

영상 기반 3차원 점군과 FUSION S/W 기반의 임분고 분석 모듈 개발*

김경민^{1*}

Development of Mean Stand Height Module Using Image-Based Point Cloud and FUSION S/W*

Kyoung-Min KIM^{1*}

1)

요 약

최근 임상도의 신규 속성으로 임분의 평균 수고인 임분고를 추가하기 시작하였으나 전국 940만 개의 포인트를 스테레오 항공사진에서 수동 측정해야 하는 어려움이 예상된다. 아울러, 항공사진에서 수고 측정 시 임연부나 묘지 주변의 수고를 측정하기 쉬워 임분 대표성이 떨어지는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 고해상도 스테레오 항공사진에서 추출한 영상 기반 3차원 점군과 FUSION S/W를 활용한 임분고 추정 방법을 제안하고 임분고를 자동 분석할 수 있는 모듈을 개발하였다. 스테레오 항공사진에서 수치표면모델 3차원 점군을 추출한 후 지면점 필터링을 거쳐 수치지면모델을 추출하고 이 두 모델을 차분하여 정규수치표면모델을 제작하였다. 정규수치표면모델에서 표본점별 개체목 수관을 육안판독한 후 수관별 최고점을 추출하여 정규수치표면모델 수고를 산출하였다. 표본점에서의 실측 수고와 정규수치표면모델 수고의 RMSE를 분석한 결과 전체 표본점 평균 수고의 RMSE는 0.96m로 나타났다. 대상지 전체의 개체목 수고를 추출하기 위해 FUSION S/W를 이용하여 항공사진의 정규수치표면모델에서 개체목 수고를 자동 추출하고 이를 임상도의 임분 폴리곤 단위로 평균하여 최종 임분고를 산출하였다. 마지막으로 임분고를 보다 손쉽게 분석할 수 있는 환경을 구현하기 위해 임분고 분석 프로세스를 ArcGIS add-in 모듈 형태로 자동화하였다.

주요어 : 임분고, 영상기반 3차원 점군, 퓨전 소프트웨어, 스테레오 항공사진

ABSTRACT

Recently mean stand height has been added as new attribute to forest type maps, but it is often too costly and time consuming to manually measure 9,100,000 points

2016년 10월 6일 접수 Received on October 6, 2016 / 2016년 12월 12일 수정 Revised on December 12, 2016 / 2016년 12월 19일 심사완료 Accepted on December 19, 2016

* 본 연구는 디지털항공사진 기반 임분고 추정 방법에 대한 특허등록(제10-1595406호, 2016.02.12.)을 토대로 분석 및 개발 내용을 체계적으로 정리한 것임.

1 국립산림과학원 국제산림연구과 Division of Global Forestry, National Institute of Forest Science

*Corresponding Author E-mail : greenann@korea.kr

from countrywide stereo aerial photos. In addition, tree heights are frequently measured around tombs and forest edges, which are poor representations of the interior tree stand. This work proposes an estimation of mean stand height using an image-based point cloud, which was extracted from stereo aerial photo with FUSION S/W. Then, a digital terrain model was created by filtering the DSM point cloud and subtracting the DTM from DSM, resulting in nDSM, which represents object heights (buildings, trees, etc.). The RMSE was calculated to compare differences in tree heights between those observed and extracted from the nDSM. The resulting RMSE of average total plot height was 0.96 m. Individual tree heights of the whole study site area were extracted using the USDA Forest Service's FUSION S/W. Finally, mean stand height was produced by averaging individual tree heights in a stand polygon of the forest type map. In order to automate the mean stand height extraction using photogrammetric methods, a module was developed as an ArcGIS add-in toolbox.

KEYWORDS : Mean Stand Height, Image-Based Point Cloud, FUSION S/W, Stereo Aerial Photo

서론

임상도는 항공사진 및 위성영상 등의 원격탐사 자료를 판독하고 현지조사를 통하여 토지이용, 임종, 임상, 수종, 경급, 영급 및 소밀도 등을 표시한 대표적인 산림 주제도이다.

최근에는 임상도 대축척화 사업(2009~ 2012)을 통해 기존의 1:25,000 보다 정밀한 1:5,000 축척으로 제작되고 있다. 이러한 축척의 변화와 달리 속성 종류는 1972년 최초의 임상도가 제작된 이후 변화가 없어 수고, 임목축적 및 환경인자 등의 해외 임상도 속성과 비교할 때 좀 더 다양한 속성 개발이 필요하다. 특히, 수고는 임분의 입지 특성(site quality)을 나타내며 임목축적, 바이오매스 및 탄소저장량 등의 추정 시 기초 정보로 활용되는 중요한 산림 속성으로 임업 현장에서 요구도가 매우 높다.

수고를 측정하는 방법은 크게 2가지로 현장조사와 원격탐사 등이 있다. 현장조사의 경우, 정확도는 높지만 조사 비용 및 시간 소모가 크므로 대면적의 산림에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다(St-Onge and Achaichia, 2001). 대면적의 수고를 측정하기 위한 대안으로 원격

탐사를 고려할 수 있는데 항공 LiDAR와 항공 사진이 대표적인 자료원이다.

항공 LiDAR는 정확한 3차원 산림정보를 제공한다는 장점이 있는 반면 수종, 산림건강성과 같은 정성적인 산림정보 추출이 어려우며 촬영 비용이 크기 때문에 대면적에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 항공 LiDAR에서 추출한 3차원 산림 정보로부터 수고, 흉고단면적 및 재적 뿐 만 아니라(White *et al.*, 2013) 지상부 바이오매스를 추정하고(Englhart *et al.*, 2013; Ferdinant and Padmanaban, 2013; Ioki *et al.*, 2014) 지상부 탄소저장량과 같은 정량적 정보를 추정할 수 있다(Asner *et al.*, 2010; Asner *et al.*, 2012; Ota *et al.*, 2015). 반면, 항공 LiDAR는 정성적인 산림정보 추출이 어렵고 무엇보다 촬영 비용이 높아 대면적에 적용하기에는 한계가 있다(White *et al.*, 2013). Pflugmacher *et al.*(2014)은 항공 LiDAR를 이용하여 열대 우림의 탄소저장량을 정확하게 추정하는데 성공하였지만 높은 촬영비용으로 대면적 산림 모니터링에 확대 적용하기에 한계가 있음을 밝혔다.

항공사진의 경우, 항공 LiDAR에 비해 수직 정보의 정확도는 다소 떨어지지만 항공 LiDAR

에서 얻기 힘든 수중, 산림건강성 등 정성적인 산림정보를 함께 추출할 수 있고(St-Onge *et al.*, 2015) 항공 LiDAR에 비해 촬영 비용이 1/2~1/3로 저렴하면서 재적, 바이오매스와 같은 산림 중요 변수에 대해 항공 LiDAR와 유사한 정확도를 확보할 수 있으며, 특히 오랫동안 산림 분야에서 활용해오고 있는 자료이기 때문에 산림분야 연구자 및 산림관리자들에게 친숙하다는 장점이 있다(Stepper *et al.*, 2015b).

항공사진을 이용한 수고 측정은 수동 방식의 입체항공사진측량과 자동 방식의 영상기반 3D 점군(image-based point cloud) 등 2가지로 나눌 수 있다. 입체 항공사진측량은 산림분야에서 오랫동안 사용하고 있지만 숙련된 노동력과 많은 시간이 소요되며 작업자의 주관적 판단에 따른 오류가 발생할 수 있다(Meyer *et al.*, 1996; Anttila, 2005; Morgan *et al.*, 2010)은 한계를 가지고 있다.

최근 영상 품질, 알고리즘 및 컴퓨팅 파워의 발전으로 고해상도 항공사진으로부터 대면적의 높이 정보를 제공할 수 있는 영상 기반 점군의 활용 연구가 증가되고 있다(Ke and Quackenbush, 2011; Jämstedt *et al.*, 2012; Straub *et al.*, 2013; White *et al.*, 2013; Stepper *et al.*, 2015a). 점군은 3차원 좌표를 가지고 있는 점들로 불규칙하게 구성된 자료를 뜻하는데(NGI, 2012), 영상기반 3차원 점군은 스테레오 항공사진 또는 스테레오 위성영상에 대해 이미지 매칭(image matching) 기법을 적용하여 항공 LiDAR에서 추출되는 방식과 유사하게 수치표면모델(DSM, Digital Surface Model)을 추출할 수 있다(Wang and Boesch, 2007; Waser *et al.*, 2008a; Waser *et al.*, 2008b; Debella-Gilo *et al.*, 2013; Ota *et al.*, 2015). 항공사진에서 추출한 DSM은 이전의 전통적인 수동 입체판독보다 훨씬 정교하고 정확한 결과를 제공하며(White *et al.*, 2013) 수고, 간재적, 흉고단면적 및 임목축적 등을 정확하게 추정할 수 있는 잠재력을 지니므로(Bohlin *et al.*, 2012; Jämstedt *et al.*, 2012; Balenović *et al.*, 2015) 산림조사에 매우 유용하다(Rahlf *et al.*, 2014).

영상 기반 점군은 항공 LiDAR 보다 수관정보가 풍부하지는 않지만, 임목재적 예측 정확도는 거의 유사하게 제공한다(Bohlin *et al.*, 2012; Pitt *et al.*, 2014; Rahlf *et al.*, 2014; Rahlf *et al.*, 2015).

최근 캐나다, 스위스, 북유럽 등에서는 이러한 영상 기반 3차원 점군의 활용에 많은 관심을 가지고 있다(White *et al.*, 2013). 스위스의 경우, 고해상도 항공사진 기반 3차원 점군으로부터 추출한 DSM을 이용하여 스위스의 국가 산림자원조사에서 사용하는 산림의 정의를 충족하는 상세한 수준의 임상도를 제작하고 이러한 과정을 자동화하였다(Waser *et al.*, 2015). St-Onge *et al.*(2015)은 영상기반 3차원 점군을 이용하여 온대림의 수직 구조와 종조성을 분석한 바 있으며, Ota *et al.*(2015)는 항공사진으로부터 CHM(Canopy Height Model) 3차원 점군을 추출하고 수고와 수관밀도를 분석하여 지상부바이오매스를 추정하였다.

현재, 우리나라에서는 2015년부터 디지털 입체항공사진을 이용하여 한 임분 당 3분의 우세목 수고를 수동측정하고 이를 평균한 값을 2m 팔약으로 표시한 임분고(mean stand height)를 임상도의 신규 속성으로 제공하고 있다(Forest service, 2015). 하지만 현재의 방법은 항공사진에서 수고점(top)과 지면(bottom)이 잘 보이는 임도 주변이나 묘지, 임연부 주변 등에서 수고를 측정하기 쉬운 임분의 대표성을 띤다고 보기 어렵다. 또한, 전국 약 16,270매 임상도의 모든 임분 폴리곤별로 3개 지점을 찍을 경우 전국 약 940만개의 수고점을 수동으로 독취해야 하는 어려움이 예상된다.

따라서 본 연구에서는 임상도 제작 시 활용되는 스테레오 항공사진에서 추출한 영상 기반 3D 점군과 미국 산림청에서 산림부문의 LiDAR 데이터 활용성을 향상시키기 위해 개발한 프로그램인 FUSION S/W를 이용하여 임분고를 추출하는 체계적인 프로세스를 개발하고 임분고를 자동 분석할 수 있는 모듈을 개발하여 임상도 제작 시 임분고를 보다 과학적이고 효율적인 방법으로 취득하는데 목적이 있다.

연구 지역 및 자료

1. 연구 지역

본 연구의 대상지역은 강원도 홍천군 매화산 경영모델림 일대 25km²이다(그림 1).

매화산 경영모델림은 홍천군 홍천읍 외 3개 면에 걸쳐있는 6,953ha의 모델림으로, 북부지방 산림청에서 운영하는 국내 최초의 국유경영 모델림이다. 주요 수종은 인공림의 경우 잣나무, 낙엽송이며 천연림의 경우, 소나무 및 활엽수림이 우점하고 있다(표 1).

2. 디지털 항공사진 및 임상도

2013년 9월에 DMC 01-125 디지털 항공카메라로 촬영고도 2,350m, 촬영 횡중복도 50% 이상을 유지하며 GSD 25cm로 항공사진을 촬영하였다(표 2, 그림 2).

1:5,000 임상도는 디지털 항공사진 판독과 현지 임상조사 및 표준지 조사를 기초로 제작된 것으로 임종, 임상, 수종, 영급, 경급 및 수관밀도에 관한 정보를 담고 있다. 임상도의 속성은 임분 상층을 형성하고 있는 주림목의 수관점유면적을 기준으로 판단한다. 수관밀도의 경우, 교목의 수관점유면적이 50% 이하인 임분은

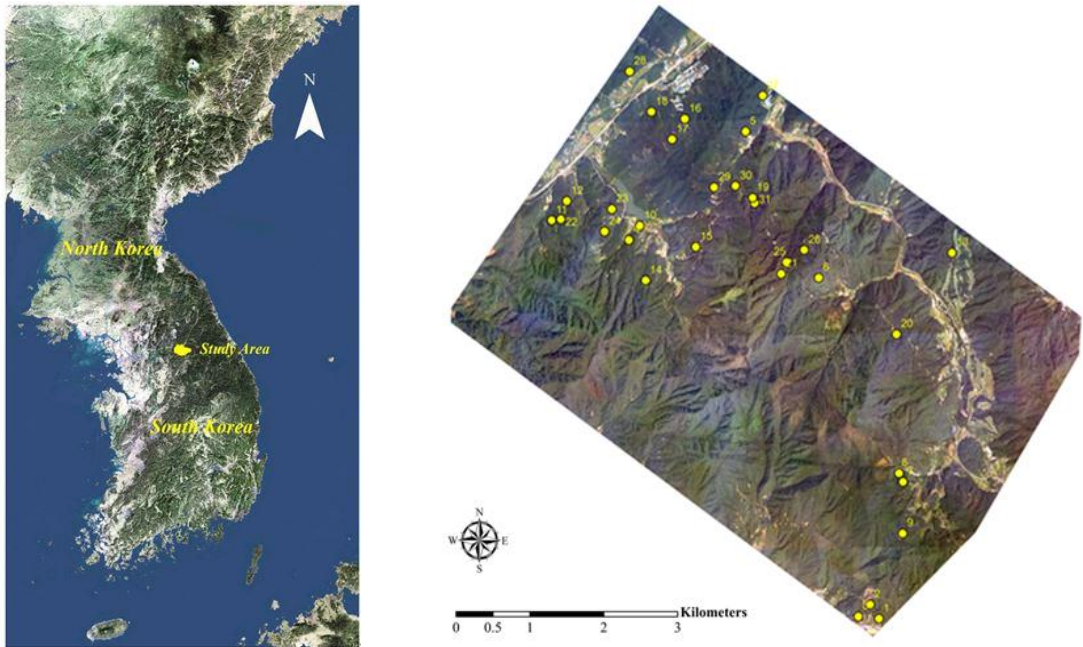


FIGURE 1. The location of study area(left) and sample plots(N=32, right)

TABLE 1. Forest characteristics of the study area

Major species		Area(ha)	Ratio(%)	Average height(m)	Crown density(%)
Artificial forest	<i>Pinus koraiensis Larix leptolepis etc.</i>	1,385	43	15	50~70
		1,342	42		
		474	15		
Natural forest	<i>Pinus densiflora broad leaves</i>	1,728	46	13	50~70
		2,024	54		

TABLE 2. Details of the digital aerial data used in this study

Acquisition date	Area(km ²)	Bands	Across-track overlap	Along-track overlap	GSD(cm)
2013.9.30	25	RGB	50%	60%	25

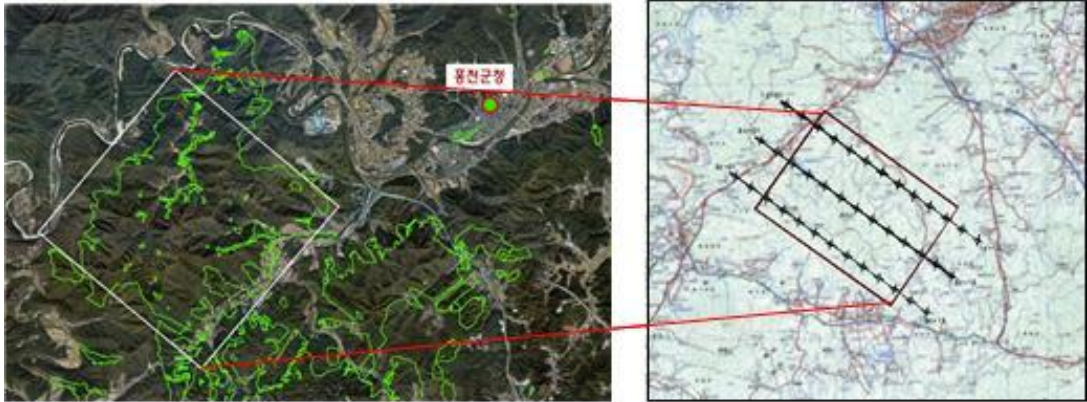


FIGURE 2. The flight plan overview

‘소’, 51%~70%인 임분은 ‘중’, 71% 이상인 임분은 ‘밀’ 등 3개 등급으로 구분하고 있다.

3. 현지조사 자료

영상 기반 3차원 점군으로부터 추정된 수고에 대한 정확도 평가를 위해 2014년 4월 및 5월 등 총 2회에 걸쳐 현지 실측 자료를 수집하였다. 매화산 경영모델링의 주요 수종인 잣나무, 낙엽송, 소나무 및 참나무류 등의 4개 수종을 3개 경급별로 층화하여 총 32개소의 표본점을

배치하였다(표 3, 그림 1(우)).

각 표본점은 반경 11.3m의 원형으로 구성되었으며 표본점 반경 내에 위치한 모든 개체목의 위치정보 수집을 위해 중심점으로부터의 거리와 각도를 측정하였으며, 수종, 흉고직경 및 수고 등의 조사 항목을 전수 조사하였다(표 4). 개체목 위치는 DGPS로 측정한 표본점의 중심좌표에서 방위각과 거리를 이용하여 좌표를 획득하였으며, 수고는 Haglof Vertex와 TruPulse를 이용하여 측정하였다(그림 3).

TABLE 3. Summary of stratified sampling(number of plots=32)

Type	Species	DBH class			Total
		6~18cm	18~30cm	30cm~	
Artificial forest	<i>Pinus koraiensis</i>	3	4	3	10
	<i>Larix leptolepis</i>	3	3	2	8
Natural forest	<i>Pinus densiflora</i>	3	3	3	9
	<i>Quercus spp.</i>	2	3		6
Total					32

TABLE 4. Details of field survey

Date	1st (2014.4.29.~5.1)	2nd (2014.5.19.~5.23)
Number of plots	32	
Type of sample plot	Circular(radius=11.3m)	
Inventory	Location of individual tree(distance, azimuth)	species, DBH, height



FIGURE 3. Field survey process

연구방법

디지털 스테레오 항공사진에서 임분고를 자동 추출하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 5단계의 과정을 거쳤다(그림 4).

1단계에서는 표정 등 전처리 과정을 거친 스테레오 항공사진을 이미지 매칭하여 DSM을 추출하고 3차원 수직정보를 포함하는 3차원 점군으로 변환한 후 필터링을 거쳐 수치지면모델(DTM, Digital Terrain Model)을 산출하였다. 두 모델을 차분하여 정규수치표면모델(nDSM, normalized Digital Surface Model)을 구하여 개체목 수고를 포함한 지형지물의 높이 정보를 추출하였다.

2단계에서는 항공사진 nDSM에서 개체목별로 수고를 추출한 후 정확도를 평가하기 위해 현지조사를 통해 취득한 표본점의 모든 개체목 수고를 표본점별로 평균한 표본점 평균 수고

(H_f)와 nDSM 기반 개체목 수고를 표본점별로 평균한 표본점 평균 수고(H_n)의 RMSE를 분석하였다. 여기서, H_n 는 표본점 내 개체목 수관을 육안 판독하여 생성된 원형의 수관 객체의 최고점을 추출하여 구하였다.

3단계에서는 개체목 수고의 추출 범위를 표본점에서 매화산 경영모델링 촬영지역 전체로 확장하기 위해, FUSION 프로그램의 CanopyModel 알고리즘을 이용하여 nDSM에서 수관을 자동 분할하고, CanopyMaxima 알고리즘을 이용하여 수관 내 최고점을 탐색하여 촬영지역 전체의 개체목 수고를 산출하였다.

4단계에서는 영상도에 임분고를 연결하기 위해 영상도의 임분 폴리곤별로 nDSM의 개체목 수고를 평균하여 최종적으로 임분의 평균수고인 임분고를 산출하였다.

임분고 모듈 개발 단계인 5단계에서는, 전체 임분고 분석 프로세스 중 다양한 프로그램을

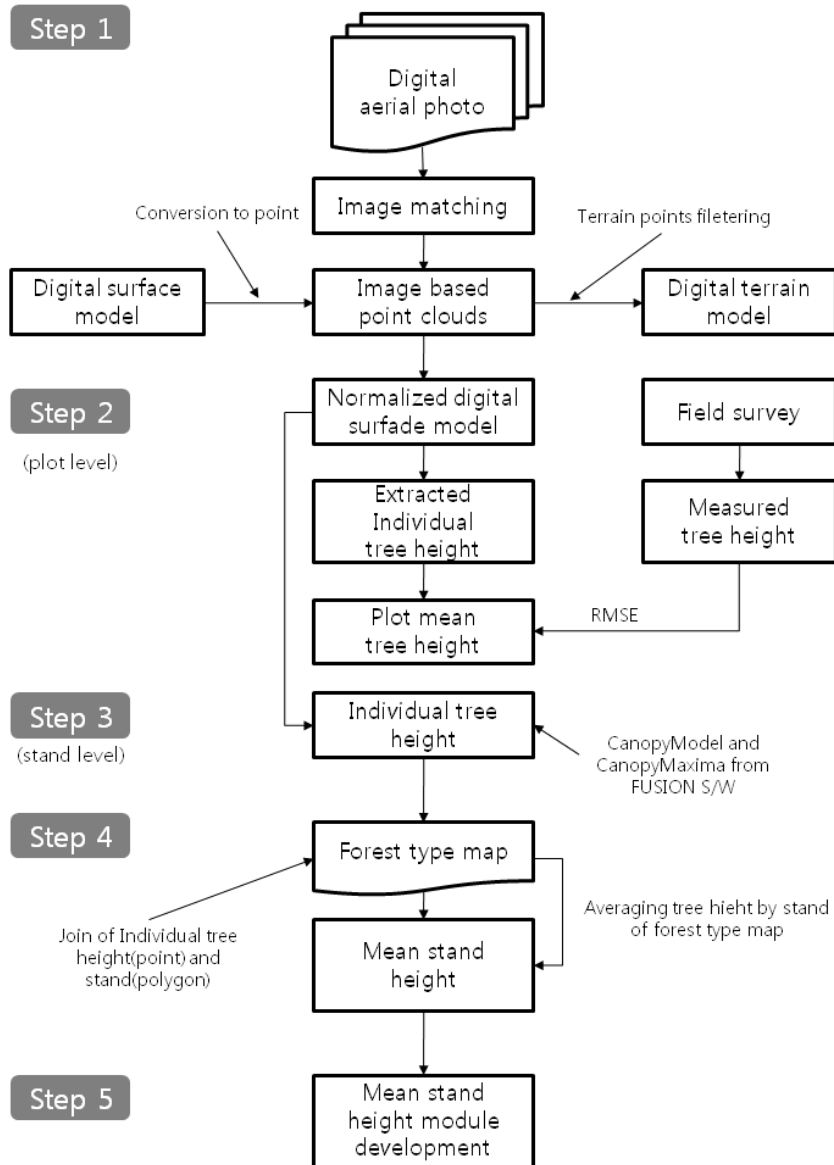


FIGURE 4. Work flow in this study

거쳐야 하는 수고 추출 3단계 및 임상도 임분고 정보 구축단계인 4단계를 범용 GIS S/W인 ArcGIS 상에서 간편하게 수행할 수 있도록 add-in 모듈을 개발하여 임분고 분석을 수행할 수 있도록 자동화하였다.

1. 영상 기반 3차원 점군을 활용한 nDSM 제작

입체항공사진의 DSM을 활용하여 임분고를 추정할 때 효율적으로 적용될 수 있는 DSM 3차원 점군의 적정 점밀도에 대한 Mun *et al.*(2014)의 선행실험연구를 토대로 본 연구에서는 3차원 점군의 점밀도를 16pt/m²로 선택하

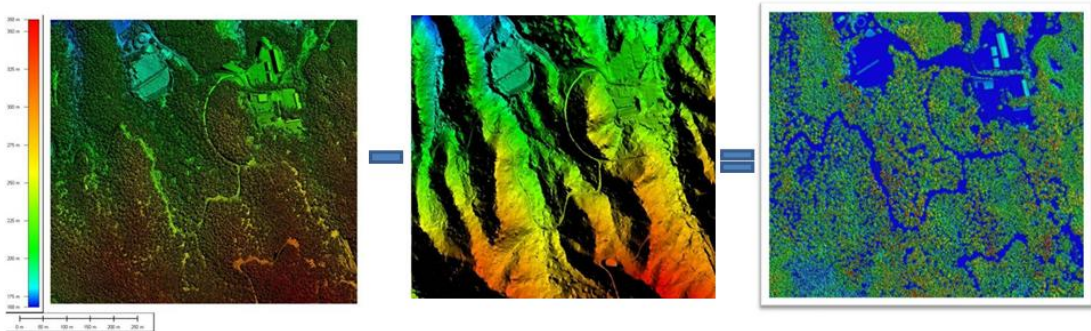


FIGURE 5. DSM(left), DTM(center) and nDSM(right)

였다. 이는 국토지리정보원에서 규정한 항공 LiDAR 기반의 DEM(1m×1m) 제작에 필요한 최소 점밀도 기준인 2.5 point/m²를 만족한다 (NGI, 2012).

DSM은 지면 및 인공지물, 식생과 같은 지표 피복물의 높이를 모두 포함한 반면, DTM은 DSM에서 지면의 높이와 다른 지표피복물에 해당하는 자료를 제거한 모델이다. nDSM은 DSM에서 DTM을 차분한 모델로 각 격자값은 개체목, 건물 등 feature의 높이를 나타낸다.

본 연구에서는 항공사진 촬영 성과품으로 제공받은 원시 DSM을 정제하여 사용하였다. 이 원시 DSM은 스테레오 영상을 이미지 매칭하여 제작한 것으로 본 연구에서는 원시 DSM을 Global Mapper V10.0을 이용하여 las 포맷의 포인트로 변환하여 영상기반 3차원 점군을 생성하고 MicroStation Terra를 이용하여 노이즈를 제거하여 정제된 DSM을 취득하였다.

이 정제된 DSM에서 지면점을 분류하여 DTM을 추출하였다. DSM과 DTM은 Global Mapper에서 래스터 형태의 img 포맷으로 변환하였다. 마지막으로, ERDAS IMAGINE V. 14.0을 이용하여 DSM 및 DTM의 차분 연산을 수행하고, 수고 및 건물 높이 등의 지형지물 높이 정보를 포함하는 nDSM을 생성하였다(그림 5).

2. nDSM 기반 표본점 임분고 및 RMSE 분석

현장에서 취득한 개체목의 위치 데이터를 항

공사전에 중첩하고 개체목별 수관 경계를 육안 판독하여 수관 경계를 인식할 수 있는 원형 객체를 제작하였다. 이 수관경계 객체와 nDSM을 중첩하여 수관경계 내 최고점을 해당 개체목의 수고로 추출하고 최종적으로 다음 식 (1)과 같이 현지 실측 수고와의 차이를 비교하여 표본점별 평균 수고의 RMSE를 구하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_f - H_n)^2}{n}} \quad (1)$$

여기서, n 은 표본점별 개체목 개수, H_f 는 실측 수고, H_n 는 nDSM기반 수고를 뜻한다.

3. FUSION S/W 기반의 대상지역 전체 개체목 수고 추출

개체목 수고의 추출 범위를 표본점에서 매화산 경영모델링 촬영지역 전체로 확장하기 위해 FUSION S/W를 활용하였다. FUSION 소프트웨어는 미국 산림청(The Forest Service of the U.S. Department of Agriculture) 산하의 원격탐사응용센터(Remote Sensing Application Center)에서 개발한 산림부문 LiDAR 분석 및 시각화 프로그램이다(Mcgaughey, 2015; Park *et al.*, 2016). 미국 산림청 식생모니터링 및 원격탐사팀이 위치한 워싱턴 대학 홈페이지(<http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>)에서

무료로 다운로드 가능하며 범용 GIS 소프트웨어인 ArcGIS와의 호환성을 확보하고 있어 LiDAR 분석 결과를 ArcGIS에서 활용하기 용이하다. LiDAR 자료와 FUSION 소프트웨어를 이용하여 개체목의 위치, 수고, 바이오매스 측정, 산림탄소조사, 연료량 추정 및 산림조사 등에 활용된 바가 있으며(Erdody and Moskal, 2010; Edson and Wing, 2011; Bright *et al.*, 2012, Stephens *et al.*, 2012) 국내에서는 Park *et al.*(2016)이 LiDAR DEM의 정확도를 분석한 사례가 있다.

본 연구에서는 FUSION Ver 3.42의 Canopy Maxima 알고리즘을 활용하여 수관별 높이 정보를 가지고 있는 nDSM으로부터 수관표면모델을 만들고 수관별 최고점(top height point)의 좌표와 수고값을 추출하였다. FUSION은 입력자료인 nDSM에 대해 "DTM"이라는 고유포맷을 활용하므로 img 포맷의 nDSM파일을 ASCII로 변환하고 FUSION에서 ASCII2DTM 알고리즘을 이용하여 DTM 포맷으로의 nDSM의 파일 변환 과정을 거쳤다. CanopyMaxima 알고리즘의 수행 결과인 개체목별 수고 파일은 csv 포맷으로 저장되므로 이를 ArcGIS에서 point 형태의 shp 포맷으로 변환하였다.

4. 임상도 임분고 연결

임상도의 신규 속성으로 임분고를 추가하기 위해 ArcGIS에서 임상도의 임분 폴리곤별로 nDSM에서 추출된 수고값을 평균하여 평균 임분고를 추가하고 임분고를 등급화하여 임분고 등급정보를 추가한다. 즉, nDSM 기반 개체목 수고 포인트 파일을 임상도의 임분 폴리곤에

조인하며 이때 point to polygon의 옵션으로 포인트의 평균 요약값을 폴리곤에 조인하는 방식을 선택하였다. 이후 임상도에 임분고 필드를 추가하고 Field Calculator로 임분고 필드에 nDSM 기반 임분고를 할당하여 임상도에 임분고를 추가하는 과정을 완료하였다.

5. 임분고 자동분석모듈 개발

스테레오 항공사진에서 nDSM을 추출하고 임분고를 추정하는 전 과정이 수행 가능하도록 충분한 기능을 보유한 단일 프로그램이 없기 때문에 Erdas, Microstation Terra, FUSION, Global mapper 및 ArcGIS 등 다양한 프로그램을 번갈아 가며 사용해야 하는 어려움이 존재하므로 향후 임상도 사업 적용 시 작업자 불편을 야기할 수 있을 것으로 예측된다(표 5). 따라서 임상도 제작 시 임분고 속성 추가를 효율적으로 수행할 수 있도록 스테레오 항공사진에서 추출된 nDSM에서 임분고를 추정하여 임상도 속성 정보로 자동 입력할 수 있는 단일 모듈 개발을 추진하였다.

nDSM기반 수고 추출 시 사용한 FUSION S/W의 경우 사용자가 command 창에서 직접 프로그램과 환경변수를 입력해야 하며, 추출된 수고점을 다시 ArcGIS 상에서 point 기반 Feature 데이터로 변환하고 사용자가 직접 임분고 필드 추가와 평균값을 계산하는 스크립트식을 입력하여야 하는 어려움이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 사용자가 별도로 명령어를 입력하지 않고 ArcGIS에서 FUSION 프로그램을 내부 호출하여 nDSM에서 개체목 수고점 포인트 파일을 자동 생성하는 수고 추출 자동화

TABLE 5. S/W in each process

Process	S/W
Generation of DSM	ERDAS Imagine & LPS
Point cloud conversion	Global Mapper
Point cloud classification and generation of DTM	Microstation Terra
Generation of nDSM	ERDAS Imagine
Extraction of individual tree height	FUSION
Analysis of mean stand height	ArcGIS

기능과 추출된 수고를 임분 단위로 평균한 임분고를 추가하고, 라벨링 및 임분고의 등급을 분류하는 임분고 분석 자동화 기능 등을 포함하는 add-in 모듈을 개발하였다.

연구 결과

스테레오 항공사진을 이미지 매칭하여 DSM을 추출하고, 이를 3차원 점군으로 변환한 결과는 그림 6과 같다. 16 points/m²의 높은 점밀도로 세밀하게 추출한 결과, 수관의 구조가 개체목별로 잘 구분되고 있음을 확인할 수 있었다. 잣나무 임분인 plot 17의 경우, 약간 경사진 지면에서 6개의 대경목이 현지에서 조사되었는데(그림 6, 위), 3차원 점군에서 이러한 개체목별 수관과 경사진 지면이 잘 관찰되었다(그림 6, 아래).

이 DSM 3차원 점군에서 지면점을 재분류하

여 DTM을 추출하고 두 모델을 래스터로 변환한 후 차분 연산을 수행하여 nDSM을 제작하였다(그림 7).

nDSM 기반 수고를 평가하기 위한 현지조사 결과는 표 6과 같이 요약하였다. 이상치 7개소를 각각한 총 25개소의 표본점 중 잣나무 표본점 8개, 소나무 표본점 5개, 낙엽송 표본점 7개 및 참나무류 표본점은 5개소이며 각 수종별 수고범위를 살펴볼 때 낙엽송, 잣나무, 소나무, 참나무류 순으로 수고가 높았다.

전체 표본점에서 조사한 개체목의 수관 경계 feature를 생성하기 위해 현지 조사한 개체목 위치 좌표를 참조하고(노랑색 점) 반경 11.3m의 표본점(빨강색 원)내에 포함된 개체목을 항공사진에서 육안 판독하여 수관 경계(노랑색 원)를 분할하였다(그림 6, 위). ArcGIS를 이용하여 이 수관경계 내 최고점을 nDSM으로부터 추출하여 최종적인 개체목 수고를 획득하고 표

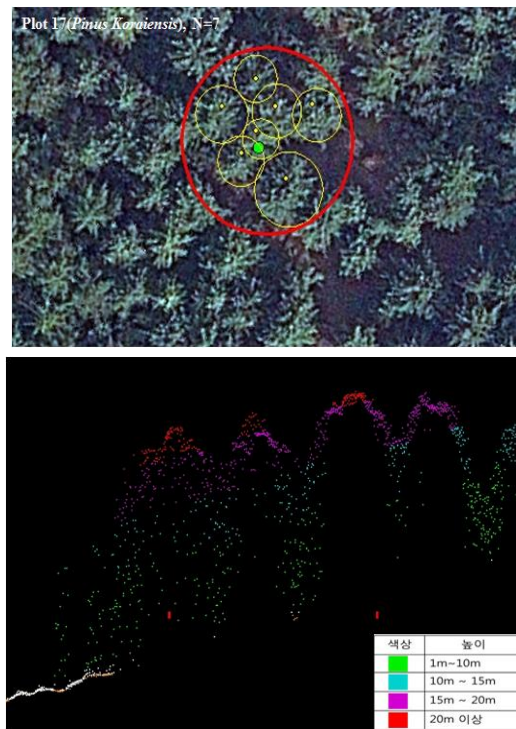


FIGURE 6. Profile of image-based point cloud in plot 17

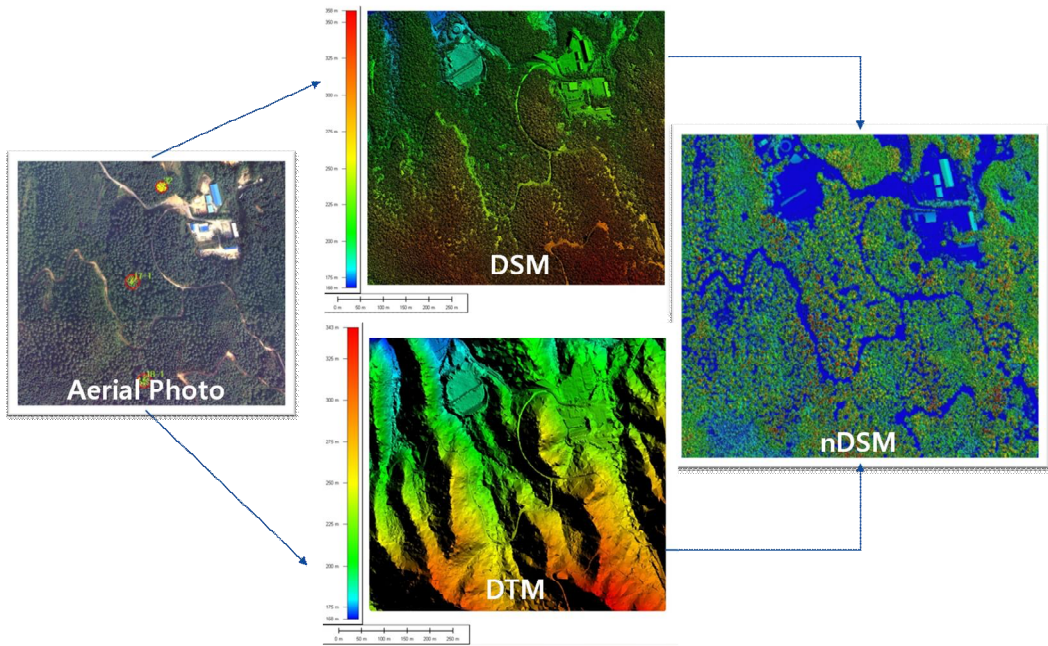


FIGURE 7. nDSM extraction from differencing between DSM and DTM of stereo aerial photos

TABLE 6. Summary of field measurements

Species	Number. of plots	Height(m)
<i>Pinus koraiensis</i>	8	11.5~23.2
<i>Larix leptolepis</i>	7	14.2~24.5
<i>Pinus densiflora</i>	5	10.0~17.8
<i>Quercus spp.</i>	5	11.0~17.2

본점 단위의 평균 임분고를 산출하였다.

표본점별 nDSM 수고와 실측 수고와의 차이에 대한 RSME 분석 결과, RMSE 범위는 0.63m~2.65m 이며 전체 표본점별 수고 평균에 대한 RMSE는 0.96m로 분석되었다(그림 8). 현재 임상도의 임분고가 2m 관약으로 입력됨을 고려할 때 한 임분당 3지점의 개체목 수고를 측정하는 기존의 임상도 임분고 수동 측정공정을 임분고 자동모듈 활용으로 대체 가능함을 확인할 수 있었다. FUSION S/W를 이용하여 매화산 경영모델링 전체 개체목 수고를 자동 추출하였으며 이를 임상도 임분 단위로 평균하여 임상도에 추가하였다.

이상의 과정을 자동화한 임분고 분석 모듈을

구동하기 위한 필수 프로그램은 3가지로, FUSION S/W, ArcMap, 임분고 추출도구 툴박스 모듈 등이다. 임분고 분석 모듈은 범용 GIS S/W인 ArcGIS의 툴박스 형태로 개발되어 ArcGIS의 Add toolbox 다이얼로그창에서 바로 add-in이 가능하다.

임분고 분석 모듈은 크게 두 가지의 기능으로 구성되어 있다(그림 9). 첫 번째 기능은 수고 추출 기능으로 기존에는 nDSM에서 개체목별로 수고를 추출할 때 FUSION 프로그램을 이용하는 데, 이때 MS-DOS 환경의 명령어를 입력해야 하는 불편함이 따른다. 또한, FUSION 프로그램에서 필요로 하는 파일 포맷으로 nDSM 자료를 변환해야 하는데, ASCII 타입의 nDSM 파일을 입력하여 canopy surface model(*.dtm)

로 변환하고 CanopyMaxima 명령어를 이용하여 개체목별 수고점 위치좌표와 수고값을 지닌 수고파일(*.csv)을 생성한 후 최종적으로 text 파일 형태의 수고파일을 포인트 파일로 변환하는 일련의 복잡한 과정을 거친다. 본 연구에서

는 진술한 수고 추출의 복잡한 과정을 수고추출도구로 자동화하여 사용자가 별도로 명령어를 입력하지 않고 ArcGIS에서 FUSION 프로그램을 내부 호출하여 nDSM에서 개체목 수고점 포인트 파일을 자동 생성할 수 있다. 두 번

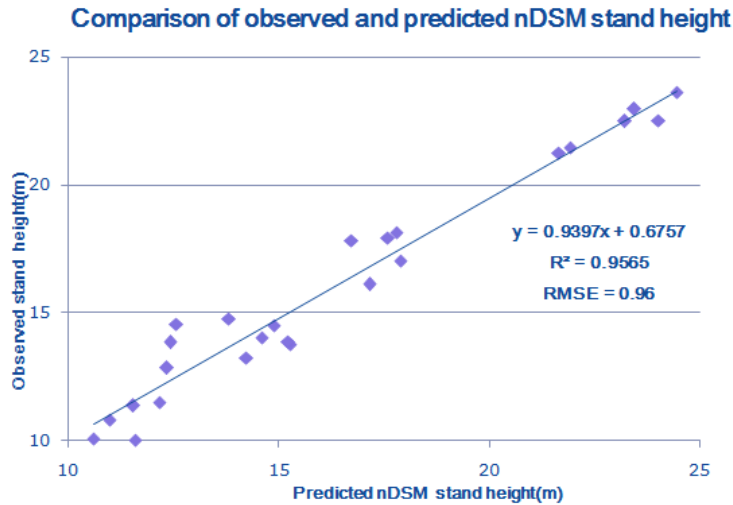


FIGURE 8. Comparison of observed vs. nDSM based stand height

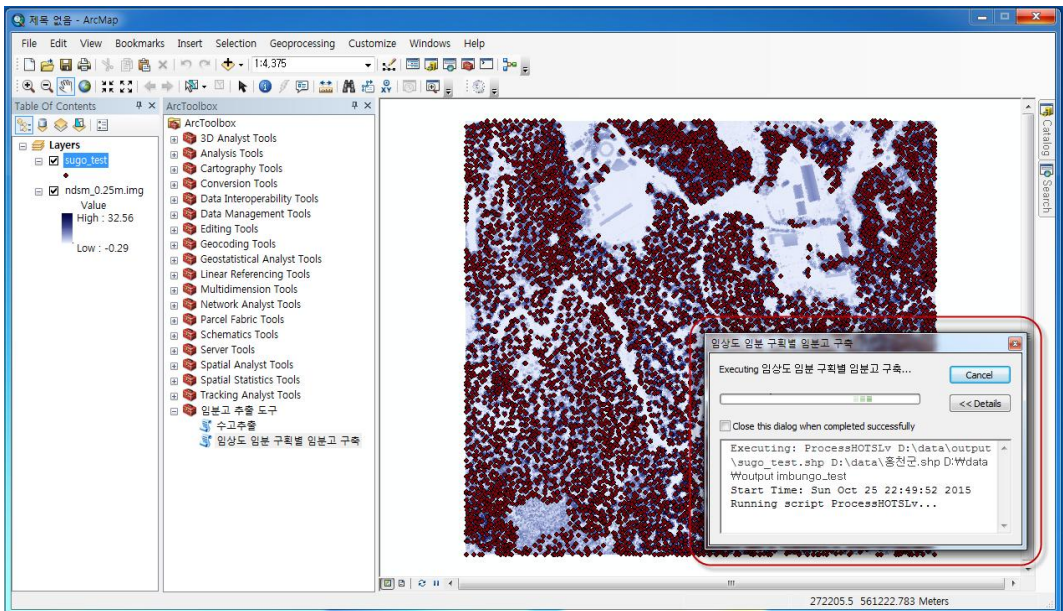


FIGURE 9. Mean tree height process by stand

제 기능은 임분 구획별 임분고 분석 기능으로 기존에는 Spatial Join을 이용하여 임상도와 수고점 shp 파일을 point to polygon 방식으로 조인한 후 임상도의 임분 폴리곤에 떨어지는 수고점의 수고값을 평균하여 임분고를 계산한다. 임상도에 임분고가 추가되면 임분고 필드를 토대로 임분고 라벨링과 임분고 등급을 분류하였다. 본 연구에서는 전술한 수고 추출의 복잡한 과정을 임분고 추출도구로 자동화하여 임상도 속성정보 테이블에 FUSION에서 추출한 수고 데이터 및 이를 임분 단위로 평균한 임분고를 추가하고, 라벨링 및 임분고 등급 분류 등 일련의 과정을 자동 수행할 수 있는 제작 환경을 구현하였다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 강원도 홍천군 매화산 경영모텔림을 대상으로 고해상도 스테레오 항공사진(25cm GSD)을 이미지 매칭하고 영상기반 3차원 점군을 생성하여 항공 LiDAR가 제공하는 수직 정보와 유사한 nDSM을 추출하였다. 이 nDSM으로부터 미국 산림청이 제공하는 FUSION 프로그램을 이용하여 개체목 수고를 추출하고 임상도의 임분 폴리곤별로 개체목 수고를 평균하여 임분고를 산출하였다. 총 25개 표본점에서 측정된 577개 개체목의 수고값을 토대로 표본점 평균 수고의 RMSE를 분석한 결과, nDSM 기반 평균 수고의 RMSE는 0.96m로 1m 이하의 정확도를 나타내었다. 따라서, 대면적 임상도의 신규 속성으로 임분고를 추가할 때 본 연구에서 제안한 영상기반 3차원 점군 기법을 이용한다면, 현재와 같은 노동집약적인 아날로그 방식의 수고 독취보다 객관적이며 효율적으로 임분고를 추가할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 효과적으로 수행하기 위하여 스테레오 항공사진 기반의 nDSM과 임상도를 이용하여 임분고를 추출하는 일련의 복잡한 프로세스를 ArcGIS add-in 모듈 형태로 자동화하여 임분고를 보다 손쉽게 취득하고 임상도를 고도화할 수 있는 제작 환경을 구현하였다.

아울러 본 연구에서 제안한 영상기반 3차원 점군 기법을 항공사진과 유사한 고해상도의 GeoEye나 WorldView와 같은 스테레오 위성 영상에 적용할 경우, 항공사진 촬영이 불가능한 남북접경지역의 수고 정보, 더 나아가서는 북한 지역 산림의 수고 정보도 해석이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 임분고 분석 프로세스(특허등록번호 제10-1595406호, 2016.02.12.)와 분석 모듈(프로그램 등록번호 제C-2016-009309호, 2016.04.19.)은 올해 6월 북한산림지역 해석을 위해 국방부에 기술이전 되었다.

그러나 미국 산림청이 제공하는 FUSION S/W를 이용하여 nDSM에서 개체목 수고점을 추출하였기 때문에 우리나라 산림의 수종 특성에 더욱 부합하는 수고점을 추출하기 위해서는 FUSION 알고리즘을 보다 면밀하게 해석하여 국내 환경에 맞게 수정하여 활용할 필요가 있을 것으로 예상된다. 또한, 항공사진 영상기반 3차원 점군은 밀도가 높은 임분의 경우 지표면의 높이값을 정확하게 확인하기가 어렵다는 한계가 있다. 따라서 정확도를 더욱 높이기 위해서는 DTM의 정확도가 높아야 하는데, 항공 LiDAR DTM이 이에 대한 대안이 될 수 있다(Ota *et al.*, 2015). 현재, 덴마크, 네덜란드, 스위스, 핀란드 및 스웨덴 등 많은 유럽 국가에서는 국가 규모의 항공 LiDAR DTM을 제공하고 있다(White *et al.*, 2013). 향후 우리나라 전 지역의 LiDAR DTM이 구축될 경우, 항공사진 기반 DSM과 함께 융합한다면 시계열적인 DSM을 손쉽게 구하고 정확한 DTM을 활용할 수 있으므로 보다 정확한 산림의 3차원 정보 추정이 가능해질 것으로 판단된다.

국립산림과학원은 1970년대부터 약 40년 동안 국토 전 지역을 주기적으로 촬영한 항공사진을 보유하고 있으며 이는 현재 DB로 구축되어 있다. 본 연구에서 제안한 임분고 분석 프로세스와 분석 모듈은 UN이 인정한 녹화성공국인 우리나라 산림의 40년 동안의 정량적인 변화를 보다 손쉽게 해석하는데 응용할 수 있다. 나아가 북한 산림 지역에 적용한다면, 아직 황

폐되지 않고 남아 있는 우수한 산림지역을 탐색하고 산림자원량 해석에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

현지조사에 참여해주신 김철민, 정영교, 강진택, 류주형, 김소라 박사님, 임정호 교수님 그리고 자료 분석에 도움을 준 문건수님에게 깊은 감사의 뜻을 전합니다. [KAGIS](#)

REFERENCES

- Anttila, P. 2005. Assessment of manual and automated methods for updating stand-level forest inventories based on aerial photography. Ph.D Thesis, University of Joensuu, Joensuu, Finland. p.42.
- Asner, G.P., G.V.N. Powell, J. Mascaro, D.D. Knapp, J.K. Clark, J. Jacobson, T. Kennedy-Bowdoin, A. Balaji, G. Paez-Acosta, and E. Victoria. 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA.* 107(38):16738-16742.
- Asner, G.P., J. Mascaro, H.C. Muller-Landau, G. Vieilledent, R. Vaudry, M. Rasamoelina, J.S. Hall, and M. van Breugel. 2012. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia* 168:1147- 1160.
- Balenović , I., A. Seletković, R. Pernar, and A. Jazbec. 2015. Estimation of the mean tree height of forest stands by photogrammetric measurement using digital aerial images of high spatial resolution. *Annals of Forest Research.* 58(1):125-143.
- Bohlin, J., J. Wallerman, and J. Fansson. 2012. Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(7):692-699.
- Bright, B.C., J.A. Hicke, and A.T. Hudak. 2012. Estimating aboveground carbon stocks of a forest affected by mountain pine beetle in Idaho using lidar and multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment* 124:270-281.
- Debella-Gilo, M., K. Bjørkelo, J. Breidenbach, and J. Rahlf. 2013. Object-based analysis of aerial photogrammetric point cloud and spectral data for land cover mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Hannover Workshop 2013, Hannover, Germany, May. 21-24, 2013. XL-1/W1, pp.63-67.*
- Edson, C. and M.G. Wing. 2011. Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) for Individual Tree Stem Location, Height, and Biomass Measurements. *Remote Sensing* 3(11):2494-2528.
- Englhart, S., J. Jubanski, and F. Siegert. 2013. Quantifying dynamics in tropical peat swamp forest biomass with multi-temporal LiDAR datasets. *Remote Sensing* 5(5):2368-2388.
- Erdody, T. and L.M. Moskal. 2010. Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels. *Remote Sensing of Environment* 114(4):725-737.
- Ferdinant, J. and R.C. Padmanaban. 2013. Development of a methodology to estimate biomass from tree height using airborne

- digital image. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* 2(1):49-58.
- Forest Service. 2015. Action plan of forest type map update project(2015~2019) (산림청. 2015. 임상도 현황화 구축사업 추진계획(2015~2019)).
- Ioki, K., S. Tsuyuki, Y. Hirata, M.-H. Phua, W.V.C. Wong, Z.-Y. Ling, H. Saito, and G. Takao. 2014. Estimating above-ground biomass of tropical rainforest of different degradation levels in Northern Borneo using airborne LiDAR. *Forest Ecology and Management* 328:335-341.
- Jämstedt, J., A. Pekkarinen, S. Tuominen, C. Ginzler, M. Holopainen, and R. Viitala. 2012. Forest variable estimation using a high-resolution digital surface model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 74:78-84.
- Ke, Y. and I.J. Quackenbush. 2011. A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 32(17): 4725-4747.
- McGaughey, R.J. 2015. FUSION/LDV : Software for LiDAR data analysis and visualization. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Seattle, W.A., USA. p.175.
- Meyer, P., K. Staenz, and K.I. Itten. 1996. Semi-automated procedures for tree species identification in high spatial resolution data from digitized colour infrared-aerial photography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 51(1):5-16.
- Morgan, J.L., S.E. Gergel, and N.C. Coops. 2010. Aerial photography: A rapidly evolving tool for ecological management. *BioScience* 60(1):47-59.
- Mun, G.S., K.M. Kim, and C.M. Kim. 2014. A Comparative study of point cloud density for stand height modeling using digital aerial photo. *Proceedings of the KSRS Fall Conference 2014*. pp.156-159 (문건수, 김경민, 김철민. 2014. 디지털 항공사진 기반 임분고 모델링을 위한 포인트 클라우드 점밀도 비교 연구. 2014 대한원격탐사학회 추계학술발표논문 초록집. 156-159쪽).
- NGI(National Geographic Information Institute). 2012. Airborne laser survey regulations (국토지리정보원. 2012. 항공레이저 측량 작업규정(고시 제2012-1669호)).
- Ota, T., M. Ogawa, K. Shimizu, T. Kajisa, N. Mizoue, S. Yoshida, G. Takao, Y. Hirata, N. Furuya, T. Sano, H. Sokh, V. Ma, J. Toriyama, Y. Mouda, Hi. Saito, Y. Kiyono, So. Chana, and N. Ket. 2015. Aboveground biomass estimation using structure from motion approach with aerial photographs in a seasonal tropical forest. *Forests* 6(11):3882-3898.
- Park, J.W., H.T. Choi, and S.W. Cho. 2016. A study on the effects of airborne LiDAR data-based DEM-generating techniques on the quality of the final products for forest areas-focusing on GroundFilter and GridsurfaceCreate in FUSION Software-. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(1):154-166 (박주원, 최형태, 조승완. 2016. 항공 LiDAR 자료기반 DEM 생성기법의 산림지역 최종산출물 품질에 미치는 영향에 관한 연구-FUSION Software 의 GroundFilter 및 GridsurfaceCreate 알

- 고리즘을 중심으로-. 한국지리정보학회지 19 (1): 154-166).
- Pflugmacher, D., W.B. Cohen, R.E. Kennedy, and Z. Yang. 2014. Using landsat-derived disturbance and recovery history and LiDAR to map forest biomass dynamics. *Remote sensing of Environment* 151:124-137.
- Pitt, D.G., M. Woods, and M. Penner. 2014. A comparison of point clouds derived from stereo imagery and airborne laser scanning for the area-based estimation of forest inventory attributes in Boreal Ontario. *Canadian Journal of Remote Sensing* 40(3):214-232.
- Rahlf, J., J. Breidenbach, S. Solberg, E. Naesset, and R. Astrup. 2014. Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation. *Remote Sensing of Environment* 155:325-333.
- Rahlf, J., J. Breidenbach, S. Solberg, and R. Astrup. 2015. Forest parameter prediction using an image-based point cloud: a comparison of semi-ITC with ABA. *Forests* 6:4059-4071.
- Stephens, P.R., M.O. Kimberley, P.N. Beets, T.S.H. Paul, N. Searles, A. Bell, C. Brack, and J. Broadley. 2012. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. *Remote Sensing of Environment* 117:348-357.
- Stepper, C., C. Straub, and H. Pretzsch. 2015a. Assessing height changes in highly structured forest using regularly acquired aerial image data. *Forestry* 88:304-316.
- Stepper, C., C. Straub, and H. Pretzsch. 2015b. Using semi-global matching point clouds to estimate growing stock at the plot and stand levels: Application for a broadleaf-dominated forest in central Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 45(1):111-123.
- St-Onge, B. and N. Achaichia. 2001. Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Annapolis, MD, Oct. 22-24, 2001. Vol. XXXIV-3/W4, pp.131-137.
- St-Onge, B., F.-A. Audet, and J. Bégin. 2015. Characterizing the height structure and composition of a boreal forest using an individual tree crown approach applied to photogrammetric point clouds. *Forests* 6(11):3899-3922.
- Straub, C., C. Stepper, R. Seitz, and L.T. Waser. 2013. Potential of UltraCamX stereo images for estimating timber volume and basal area at the plot level in mixed European forests. *Canadian Journal of Forest Research* 43(8):731-741.
- Wang, Z. and R. Boesch. 2007. Color- and texture-based image segmentation for improved forest delineation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(10):3055-3062.
- Waser, L.T., E. baltsavias, K. Ecker, H. Eisenbeiss, E. Feldmeyer-Christe, C. Ginzler, M. Küchler, and L. Zhang. 2008a. Assessing changes of forest area and shrub encroachment in a mine ecosystem using digital surface models and aerial images. *Remote Sensing of Environment* 112(5):1956-1968.

- Waser, L.T., E. Baltsavias, K. Ecker, H. Eisenbeiss, C. Ginzler, M. Küchler, P. Thee, and L. Zhang. 2008b. High-resolution digital surface models(DSMs) for modelling fractional shrub/tree cover in a mine environment. *International Journal of Remote Sensing* 29(5):1261–1276.
- Waser, L.T., C. Fischer, Z. Wang, and C. Ginzler. 2015. Wall-to Wall Forest Mapping Based on Digital Surface Models from Image-Based Point Clouds and a NFI Forest Definition. *Forests* 6(12):4510–4528.
- White, J.C., M.A. Wulder, M. Vastaranta, N.C. Coops, D. Pitt, and M. Woods. 2013. The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests*. 4(3):518–536. **KAGIS**