# 다중시기 항공 LiDAR를 활용한 도시림 개체목 수고생장분석\*

김성열 $^{1)} \cdot$  김휘문 $^{1)} \cdot$  송원경 $^{1)} \cdot$  최영은 $^{2)} \cdot$  최재용 $^{2)} \cdot$  문건수 $^{3)}$ 

 $^{1)}$ 단국대학교 생명자원과학과  $^{2)}$ 충남대학교 산림환경자원학과  $^{3)}$ 삼아항업(주)

# Analysis of the Individual Tree Growth for Urban Forest using Multi-temporal airborne LiDAR dataset\*

Kim, Seoung-Yeal $^{1)}$  · Kim, Whee-Moon $^{1)}$  · Song, Won-Kyong $^{1)}$  Choi, Jae-Yong $^{2)}$  · Choi, Young-Eun $^{2)}$  and Moon, Guen-Soo $^{3)}$ 

<sup>1)</sup> Dept. of Green & Landscape Architecture, Dankook University,
<sup>2)</sup> Department of Environment & Forest Resources, Chungnam National University,
<sup>3)</sup> Samah-Amah Aerial Survey.

#### **ABSTRACT**

It is important to measure the height of trees as an essential element for assessing the forest health in urban areas. Therefore, an automated method that can measure the height of individual tree as a three-dimensional forest information is needed in an extensive and dense forest. Since airborne LiDAR dataset is easy to analyze the tree height(z-coordinate) of forests, studies on individual tree height measurement could be performed as an assessment forest health. Especially in urban forests, that adversely affected by habitat fragmentation and isolation. So this study was analyzed to measure the height of individual trees for assessing the urban forests health, Furthermore to identify environmental factors that affect forest growth. The survey was conducted in the Mt. Bongseo located in Seobuk-gu. Cheonan-si(Middle Chungcheong Province). We segment the individual trees on coniferous by automatic method using the airborne LiDAR dataset of the two periods (year of 2016 and 2017) and

<sup>\*</sup> 이 연구는 2017년도 정부(산림청)의 재원으로 지원을 받아 수행된 신기후체제 대응 연구사업임 (2017046A00-1919-BB01)

**First author:** Kim, Seoung-yeal, Graduate School of Dankook University, 119, Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan-si. Chungnam 330-714, Korea,

Tel: +82-41-550-6273 E-mail: rhaxod2632@gmail.com

**Corresponding author**: Song, Won-Kyong, Assistant Professor, Dept. of Green & Landscape Architecture, Dankook University. 119, Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-714, Korea,

Tel: +82-41-550-3636, E-mail: wksong@dankook.ac.kr

Received: 17 July, 2019. Revised: 24 October, 2019. Accepted: 22 October, 2019.

to find out individual tree growth. Segmentation of individual trees was performed by using the watershed algorithm and the local maximum, and the tree growth was determined by the difference of the tree height according to the two periods. After we clarify the relationship between the environmental factors affecting the tree growth. The tree growth of Mt. Bongseo was about 20cm for a year, and it was analyzed to be lower than 23.9cm/year of the growth of the dominant species, *Pinus rigida*. This may have an adverse effect on the growth of isolated urban forests. It also determined different trees growth according to age, diameter and density class in the stock map, effective soil depth and drainage grade in the soil map. There was a statistically significant positive correlation between the distance to the road and the solar radiation as an environmental factor affecting the tree growth. Since there is less correlation, it is necessary to determine other influencing factors affecting tree growth in urban forests besides anthropogenic influences. This study is the first data for the analysis of segmentation and the growth of the individual tree, and it can be used as a scientific data of the urban forest health assessment and management.

Key Words: Airborne LiDAR data · Tree Growth · Urban Forest · Individual Tree Segmentation · Watershed Segmentation Algorithm

## I. 서 론

산림은 유일한 온실가스 흡수원으로서 국토 의 약 63% 이상을 산림이 차지하는 우리나라의 경우, 임목 기반 산림자원정보의 측정은 환경보 전과 온실가스 감축 측면에서 중요한 기술이다 (Kim et al, 2016). 산림자원정보를 수집하기 위 해서 항공사진을 활용하여 수관 및 수고를 추정 하는 기법이 활용되고 있지만, 영상판독에 의한 방법을 광범위한 산림지역에 적용하기에는 어 려움이 많다(Woo et al, 2007). 또한 항공사진과 같은 원격탐사도구는 태양의 고도에 따라 그림자 로 인한 오차가 발생 할 수 있다는 단점이 있으 며, 2차원적인 데이터를 다루기 때문에 높이 값(z 좌표) 분석에 한계가 있다. 따라서 산림에서 개체 목을 추출하기 위한 자동화 기법과, 이로 인하여 고밀도 3차원 자료인 LiDAR(Light Detection and Ranging) 자료를 활용한 산림 정보 추출 연구들 의 필요성이 대두되고 있다(Kim et al, 2009).

LiDAR는 항공기에 탑재된 LiDAR장비에서 레이저 펄스(pulse)를 발사하고, 지표의 물체에

서 반사되어 되돌아오는 시간과 방향을 측정하 여 지표물의 정확한 3차원 좌표를 얻는 기술이 다(Cho et al, 2003). 산림지역에서 레이저 반사 신호가 임목특성에 따라 다르게 나타나는 성질 을 이용하여 산림정보 취득에 활용되고 있다 (Nelson et al, 1997). 특히 산림을 대상으로 한 LiDAR를 활용하는 연구의 경우, 수고(Tree Height) 추정뿐만 아니라 캐노피 커버(Canopy Cover), 캐노피 숲틈(Canopy Gap fraction), 엽면 적지수(Leaf Area Index) 등 현장조사 결과와 높 은 수준으로 일치하였다(Korhonen et al, 2011; Ma et al, 2017; Mahoney et al, 2017; Zhao and Popescu, 2009). 항공 LiDAR 자료는 산림의 수 평적 분포에 대한 정보만을 제공하는 항공영상 및 다중분광 기술보다 높은 수관밀도의 산림에 서도 임목 특성 및 산림 3차원 정보의 직접적인 취득이 가능한 특징이 있다(Kim. 2010). 또한 수고와 같은 산림의 구조적인 측면을 분석할 때 LiDAR의 활용이 다른 원격탐사 방법보다 높은 정확도를 나타내고 있어 산림 분야에서 가능성 을 인정받아 활용되고 있다(Lefsky et al, 2002).



**Figure 1.** Location of study area, Mt. Bongseo Mt Cheonan si. Chungcheongnam-do. Main survey area is designated by white solid line

산림의 3차원 정보 취득을 통해 수목의 1차 생장인 수관생장에 대한 정보를 정량적으로 파악할 수 있으며 입체적인 산림자원정보 취득이 가능하다. 특히 수관의 수고 생장은 수목의 산림내 종 조성, 수목 연령, 교란 등 다양한 환경에 많은 영향을 받기 때문에 산림의 건강성을 나타내는 지표로 활용 될 수 있다(Choi, 2018).

더불어 서식지 단절과 고립화 등의 문제로 인해 도시림의 건강성이 악화되고 있으며, 이에 도시림의 건강성 평가 연구가 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이다(Clark et al, 2014). 도시림에서 수목 수고 생장은 환경적·비환경적인 교란요소에 즉각 반응하는 것으로 알려져 있으며, 그에 따라 산림의 수고 생장은 도시림 건강성 평가에서 필수적인 요소로 이해된다(Norman and Campbell, 1989). 이 때도시림의 개체목 추출은 임분 체적, 바이오매스량 추정 등 개체목 단위의 다양한 산림정보를 취득 시보다 정확한 수고 생장량을 파악하는데 중요한 과정이 될 수 있다. 또한 산림 동태의 추정뿐만이 아

니라 도시림 관리에 있어 핵심적인 데이터로 활용될 수 있으며, 효율적이고 경제적인 도시림의 관리를 위해 개체목 단위 산림정보를 취득하는 것이 필요하다(Jang et al, 2006). 더 나아가 개체목 단위 산림정보 변화를 파악하여 도시화로 인해 훼손된 도시림의 복원을 보다 효율적으로 진행 할 수 있음으로 그 중요성이 대두 되고 있다(Choi et al, 2018)

이에 본 연구는 LiDAR 데이터를 활용하여 침엽수림을 대상으로 자동화된 방법으로 개체 목을 추출하고, 다중시기 항공 LiDAR 데이터를 통해 수고 생장을 정량화하고자 한다. 더 나아 가 수고생장에 미치는 환경요인을 분석하여, 개 체목 단위의 수고 생장에 영향을 미치는 환경변 수를 파악하고자 한다.

# Ⅱ. 재료 및 방법

# 1. 연구대상지

연구 대상지는 충남 천안시 서북구 서쪽에 위치 한 봉서산으로 대단위 아파트, 도로 등 주거지 및 시가지로 둘러싸여 있는 고립된 도시림이다(Fig 1). 본 대상지는 2010년부터 현재까지 약 10회 이상 항 공 LiDAR를 촬영해온 지역으로, 지속적인 LiDAR 데이터 구축이 이루어지고 있다. 이에 봉서산은 다 중시기(Multi-temporal) 항공 LiDAR 데이터를 활용 하여 3차원적인 산림자원정보를 취득하는데 유리 한 지역이다. 봉서산은 임상도에 따라 활엽수 중 상 수리나무(Quercus acutissima), 침엽수인 리기다소 나무(Pinus rigida), 낙엽송(Larix kaempferi)이 우세 한 것으로 조사되었으며, 영급은 대상지 내 85.2% 가 4영급, 13.8%가 3영급으로 성숙한 산림으로 확 인되었다. 본 연구는 항공사진과 LiDAR의 촬영 시 기를 고려하여 계절적 차이를 최소화하기 위해 봉 서산의 침엽수림을 대상으로 하였다.

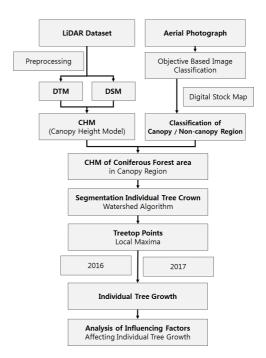
## 2. 데이터 취득

삼아항업(주)으로부터 대상지의 항공 LiDAR 데 이터를 제공받았으며, 2016년 04월 06일(Day of year : 97)과 2017년 12월 12일(Day of year : 346)에 취득된 항공 LiDAR 데이터를 분석에 사용하였다. 두 시기의 점군 밀도(points/㎡)는 각 6.4points/㎡ 7.0points/㎡로서 선행연구에 따른 점군 밀도 차이와 비교해본 결과, 두 데이터의 점군데이터(Point Cloud)를 비교하는데 문제가 없을 것으로 판단된다 (Hopkinson et al, 2008; Vepakomma et al, 2008; Vepakomma et al, 2011). 데이터 전처리과정 중 오 류값을 제거하기 위해 라이다 펄스의 포인트 클라 우드(Point Cloud)가 건물에 의해 반사가 일어나 정 상적인 위치보다 멀리 떨어진 곳에 생성되거나(low point), 비행기 또는 조류에 의해 생성된 점(air point)을 수작업으로 분류하였다(Choi, 2018). 이후 점군데이터는 지표면(Ground)과 낮은 식생(Low Vegetation), 중간 식생(Medium Vegetation), 높은 식생(High Vegetation), 건물(Building)로 분류하였 으며, Terrasolid 소프트웨어(Terrasolid Oy Inc.)를 활용하였다. 이 때 두 시기의 LiDAR 데이터 상 공통 적으로 탐지된 건물 옥상을 기준으로 각 LiDAR 데이터의 높이 값을 보정하였다.

추출된 개체목의 생장량에 영향을 끼치는 요인을 파악하기 위한 환경변수 데이터를 구축하였다. 이에 수종분포, 영급, 경급, 토성(Soil texture) 등을 획득하기 위해 1:5000 정밀임상도와 1:5000 산림입지토양도를 활용하였다. 거리, 지형적인 변수를 위한 데이터는 1:5000의 수치지형도와 본연구에서 구축한 수치표고모델(Digital Terrain Model)자료를 활용하였다. 이때 거리변수는 도로와의 거리로서 국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도를 통해 구축하였으며, 지형적인 변수인고도와 기울기, 태양복사에너지, 토양습윤지수(TWI: Topographic Wetness Index)를 구축하기위해 2017년 12월 12일 촬영된 LiDAR데이터를이용하여 수치표고모델을 구축·활용하였다.

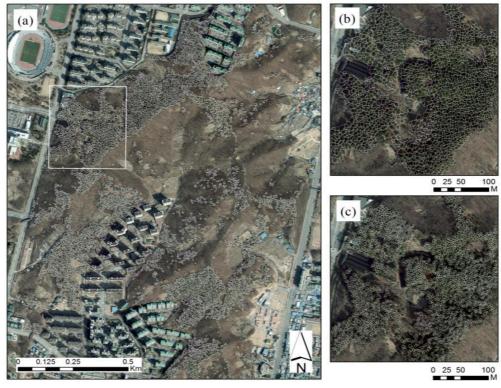
## 3. 개체목 추출

개체목 추출은 항공 LiDAR를 이용하여 수목형 상 자료가 포함된 CHM(Canopy Height Model)자



**Figure 2.** A Workflow for the segmentation of the Individual tree and analysis of influencing factors

료를 제작하고, 유역분할알고리즘을 적용한 과정 으로 진행되었다. CHM은 지형, 건물, 수목 등의 높이 정보를 포함하고 있는 수치표면모델(Digital Surface Model)과 지형자료만 포함하고 있으며 앞서 활용된 수치표고모델의 차분영상으로부터 생성된다. 수치표면모델자료와 수치표고모델자 료는 이미지기반의 자료로 격자단위로 구성된다. 대상지역의 고점밀 항공 LiDAR를 이용하여 수목 형상과 정밀 개체목 추출을 위해 격자단위를 0.5mX0.5m로 설정하였으며, 두 자료의 격자자료 가 일치하도록 Layer Stacking을 수행하였다. Layer Stacking은 동일한 격자일지라도 격자자료 의 시작지점이 다를 경우 계산 시 발생하는 오차 를 최소화하는 방법이다(Ayrey et al, 2017). 두 항공 LiDAR 데이터가 활엽수림 개엽(開葉) 전과 낙엽 이후 시기에 촬영되어, 침엽수림을 대상으로 수목지역을 추출하였다. 임상도 오류를 수정하고 수목·비수목지역, 침엽·활엽수를 구분하고자 삼



**Figure 3.** (a): Result of segmentation using Watershed segment algorithm in the Mt. Bongseo. Comparison site of two segmentation methods is designated by white square box. (b) is result by using Watershed segment algorithm, (c) is result by using supervised Imagery classification.

아항업(주)에서 2017년 12월에 촬영한 공간해상 도 0.1m급 항공정사영상을 활용하였으며 객체기반 이미지 분류기법(Objective based Image Classification)을 통해 수목 지역과 침엽수림을 분류하였다. 보다 정확한 수목지역을 분류하기 위해 5m이상은 교목지역(수목지역), 5m미만은 관목 및 비수목지역으로 분류하였다.

CHM을 토대로 유역분할알고리즘(Watershed Segmentation Algorithm)을 통해 개체목을 추출하였다. 능선과 집수지역을 찾아 각 지역을 분할하는 것을 유역분할알고리즘이라 하며(Jang et al, 2006), CHM의 높이 값(Hight Value)을 역산하여나무가 유역으로 나타나게 유역분할알고리즘을 적용하였다(Vincent and Soille, 1991). 이 때 수목과추출(over-segmentation) 방지를 위해 평균 수관폭보다 작은 수관은 제거하였다. 보다 정확한 개

체목 추출 검증을 위해 항공사진의 영상판독 감 독분류 방법으로 개체목을 추출하였고 이와 비교 검증을 수행하였다. 유역분할알고리즘을 적용한 이후 수목 최고지점(Tree-top Points)을 식별하고 자 국부최대값 방법(Local Maxima Method)을 통 해 수행되고 이는 CHM상 인접한 격자의 높이 값 보다 높거나 같을 때 검출된다(Palenichka, 2013). 개체목 내 여러 개의 수목 최고지점 식별을 피하 기 위해, 수관 내 평탄한 표준 CHM을 산출하고 국부최대값인 수목 최고지점을 추출 하였다(Chen et al 2006). 생성된 수목 최고지점에서 CHM의 높이 값(Height Value)을 각 개체목의 수고로 인 식할 수 있으며, 두 시기의 높이 값 차이를 통해 2016년부터 2017년까지 수고 생장을 확인하였다. 유역분할알고리즘과 국부최대값 방법을 활용한 개체목 추출과 수고생장의 모든 분석은 Arcmap

10.5(ESRI Inc.)를 이용하였다.

## 4. 수고생장 영향요인 분석

추출된 개체목 생장량에 영향을 끼치는 요인 을 파악하기 위해, 참고문헌을 토대로 도시림의 수고 생장에 영향을 미칠 것으로 판단되는 변수 를 표고(Elevation), 향(Aspect), 경사도(Slope), 도로와의 거리, 수종, 수목의 연령, 토성, 토양습 윤지수 등으로 선정하였다. 앞서 도출된 개체목 단위 수고 생장량과 주변 환경요인과 관계를 확 인하고자 환경변수 간 피어슨 상관분석을 실시하 였다. 표고와 경사도와 같은 지형적 변수는 LiDAR 데이터로부터 생성된 수치표고모델로부 터 생성하였다. 수치지형도를 활용하여 모든 개 체목으로부터 도로와 거리를 계산을 통해 거리변 수를 구축하였고, 임상도로부터 수종, 영급, 경급, 소밀도를 구분하고 산림입지토양도를 통해 토성, 유효토심(Effective Soil Depth), 토양배수등급도 (Soil Drain)를 구분하였다. 토양습윤지수(TWI)는 상위경사면의 면적과 경사도를 통해 대상지점 수 분 응집 정도를 추정하는 지수로서 토양의 습윤 한 정도를 파악할 수 있다(TWI = In(A/tanB), A: 누적집수량, B: 기울기); Bevenand and Kirkby, 1979). 이를 통해 각 환경변수들이 생장량에 미 치는 영향을 분석하였다. 임상도에서 나타난 수 목의 영급, 경급, 수관밀도에 따른 생장량을 파악 하였고 산림입지토양도에서 구분된 토성, 유효토 심, 토양배수등급에 따른 개체목 단위 수고생장 량을 파악하기 위하여 paired t-test와 one-way ANOVA분석을 수행하였다. 피어슨 상관관계 분 석를 포함한 모든 통계적인 분석은 R statistical 3.4.2와 R Studio 3.4.2를 사용하였다.

# Ⅲ. 결과 및 고찰

## 1. 개체목 추출

항공 LiDAR의 포인트 클라우드를 통해 CHM 을 생성하였으며 이를 통한 개체목 추출 결과 봉

서산의 전체의 침엽수는 11,781본으로 확인됐다. 봉서산 내 일부지역 대상으로 항공사진 감독분류 결과와 비교해본 결과(Fig. 3), 유역분할 알고리즘 을 이용한 개체목 추출은 1,915본, 항공사진 감독 분류결과 2,274본으로 분석 되었다. 이에 유역분 할 알고리즘을 이용한 개체목 추출 결과가 저추정 (Under-segmentation) 된 것을 확인하였다. 항공 사진에서 발생하는 그림자와 높은 수관밀도로 인 해 오류가 발생하였고, 봉서산 전체가 아닌 일부 지역만을 추출하였기에 개체목 추출이 저추정 되 었을 것이라 판단된다. 그러나 본 연구방법론이 영상을 통한 감독분류보다 숲틈지역 또는 비수목 및 관목지역의 추출 정확도가 높았다. 또한 두 가 지 방법으로 추출된 개체목의 최고지점이 개체목 내부에 위치하는 정도를 파악한 결과, 개체목의 지리적인 위치는 94%이상 일치하였다. 개체목을 추출하는 과정에서 격자단위의 분석은 위치오차 를 발생시킬 수 있는데, 이는 항공사진측량 규정 의 오차범위 내로서 허용될 수 있는 수준이라 판 단된다. 더불어 오차를 최소화하기 위해 격자크기 를 0.5m로 선정함으로서 이를 극복하고자 하였다. 따라서 본 연구방법은 자동화된 추출방법으로 고 밀도의 넓은 지역에 적용할 수 있는 방법이라 판 단된다. 두 시기 생장량을 파악하기 위한 개체목 은 2017년 항공정사영상을 통해 검증된 개체목을 기준으로 선정하였다.

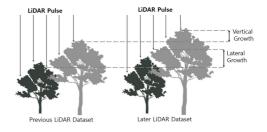
#### 2. 개체목 단위 수고생장량

추출된 개체목의 최고지점을 기준으로 2016 년의 평균 수고값은 16.23 ± 3.35m였고 2017년 의 평균 수고는 16.56 ± 3.39m로 생장량은 약 0.33m로 분석되었다. 그러나 이러한 결과는 수 관측방생장(수평생장, Leteral Gowth)이 고려되 지 않은 결과이다. 봉서산 내 침엽수의 우점종 은 리기다소나무로서 국립산림과학원(2007; 2016) 지위곡선에 따르면 리기다소나무의 3영 급과 4영급의 생장량은 연간 0.5m/year을 넘지 못하는 것으로 확인되었다. 따라서 2016년,

(m)	CF	łМ	Vertical and	lateral growth	lateral growth		
	(Canopy He	eight Model)	vertical and	iaterar growth			
Year	2016	2017	2016	2017	2016	2017	
Average height	10.63	10.95	16.23	16.56	16.23	16.56	
Growth	0	32	0	33	0.40 <sup>†</sup>		

**Table 1.** Comparison of the average height value and growth quantity in two periods of CHM, lateral and vertical growth, vertical growth only

2017년 2년 사이에 수식생장이 1m를 초과하지 못할 것으로 판단된다. 1m 초과 지역은 2016년 에 촬영된 LiDAR 펄스가 지면 혹은 하층부 수 관을 탐지하고, 2017년 수관의 측방생장 등에 의해 상층부 수관으로 탐지되어 나타나는 결과 로 판단하였다(Fig. 4). 이에 같은 수목 최고지점 내 수관 측방생장을 제외하고 개체목 수고 생장 량을 분석하였다. 그 결과 개체목 수고생장은 평균 0.40±0.25m로 확인되었다. 두 시기의 2년 평균 CHM의 평균 높이차는 0.32m, 측방생장을 고려하지 않은 수고 생장량은 0.33m로서, 측방 생장량을 제거하였을 때 수고생장량이 더 높은 정확도를 갖는 것으로 사료된다. 국립산림과학 원 지위지수에 따르면 리기다소나무 생장량은 광릉지역에서 연간 23.9cm/year로 알려져 있으 나, 대상지는 1년 동안 평균 20cm로 선행연구보 다 저조한 생장량을 보였다. 또한 선행연구에 따르면 리기다 소나무의 경우 도시열섬과 토양 산성화로 인해 자연지역보다 도시지역에서의 생장량이 낮은것으로 나타났다(Kim, 2003). 이 에 본 대상지 역시 도로와 대단위 아파트 단지 에 의해 고립된 도시림으로서 생장량이 저조한 것으로 사료된다. 기존의 연구들은 격자 데이터 인 CHM의 평균 수고생장량을 추정함으로서 숲 틈이나 관목 및 비수목지역에 대한 높이 값이 반영되지 않은 한계가 있다. 또한 측방생장에 따른 LiDAR 펄스의 오차가 반영되지 못했다. 그러나 본 연구는 측방생장을 고려한 개체목 단 위 수고생장량 분석 결과로서, 보다 정확한 생 장량 추정이라 판단된다.



**Figure 4.** Difference between lateral and vertical growth in terms of detection of LiDAR pulses

# 3. 수고생장 영향요인 분석

임상도를 기반으로 구분된 수목의 영급, 경 급, 수관밀도에 따른 개체목 단위 생장량을 파 악하고 평균간 비교를 위한 통계분석을 수행하 였다. 그 결과 2영급 평균 0.46m, 3영급 0.42m, 4영급 0.39m 생장한 것으로, 2영급에서 가장 높 은 생장량을 보이는 것으로 분석되었으나 통계 적으로 유의한 차이는 확인되지 않았다(F=0.55, p-value > 0.1). 경급에 따른 구분으로는 소경목 의 경우 0.42m, 중경목 0.39m으로 생장하였으 며 통계적으로 매우 유의미한 차이를 확인하였 다(t=3.39, p-value < 0.01). 수관밀도의 경우에 는 소, 중, 고밀도에 따라 0.36m, 0.45m, 0.4m로 생장한 것으로 분석되었지만 통계적으로 유의 미하지 않았다(F=0.12, p-value > 0.1). 영급과 수관밀도는 통계적으로 유의미하지 않았지만 수목 수고생장은 2영급, 소경목 중밀도에서 가 장 높은 수고 생장량을 보였으며 이는 국립산림 과학원 리기다 소나무의 생장량 지위곡선과 일 치하는 결과였다. 또한 산림입지토양도를 통해

<sup>&</sup>lt;sup>T</sup> Extracted from the height value of Vertical and lateral growth considering lateral growth

	1 /														
	Forest type Class						Soil Characteristics								
Growth (m)	Age			Diameter		Density-		effective soil depth <sup>†</sup>		Soil drain <sup>++</sup>					
	П	Ш	IV	1	2	low	med	high	1	2	3	2	3	4	5
Mean	0.46	0.42	0.39	0.42	0.39	0.36	0.45	0.4	0.34	0.39	0.4	0.4	0.43	0.47	0.42
STDEV.	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.16	0.25	0.26	0.27	0.23	0.26	0.25
Mean Difference	F=0.55		t=3.3	t=3.39** F=0.12		F=14.52***		F=0.06							

**Table 2.** Growth quantity of differences in forest type class(age, diameter, density) and Soil Characteristics(effective soil depth, Soil drain)

토양 특성 별 개체목 수고 생장량 분석을 진행 하였다. 침엽수림 내 토성이 사양토(Sandy loam) 한 가지로, 토성에 대한 생장량 분석은 수 행하지 않았다. 유효토심의 경우 20cm 미만, 20~50cm, 50~100cm로 구분하여 생장량 차이 분석 결과, 유효 토심 별 생장량은 평균 0.34m, 0.39m, 0.40m로 각 토심 별 통계적으로 유의미 한 차이가 있다고 분석되었다(F=0.55, p-value < 0.001). 토양의 배수등급의 경우 "불량", "약간 불량," "양호", "매우양호" 4가지로 구분하여 생 장량 차이 분석 결과, 평균 생장량은 0.40m, 0.43m, 0.47m, 0.42m로 각 구분 별 생장량의 차 이가 있었지만 통계적으로 유의미하지 않았다 (F=0.06, p-value < 0.1). 토양에 따른 생장량은 유효토심 50~100cm, 토양 배수 양호등급에서 가장 높은 생장량을 보였다. 본 연구는 침엽수 를 대상으로 수행하여, 대부분의 리기다소나무 가 같은 토심이나 토양 배수등급의 토양에 분포 되어있기 때문이라 판단된다. 따라서 향후 연구 에서는 토양에 따른 수목 생장량의 영향을 확인 하기 위해 침엽수뿐만 아니라 활엽수와 혼효림 대상으로 연구가 필요하며, 토양특성이 다양한 대상지를 선정하여 연구를 진행하는 것이 중요 할 것으로 판단된다.

주변 환경과 개체목 단위 수고생장량의 관계 를 파악하기 위해 도로와의거리, 토양습윤지수 (TWI), 토양배수등급, 유효토심, 태양복사에너 지, 경사도, 고도에 따른 상관관계를 분석하였 다. 이 때 수목의 수고생장은 영급, 경급, 밀도 별로 다르게 나타난다. 따라서 상관관계 분석은 침엽수에서 가장 많은 비율을 나타내는 리기다 소나무, 4영급, 중경목, 중밀도의 개체를 대상으 로 수행하였다. 도로와의 거리(r=0.076\*\*\*)와 태 양복사에너지(r=0.057\*\*\*)는 그 정도가 작지만, 통계적으로 유의한 상관성을 띄었고 다른 변수 는 영향이 크지 않았다(Table. 3). 대상지 서쪽으 로 왕복 8차선의 도로가 위치하고(서부대로: 천 안시 동남구 신방동에서 서북구 성성동까지 연 결되는 왕복 8차선 도로), 출·퇴근 높은 교통량 으로 인해 주변온도와 배기가스, 이산화탄소 등 많은 수목 생장에 악영향을 끼쳤을 것으로 판단 된다. 또한 도로에 인접한 산림의 경우 임연부 30m까지 식생활력도에 부정적인 영향을 크게 미치는 것으로 알려져 있다(Sung et al, 2018). 이에 도로와의 거리가 수목 수고 생장에도 영향 을 끼쳤을 것으로 사료된다. 태양복사에너지의 경우 광합성에 큰 영향을 미치는 요인으로서 높 은 태양복사에너지 따라 광합성의 속도가 증가 하고 이에 생장량이 증가 한 것으로 판단된다 (Lee et al, 2004). 그러나 그 정도가 작아 물리 적, 인위적인 영향 요인 외 도시림에서 수목 생 장량에 영향을 끼치는 다른 영향 요인에 대한

<sup>\*\*\*</sup>p < 0.001 \*\*p < 0.01 \*p < 0.05

 $<sup>^+</sup>$  In effective soil depth class 1 : under 20cm, 2 : 20~50cm, 3 : 50~100cm  $^{++}$  In Soil drain class 2 : Bad, 3 : slightly bad, 4 : good, 5 : very good

	Distance to TWI Road		Soil drain Effective soil depth		Slope	Altitude	Solar Radiation
Growth	0.076***	0.012	-0.009	0.006	-0.011	-0.013	0.057***

Table 3. Correlation between individual tree growth and environmental factor affecting the tree growth

연구가 필요하다. 도시림은 대기오염, 병충해 등보다 다양한 환경 변수들이 존재할 수 있으므로, 앞서 분석된 요인 외 도시림 수고생장 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

# V. 결 론

개체목 수고 생장량을 파악하고 수고 생장에 영향을 끼치는 요인을 파악하기 위해, 두 시기 항공 LiDAR 데이터를 활용하여 개체목을 추출 하였고 요인 별 생장량을 확인하였다. 유역기반 분할 알고리즘과 국부최대값 방법을 통해 추출 된 개체목을 검증하기 위해 봉서산 일부지역을 대상으로 10cm급 항공사진의 감독분류 결과와 비교하였다. 개체목이 영상판독에 의해 과추출 되었지만 상당히 높은 수준으로 지리적 정확도 를 보였다. 또한 숲틈지역 또는 비수목 및 관목 지역과 침엽수림 추출의 높은 정확도를 보였으 며, 광범위한 지역을 유역분할알고리즘을 이용 해 무감독 개체목 분류 방법을 적용한 연구로서 의의가 있다. 그러나 추후 연구에서는 현장조사 를 통해 개체목추출 방법에 정확하고 정량적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

개체목 단위 도시림 수고 생장량은 국립산림 과학원의 수고생장 지위곡선 생장량 보다 적은 0.2m/year로 분석되었다. 이는 도시에 고립된 수목들로 건강성이 다소 악화된 것으로 판단된다. 또한 CHM 평균 수고값 변화가 아닌 개체목 단위 생장량을 파악했으며, 수목의 수직생장에 대한 정확한 수고 생장량 분석결과라 사료된다. 수목 수고생장은 임상의 경급과 유효토심을제

외하고 다른 임상 및 토양특성에 대한 생장량은 통계적으로 유의미한 차이를 확인하지 못했다. 이는 대상지의 침엽수가 특정부분의 임상구분 과 토양특성에 집중되어 있어 도출된 결과로서, 임상과 토양특성이 세분화되어 조사 될 필요가 있다. 수목 생장량에 영향을 끼친 것으로 분석 된 환경요인은 도로와의 거리와 태양복사에너 지이다. 영향을 끼치는 정도가 작지만 통계적으 로 매우 유의한 관계를 확인하였다. 이는 물리 적, 인위적 영향요인 외 생장량에 영향을 끼치 는 다른 영향요인에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 소나무의 경우 생장량에 영향을 끼치 는 요인으로 식생구조와 토양pH, 유기물량, 이 화학성에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kim, 2003; Park, 1993; Park et al, 2017). 그러나 본 연구는 고해상도 항공정사영상을 통 해 리기다소나무만을 추출하여 분석하였기에, 추 후 연구에는 군락을 이루는 식생구조와 주변 수 목과의 관계를 파악하는 것이 중요하다. 또한 토 양 pH 및 총질소량 등과 같은 이화학성에 고려한 개체목 단위 수고생장량을 파악 할 필요가 있다.

본 연구에서는 항측회사에서 제공받은 LiDAR 데이터를 사용하여 생장량을 파악하였는데, 높이 값과 개체목 추출에 대한 현장 검증이 수행되지 않아 그 한계가 있다. 또한 두 시기 데이터의 점밀도 차이에서 오차가 발생할 수 있는 가능성이 있다. 그러나 두 시기의 LiDAR 데이터의 높이 값을 보정하기 위하여 동시에 탐지된 건물 옥상지점을통해 높이 차를 보완 하였다. 또한 10cm급 고해상도 정사영상의 영상판독을 통한 개체목 추출과비교·검증하여 한계를 극복하고자 하였다. 이후 개체목 추출과정에서도 과추정되거나 오차가 발

<sup>\*\*\*</sup>p < 0.001 \*\*p < 0.01 \*p < 0.05

견되었다. 이는 LiDAR 데이터의 점밀도가 각각 6.4points/㎡ 7.0points/㎡으로 수목의 최고지점을 반영하지 못하는 결과로, 더 높은 점밀도의 LiDAR 데이터가 필요하다. 도시생태계 내 수관밀도가 높은 도시산림에서는 산림정보 취득 목적으로 촬영된 LiDAR 데이터의 경우 적절한 점밀도가 보장되어야 한다. 또한 두 시기 데이터의 점밀도 차이에서 발생할 수 있는 오차에 대한 가능성도 추후 정량적으로 파악할 필요가 있다. 그러나 LiDAR 데이터와 항공정사영상, 두 데이터를 활용하여 기존의 정사영상만으로 추정 할 수 없었던 수고와 개체목을보다 정확하게 산출하였으며 광범위한 대상지에서도 적용가능한 방법이라 사료된다.

개체목 단위 수고생장 관련 연구가 부족한 국 내에서 자동화된 기법으로 개체목을 추출하고 수고 생장량을 분석하여 적용한 기초연구로서, 산림정보 취득에 활용될 수 있을 것이라 판단된 다. 개체목 단위의 산림정보를 통해 수목의 변 화를 보다 정밀하게 파악하여, 개체목단위 생태 복원이 가능할 것으로 사료된다. 또한 정밀임상 도의 숲틈과 같은 세부적인 산림정보와 수고와 같은 입체적인 정보를 축척하는데 활용될 수 있 다. 이를 통해 도시림 복원 및 관리와 산림 건강 성 평가 등 객관적인 수치를 통한 과학적인 자 료가 될 것이라 사료된다. 이에 더불어 도시림 수고생장에 미치는 요인들을 분석함으로서 개 체목 단위 수고생장에 교란요인들을 파악할 수 있었다. 개체목 단위의 수고생장량 분석에 대한 국내 첫 자료로서 접근이 어려운 산림 내에서 개체목 단위 분석과 보다 정확한 도시림의 건강 성 평가 및 관리가 가능할 것으로 판단된다.

## References

Ayrey, E. · S. Fraver. · J. A. Kershaw. · L. S. Kenefic. · D. Hayes. · A. R. Weiskittel and B. E. Roth. 2017. Layer Stacking: A Novel Algorithm for Individual Forest Tree

- Segmentation from LiDAR Point Clouds. Canadian Journal of Remote Sensing. 43(1): 16-27
- Beven, K. J and M. J. Kirkby. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrologic Science Bulletin. 24(1): 43-69
- Chen, Q. · D. Baldocchi. · P. Gong and M. Kelly. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using smallfootprint LiDAR data. Photogramm. Eng. Remote Sens. 72(8): 923 932.
- Cho, W. S. Y. J. Lee and Y. S. Jwa. 2003.

  Automatic Extraction of Building using Aerial
  Photo and Airborne LiDAR Data. Korean
  Journal of Remote Sensing. 19(4): 307-317.

  (in Korean)
- Choi, H. J. 2018. Estimation of the Urban Forest Growth Using Multi-temporal LiDAR Dataset Seoul National University Master Thesis. (in korean)
- Choi, J. Y. · S. Y. Kim. · H. M. Kim. · W. K. Son g. · J. Y. Lee. · W. T. Choi. · G. S. Moon. 2018. Analysis of Individual Tree Change Using Aerial Photograph in Deforested area Before and After Road Construction. J. Korean Env. Res. Tech. 21(4):65-73. (in korean)
- Clark, N. E. · R. Lovell. · B. W. Wheeler · S. L. Higgins · M. H. Depledge and K. Norris. 2014. Biodiversity, cultural pathways, and human health: a framework. Trends Ecol Evol 29(4): 198-204
- Hopkinson, C. · L. Chasmer and R. J. Hall. 2008.

  The uncertainty in conifer plantation growth prediction from multi-temporal LiDAR datasets. Remote Sensing of Environment. 112(3): 1168-1180.

- Jang, A. J · K. Y. Yu · Y. I. Kim and B. K. Lee. 2006. Estimation of Individual Tree and Tree Height using Color Aerial Photograph and LiDAR Data. Korean Journal of Remote Sesnsing. 22(6): 543-551. (in korean)
- Kim, D. Y·Y. W. Jang·Y. W. Choi·D. S. Baei and G. S. Cho. 2009. A Study on Forest Information Extraction using Airborne LiDAR Data. Korean Society of Civil Engineers Conference. Journal of cadastre and land informatix. 46(1): 87-100. (in korean)
- Kim. D. Y. 2010. Utilizing Airborne LiDAR to extract forest information. ChonBuK National University Master Thesis. (in korean)
- Kim, D. Y·Y. W. Choi·G. S. Lee. and G. S.
  Cho. 2016. Extracting Individual Number and Height of Tree using Airborne LiDAR Data.
  Journal of Cadastre & Land Informatix. 46(1)
  : 87-100
- Kim, H. S. 2003. A Study for the Comparison about the Growth Amount of Principal Kinds of Trees between the Urban Forest and the Natural Forest. Seoul university Master thesis. (in korean)
- Lee, C. H. · D. S. Choi. · S. W. Lee. · E. Y. Kim. · H. O. Jin. · J. H. Jeong. · C. Y. Lee and J. S. Oh. 2004. Growth and Photosynthetic rate of Pinus koraiensis and Pinus rigida in Banwol Industrial Region. J. Kor. For. En. 23(1): 19-25. (in korean)
- Lefsky, M. A. · W. B. Cohen and T. A. Spies. 2002. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. Canadian Journal of Forest Reaserch. 31(1): 78-87
- Ma, Q. · Y. Su and Q. Guo. 2017. Comparison of Canopy Cover Estimations From Airborne

- LiDAR, Aerial Imagery, and Satellite Imagery. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 10(9): 4225-4236
- Mahoney, C. · H. Chris. · N. Kijun and E. V. Gorsel. 2017. Estimating Canopy Gap Fraction Using ICESat GLAS within Australian Forest Ecosystems. Remote sensing. 9(1): 59
- National Institute of Forest Science. 2007. pitch pine(*Pinus rigida*) management plan.
- National Institute of Forest Science. 2016. Timber Biomass and Forest Harvest Report
- Nelson, R. F. · R. G. Oderwald and T. G. Gregoire. 1997. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass. Remote Sensing of Environment. 60(3): 311-326
- Korhonen, L. · I. Korpela. · J. Heiskanen and M. Maltamo. 2011. Airborne discrete-return LiDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. Remote Sensing of Environment. 115(4): 1065-1080.
- Norman, J. M. and G. S. Campbell. 1989. Canopy structure. Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation: 301-325
- Palenichka, R. · F. Doyon · A. Lakhssassi and M. B. Zaremba. 2013. Multi-scale segmentation of forest areas and tree detection in LiDAR images by the attentive vision method. IEEE J. 6(3): 1313 1323.
- Park, G. C. 1993. Relation of the physico-chemical properties of forest soil to site indices of Pinus koraiensis, Larix leptolepis, Pinus densiflora and Pinus densiflora for. erecta stands. Doctor's thesis, Gyeongsang Univ. (in korean)

- Park, S. G. · S. H. Hong and C. J. Oh. 2017. A
  Study on Correlation Between the Growth
  of Korean Red Pine and Location
  Environment in Temple Forests in
  Jeollanam-do, Korea. Korean J. Environ.
  Ecol. 31(4): 409-419. (in korean)
- Sung, W. G. · D. G. Lee and Y. H. Kim. 2018.

  Analyzing Difference of Urban Forest Edge
  Vegetation Condition by Land Cover Types
  Using Spatio-temporal Data Fusion Method.
  J. Environ. Impact Assess. 27(3): 279-290.
  (in korean)
- Vepakomma, U. · B. St-Onge and D. Kneeshaw. 2008. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal LiDAR data. Remote Sensing of Environment. 112(5): 2326-2340.
- Vepakomma, U · B. St-Onge and D. Kneeshaw. 2011. Response of a boreal forest to canopy

- opening: Assessing vertical and lateral tree growth with multi-temporal LiDAR data. Ecological Applications. 21(1): 99-121.
- Vincent, L. and P. Soille. 1991. Watersheds in digital spaces: an ecient algorithm based on immersion simulations. IEEE PAMI. 13(6): 583-598.
- Woo, C. S · J. S. Yoon · J. I. Shin and K. S. Lee. 2007. Automatic Extraction of Individual Tree Height in Mountainous Forest Using Airborne LiDAR Data. Korean Society of Forest Science. 96(3): 251-258. (in korean)
- Zhao, K and S. Popescu. 2009. LiDAR-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBONsatellite LAI product in a temperate forest of the southern USA. Remote Sensing of Environment. 113(8): 1628-1645