tdm, 참나무류는 약 3,471,627.0 tdm로 추정되었다. 그리고 이산화탄소의 흡수가 가장 활발히 일어나는 임관의 Biomass를 추정해본 결과, 잣나무는 약 1,321,041.6 tdm, 낙엽송은 약 971,934.4 tdm, 참나무류는 약 3,461,730.3 tdm으로 나타났다. 그리고 ha당 Biomass는 잣나무림이 40,306.215 tdm으로 산출되었고, 낙엽송림은 94,150,701 tdm, 참나무류림은 94,481.188 tdm으로 추정되었다. 잣나무림의 ha당 Biomass가 낙엽송림과 참나무류림보다 약 1/2 정도로 추정된 것은, 잣나무림의 면적은 약 33 ha로 참나무림보다 약 3 ha 정도 좁고, 낙엽송림보다는 약 13 ha가 넓지만, 낙엽송과 참나무류보다 ha당 본수(N)가 적고, 임분 Biomass 환산식의 수종별 계수 중 잣나무의 계수가 낙엽송 및 참나무류보다 작기 때문이다. 본 연구는 LiDAR를 이용하여 임목의 수고, 지하고, 흉고직경 같은 산림관련 생장인자의 추정에 초점을 맞추었기 때문에 추정된 임분 체적 및 Biomass와 실측치 사이의 정확도 검증은 제외시켰다. 추후 연구에서는 LiDAR를 이용하여 추정된 임분 체적 및 Biomass의 정확도를 평가하여 현재 우리나라 산림이 보유하고 있는 탄소흡수원의 정확한 정량적 측정이 가능하도록 해야 할 것으로 사료된다.

인용문헌

1. 광두안, 이우균, 김상우, 서정호, 2004, 소나무 수고 및 수간형태의 지역별 차이에 관한 연구, 한국산림측정학회지, 7(1): 49-60.
2. 기상청, 2004, 기상자료, 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>.
3. 김규현, 김영수, 김춘식, 백을선, 손영모, 송장호, 이건설, 이경학, 이진규, 정영교, 정진현, 주원원, 1998, 산림의 온실가스 저감방안, 임업연구원 연구자료 제143호, pp.3-25.

4. Aldred, A. H., and Bonner, G. M., 1985, Application of airborne laser to forest surveys, Report PI-X-51, Canadian forest Service, Canada, 62p.
5. Cho, H. K., Lee, W. K., Lee, S. H., 2003, Mapping of vegetation cover using segment based classification of IKONOS imagery, *The Korean Journal of Ecology*, Vol. 26(2): 75-81.
6. Clark M. L., Clark, D. B., 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. 91, pp. 68-89.
7. ESRI, 1997, Arc/Doc(ArcInfo on-line manual).
8. Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., and Harding, D. J., 2002, LiDAR Remote Sensing for Ecosystem Studies, *BioScience*, Vol. 52, No. 1, pp. 19-30.
9. 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 Cascades of Oregon., *Remote Sensing of Environment*, 67: 298-308.
10. Nilsson, M., 1996, Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne Lidar System, *Remote Sensing of Environment*, 56: 1-7.
11. Persson, A., Holmgren, J., and Soderman U., 2002, Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol 68, No 9, pp.925-932.
12. Sit, V., Poulin-Costello, M., 1994, Catalogue of Curves for Curve Fitting, Forest Science Research Branch Ministry of Forests in Canada, pp.30-59.
13. Wulder, M. A, Franklin, S. E, 2003, Remote Sensing of Forest Environments, Concepts and Case Studies, Kluwer Academic Publishers, pp.13-46.

(2005년 8월 17일 접수, 2005년 9월 22일 채택)