

3차원 포인트 클라우드 기반 복셀화에 의한 식생의 물리적 구조 재구현

안명희* · 장은경** · 배인혁*** · 지 운****

Ahn, Myeonghui* · Jang, Eun-kyung** · Bae, Inhyeok*** · Ji, Un****

Reconfiguration of Physical Structure of Vegetation by Voxelization Based on 3D Point Clouds

ABSTRACT

Vegetation affects water level change and flow resistance in rivers and impacts waterway ecosystems as a whole. Therefore, it is important to have accurate information about the species, shape, and size of any river vegetation. However, it is not easy to collect full vegetation data on-site, so recent studies have attempted to obtain large amounts of vegetation data using terrestrial laser scanning (TLS). Also, due to the complex shape of vegetation, it is not easy to obtain accurate information about the canopy area, and there are limitations due to a complex range of variables. Therefore, the physical structure of vegetation was analyzed in this study by reconfiguring high-resolution point cloud data collected through 3-dimensional terrestrial laser scanning (3D TLS) in a voxel. Each physical structure was analyzed under three different conditions: a simple vegetation formation without leaves, a complete formation with leaves, and a patch-scale vegetation formation. In the raw data, the outlier and unnecessary data were filtered and removed by Statistical Outlier Removal (SOR), resulting in 17%, 26%, and 25% of data being removed, respectively. Also, vegetation volume by voxel size was reconfigured from post-processed point clouds and compared with vegetation volume; the analysis showed that the margin of error was 8%, 25%, and 63% for each condition, respectively. The larger the size of the target sample, the larger the error. The vegetation surface looked visually similar when resizing the voxel; however, the volume of the entire vegetation was susceptible to error.

Key words : 3D terrestrial laser scan, Point cloud, Reconfiguration, Vegetation, Voxel

초록

하천에 광범위하게 활착되는 식생은 수위 변화 및 흐름 저항에 절대적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 하천 시스템 전반에 영향을 미치는 중요 요소이다. 따라서 유입되는 식생의 형태와 규모를 정확하게 파악하는 것이 매우 중요함에도 불구하고 현장에서 이를 파악하기란 쉽지 않은 일이다. 따라서 최근에는 지상 레이저 스캐닝 등을 활용하여 대용량의 식생 정보를 취득하는 연구가 시도되고 있다. 그러나 식생의 복잡한 형상으로 인해 캐노피 영역의 정확한 정보를 획득하기 어려우며, 자연적인 영향에 매우 민감하게 반응한다는 한계가 있다. 본 연구에서는 3차원 지상 레이저 스캐닝을 통해 수집된 고해상도의 포인트 클라우드 데이터를 복셀 형식으로 재구현하여 식생의 물리적 구조를 분석하였다. 먼저 잎이 없는 단순한 형태, 잎이 있는 완전한 형태의 식생 및 패치 규모 식생 조건으로 설정하여 각각의 물리적 구조를 분석하였다. 이를 위해 측정된 데이터의 이상치 제거 및 불필요한 데이터의 필터링을 위해 통계적 이상치 제거 방법을 활용하여 각각 17%, 26%, 25%의 포인트를 제거하였다. 또한 후처리 된

* 정회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 신진연구원

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · myeonghuiahn@kict.re.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jang@kict.re.kr)

*** 과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 박사과정 (University of Science and Technology · inhyeokbae@kict.re.kr)

**** 종신회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jiun@kict.re.kr)
과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 부교수 (University of Science and Technology · jiun@ust.ac.kr)

Received July 30, 2020/ revised September 9, 2020/ accepted September 25, 2020

포인트 클라우드로부터 복셀 크기별 식생 형상을 재구현하여 실제 식생의 부피와 비교하였으며, 분석 결과, 오차 범위는 각 조건별로 8%, 25%, 63%로 나타났다. 대상 샘플의 규모가 클수록 더 큰 오차가 발생하였으며, 복셀 크기 조정 시 식생의 표면이 시각적으로 비슷하게 보이지만 전체 식생의 부피는 이러한 변화에 매우 민감한 것으로 나타났다.

검색어 : 3D 지상 레이저 스캔, 복셀, 식생, 재구현, 포인트 클라우드

1. 서론

하도 내 식생의 활착은 수위 변화에 매우 민감하게 영향을 미치는 요소일 뿐만 아니라 하도의 변화, 생태 서식처 등 다양하게 영향을 미칠 수 있다(Aberle and Järvelä, 2013; Gurnel, 2014). 특히 하천에 유입되는 식생의 분포 형태와, 형상, 규모 등은 홍수위 분석을 위한 필수요소 중 하나이다. 최근 극한 홍수 빈도의 증가 및 갈수 일수가 증가함에 따라 하천으로 유입되는 식생의 규모가 점차 증가하는 추세이며, 따라서 식생의 활착 범위를 파악하여 식생의 유입이 수위 변화 및 흐름 저항에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석할 필요가 있다. Luhar and Nepf(2013)는 식생에 의한 흐름 저항을 추정하기 위해 가장 중요한 변수로 식생의 물리적 구조 및 분포 특성을 정량화하는 것이라고 제안한 바 있다. 그러나 하천 현장에서 광범위하게 유입되는 식생의 형태와 규모를 정확하게 규명하는 것은 쉽지 않은 일이며, 접근성이 제한되고 시간적 제약이 있는 현장에서 이를 일일이 조사하기에는 한계가 있다.

최근에는 광범위한 구역 범위의 식생 활착 정보를 쉽고 간편하게 취득할 수 있는 3차원 지상 레이저 스캐닝(3-dimensional Terrestrial Laser Scan, 3D TLS), 원격감지(Remote Sensing, RS), 드론, 항공 혹은 레이더 기반의 라이더(Light Detection And Ranging, LiDAR) 등이 활용되고 있다. 또한 Brodu and Lague(2012)는 하천에서 3차원 포인트 클라우드 데이터를 획득하여 자갈, 하상, 식생 등을 분류하는 연구를 수행한 바 있으며, Jalonen et al.(2015)은 TLS를 이용하여 초본성과 목본성 식생의 포인트 클라우드 자료를 구축하여 식생의 2차원 면적 산출 및 검증을 통해 신뢰성 있는 연구 결과를 제시하였다. Jang et al.(2020)은 식생의 물리적 구조를 산정하기 위해 3D TLS를 활용하였으며, 식생의 직경과 줄기, 잎을 각각 비교한 결과 캐노피 영역에서 정확한 포인트 정보를 획득하기 어렵다는 한계를 지적하였다. 특히 이러한 식생의 포인트 클라우드를 활용한 연구에서는 식생과 식생이 아닌 형태의 분류 작업 혹은 2차원 형태의 면적과 밀도 계산 등에 활용되고 있다. 그러나 고정된 물체가 아닌 산발적으로 분포되어 있으며 바람과 일광, 날씨 등 자연적인 영향에 매우 민감하게 반응하는 식생의 규모와 부피를 산정하기에는 여전히 어려움이 있다.

이러한 한계를 보완하여 정확한 식생의 물리적 구조를 측정하기 위해 3차원 포인트 클라우드를 3차원으로 재구현한 후 부피와

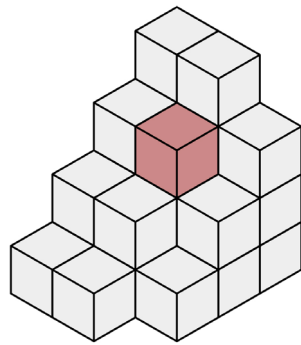
규모를 계산하는 복셀(Volumepixel, Voxel) 기반 접근법을 활용할 수 있을 것이다. Antonarakis et al.(2009)은 복셀 기반 접근법을 사용하여 잎이 없는 식생이 활착된 하안에서의 조도계수를 정량화 하였다. Boothroyd(2017)는 이와 유사한 방식으로 포인트 클라우드를 취득하여 잎이 없는 각각의 나무를 복셀한 후 잎 면적 지수(Leap Area Index, LAI)를 계산하였으며, 항력계수와 조도계수 산정에 활용하였다. 또한 Wu et al.(2018)은 TLS를 이용하여 3가지 종류의 나무를 스캐닝한 후 잎사귀와 가지를 분류하고 3차원 포인트 클라우드 자료를 복셀화하여 면적 및 밀도를 산정하였다. 이외에도 많은 연구자들에 의해 TLS 혹은 LiDAR로 측정된 고해상도의 포인트 클라우드에서 식생 정보를 분석하려는 연구가 진행되고 있다(Hosoi and Omasa, 2006; Rutzinger et al., 2010; Béland et al., 2014; Bienert et al., 2014; Boothroyd et al., 2016). 그러나 포인트 클라우드에서 복셀화 하는 과정에서 적절한 복셀 크기의 결정은 면과 부피의 추정에 영향을 미치는 가장 민감한 요소로써 복셀 크기가 실제 형상 구현에 미치는 영향을 반드시 분석할 필요가 있다. 또한 지상 레이저 스캔은 측정 정밀함과 별도로 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지 요인들에 의한 오차 및 측정 장비 자체가 가지고 있는 오차율로 인해 데이터 취득 후 별도의 정합 절차가 필요하다. 아울러 정합된 데이터가 포함하고 있는 이상치를 제거하기 위한 별도의 프로세스도 요구된다.

따라서 본 연구에서는 첫째, 대상이 되는 식생 샘플의 정확한 실제 밀도를 측정하고, 둘째, 대상 식생으로부터 3차원 TLS 정보를 획득하여 포인트 클라우드 형태로 구축한 후, 셋째, 포인트 클라우드 데이터의 후처리 과정을 거쳐, 마지막으로 포인트 클라우드로부터 복셀 크기별 식생 형상을 재구현하여 실제 식생의 물리적 구조와의 관계를 규명하고자 한다. 이러한 연구 결과를 통해 고해상도 포인트 클라우드에서 정확한 식생의 물리적 구조 정보를 획득함으로써 현장 취득이 어렵다는 기존의 한계를 보완할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 하천 흐름에서 식생으로 인해 차단되는 부피를 정확하게 제시함으로써 보다 정확한 수치모델 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

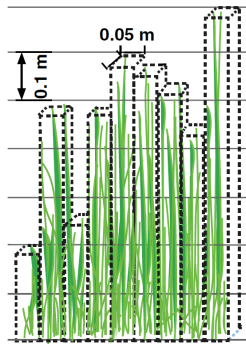
2. 연구방법

2.1 복셀의 정의

본 연구에서는 식생의 형상을 감지하기 위해 물체 및 공간에



(a) Voxel Concept



(b) Vegetation Shape Detection (Jalonen and Järvelä, 2014)

Fig. 1. Schematic Diagram and Example of Approach to Explain the Voxel

대한 3차원 정보 수집이 용이한 복셀 개념을 적용하였다. 복셀이라는 용어는 부피(volume)와 픽셀(pixel)을 조합한 합성어이다. 복셀은 기존의 2차원 공간에서 x-y 좌표를 3차원 공간으로 확장시킨 것으로 입체를 격자로 분해한 체적 요소를 의미한다(Fig. 1(a)). 이미 복셀을 활용한 3차원 레이저 스캐닝의 방법은 의료 및 과학 데이터 시각화, 분석에 활발하게 적용되고 있으며, 본 절에서는 대용량의 클라우드 데이터를 활용하여 식생구조를 Fig. 1(b)과 같이 재구현하였으며, 이를 활용하여 공간적인 분포를 면밀하게 파악하였다. 또한 3차원 스캐닝을 통해 정밀한 수백만 개의 대용량 클라우드 데이터가 수집되어 줄기-가지를 대표되는 식생의 물리적 매개변수를 보다 정확하게 수집하고자 하였다.

2.2 식생의 고해상도 포인트 클라우드 생성

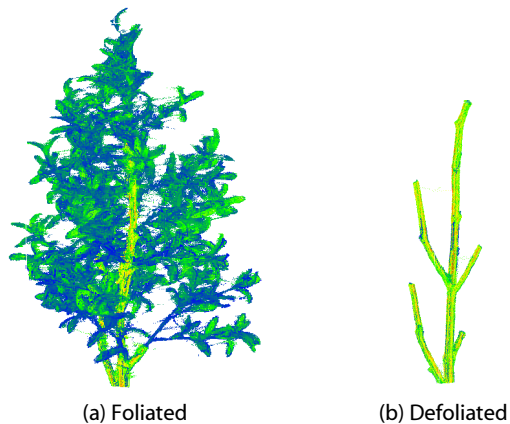
본 절에서는 식생의 일반적인 크기를 고려하여 일괄적으로 제작된 인공 식생을 활용함으로써 자연적으로 발생할 수 있는 성장의 불규칙성을 최소화하고자 하였다. 인공 식생은 실제 나무줄기에 방수 처리한 후 버드나무의 잎사귀와 가장 유사한 잎사귀인 인공 올리브 잎사귀 형태를 적용하였다. 따라서 장시간 흐름에서도 변형이 발생하지 않으며, 이에 따라 해당 식생 샘플의 반복적인 연구 활용이 가능하게 하여 자연 식생의 시간적인 한계를 보완하였다.

식생의 전체 높이는 1.1 m이며, 식생의 가지는 4-5개로 구성되어있고, 줄기의 평균 직경은 3-5 cm, 잎사귀의 길이는 7-9 cm, 잎사귀의 폭은 1.3-1.8 cm이다. 그러나 실제로 식생이 활착된 하천 현장에서는 레이저가 식생의 내부를 완전히 관통하여 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이와 같이 잎이 무성한 표본을 활용하여 복잡하고 까다로운 실험 조건을 인위적으로 설정함으로써 레이저 스캔의 폐색(Blocking) 영향을 분석하고자 하였다.

고해상도 포인트 클라우드 수집을 위한 3D 스캔을 위해 Leica의 RTC 360 3D 레이저 스캐너를 활용하였다. RTC 360의 레이저 등급은 1 (IEC 60825-1:2014)이며, 수평 방향으로 360°, 수직 방향으로 300°까지 측정할 수 있다. 또한 1회 측정으로 최소 0.5 m에서 130 m까지 측정이 가능하며, 초당 2,000,000개의 포인트 측정이 가능하다. 해당 스캐너의 각 정밀도는 0.005°이고, 10 m 구간에서 측정 시 오차 1.9 mm의 정밀한 측정이 가능하다. 10 m 측정구간에서 경사가 있을 시 단일 측정에서 발생하는 데이터 노이즈는 0.4 mm이다.



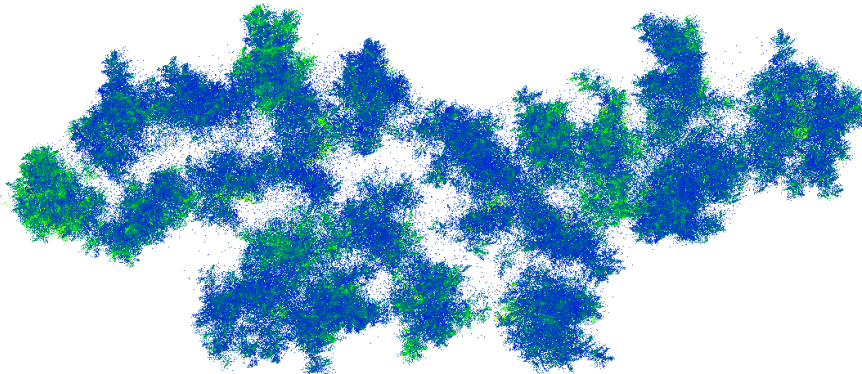
Fig. 2. Schematic to Show the 3D Scan Setup



(a) Foliated (b) Defoliated
Fig. 3. Point Cloud Matching Results of Single Vegetation



(a) 3D Point Cloud Measurement in REC Channels



(b) Cropped Single Patch

Fig. 4. Point Cloud Matching Results of Vegetation Patch

또한 통제된 실험실 환경에서 스캔하여 바람을 비롯한 자연적인 영향을 최소화하고자 하였다. 정밀한 데이터 정합을 위해 대상 샘플 식생을 중심으로 Fig. 2와 같이 8방향의 위치 및 지면에서 동일한 높이로 설정한 후 가장 정밀한 3 mm의 해상도로 스캔하였다. 스캔 방향을 보다 다양하게 활용한 측정을 통해 포인트 클라우드의 밀도가 높아져 식생의 구조와 형태를 재구성하기 위한 정확도를 향상할 수 있다. 또한 잎이 달린 식생이 스캔 정밀도 및 복셀 부피에 미치는 영향을 분석하기 위해 샘플 식생의 표본을 잎이 있는 상태와 없는 상태로 구분하여 각각 스캔하였다. 이러한 다중 측정을 통해 측정된 포인트 클라우드는 Leica의 Register 소프트웨어를 통해 정합하였으며, 정합 후 각각의 포인트 수는 잎을 포함했을 때 1,643,350개 (Fig. 3(a)), 잎을 제외한 경우 115,606개이다(Fig. 3(b)).

실내에서 제한된 환경에 의해 측정된 표본의 결과와 현장 측정결과를 비교 분석하기 위해 살규모 수로에 식생 패치를 설치하여 식생 패치 사이즈의 포인트 클라우드를 수집하였다. 이를 위해 한국건설기술연구원 하천연구센터(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology-River Experiment Center, KICT-REC)의 직선 수로를 활용하였으며(Fig. 4(a)), 특히 살규모 실험장에 설치된 식생 패치를 활용으로써 식생의 활착 및 성장에 관한 환경적 요소들을 제한하였다. 하천연구센터의 살규모 실험수로는 사면경사가 1:2인 사다리꼴 형태로서 수로 경사는 1/800, 하상 폭은 3 m이고, 수로 전체 길이는 600 m이다. 식생 패치는 하루 70 m 구간에 설치하였으며, 자연하천에서의 식생 활착 형태를 고려하

여 큰 타원형의 식생 그룹과 작은 타원형의 식생 그룹이 결합한 형상으로 총 8개 패치를 설치하였다. 큰 타원(폭 1.0 m × 길이 3.0 m) 안에는 15그룹의 식생이 설치되었으며, 작은 타원(폭 0.6 m × 길이 1.8 m)의 안에는 8그룹의 식생을 설치하여 총 23그룹의 그룹 형태 패치로 구성하였다.

본 절에서는 8개의 식생패치 중에 흐름방향에서 여섯 번째 식생 패치를 대상으로 포인트 클라우드를 수집하였다. 살규모 수로의 식생패치에 대한 포인트 클라우드 수집을 위해 실내 실험과 마찬가지로 Leica의 RTC 360 3D 레이저 스캐너를 활용하였으며, 패치 주변에서 6 mm 정밀도로 스캔한 후 4 mm 이하의 오차로 정합하였다. 정합된 전체 스캔 파일에서 하상 및 수로 형태, 주변 환경 등을 제외하고 식생패치에 대한 포인트 클라우드만 샘플링 한 결과, 포인트 수는 838,384개로 확인되었다.

3. 분석 결과

3.1 단일 식생 및 식생패치 실제 부피 산정

본 절에서는 식생 샘플의 3D 포인트 클라우드를 활용한 복셀 부피와 실제 부피를 비교하기 위해 물이 있는 메스실린더를 이용하여 부피를 측정하였다. 또한 잎이 있는 경우와 없는 경우 3D 스캔 측정과 복셀 형상 구현에 미치는 영향을 분석하기 위해 잎과 잔가지, 줄기를 각각 구분하여 측정하였다. 부피가 큰 식생 샘플은 물이 있는 메스실린더에 한 번에 잠기게 하는데 한계가 있어 주요 줄기를

Table 1. The Vegetation Sample Volume Measurement Results

	Volume	
	ml, cm ³	m ³
(a) Main Stem	106	0.000106
(b) Branch	70.5	0.0000705
(c) Leaf	195	0.000195
(d) Twig	99.5	0.0000995
(e) Defoliated: (a) + (b)	176.5	0.0001765
(f) Foliated: (e) + (c) + (d)	471	0.000471
(g) Patch: (f) × 23	10,833	0.10833

일정한 간격으로 소분한 후 측정하였다. 측정 결과 잎이 있는 샘플의 총 부피는 471 ml 이었으며, 잎이 없는 식생 줄기의 부피는 176.5 ml인 것으로 나타났다. 따라서 식생 샘플에서 잎이 차지하는 부피는 294.5 ml임을 알 수 있으며, 식생 샘플의 상세한 부피 측정 결과는 Table 1을 통해 확인할 수 있다. 또한 식생은 모두 거의 유사한 재질 및 크기로 제작된 인공 식생이기 때문에 측정된 한 그루 식생을 측정 결과에 총 그루 수를 곱하여 식생 패치의 실제 부피를 추정하였다. 패치 내 설치된 식생은 총 23개로 패치 규모의 부피는 10,833 ml로 추정하였다.

3.2 3D 포인트 클라우드 후처리 과정

측정된 포인트 클라우드는 Leica의 Register 소프트웨어를 통해 자동 정합한 후 Cloud Compare 소프트웨어를 사용하여 후처리 작업을 수행하였다. 후처리 작업의 첫 단계는 해당 구간을 명확하게 크롭함과 동시에 부피 또는 형태학적으로 부정확성을 초래할 수 있는 아웃라이어들을 제거하는 과정이다. 이를 위해 통계적 이상치 제거(Statistical Outlier Removal, SOR) 방법을 사용하여 Fig. 5와 같이 아웃라이어 데이터 포인트를 필터링하였다. SOR 방법은 초기 포인트 클라우드의 각 점과 가장 가까운 점 사이의 평균 거리를 계산하고, 가우스 분포를 통해 정의된 임의의 표준 편차를 벗어나는 점을 이상치로 간주하고 제거한다(Boothroyd, 2017).

그러나 수집된 포인트 클라우드의 가공되지 않은 초기 자료는 한 번의 SOR 과정으로 아웃라이어가 충분히 제거되지 않을 수 있으며, 따라서 이러한 후처리 오차를 개선하기 위해 SOR을 두 번 적용하는 것이 제안되었다(Boothroyd, 2017). Boothroyd (2017)의 연구에서는 SOR의 첫 번째 적용 시 20 %까지 포인트가 제거되고, 두 번째 적용시 15 %까지 제거되는 것으로 나타났으며 (Fig. 5), 데이터 노이즈의 제거는 육안으로도 확인이 가능하였다. 그러나 세 번 이상 적용하게 되면, 대상 물체의 가장자리에서 제거되기 시작하기 때문에 실질적인 이점이 없는 것으로 알려져 있다. 특히 패치 사이즈에서는 식생의 줄기 형상이 제대로 구현되

지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 두 차례 SOR 과정을 거친 포인트를 최종 복셀 형상 구현 포인트 클라우드로 결정하였으며, 초기 데이터와 SOR 적용에 따른 포인트 제거결과는 Table 2와 같다. 수집된 초기의 포인트 클라우드는 3 mm의 정밀도로 측정된 식생 샘플의 경우, 잎이 있을 때 97,165개, 잎이 없을 때 2,097,475 개 이었으며, 6 mm의 정밀도로 측정된 식생 패치의 경우 838,384 개였다. SOR의 두 차례 적용 후, 최종적으로 각각 80,733개, 1,561,804개, 628,422개의 포인트 클라우드를 복셀화 과정에 활용하였다.

3.3 단일 식생 및 식생패치의 복셀화 및 부피 산정

복셀화 과정은 xyz 좌표의 중심점을 기준으로 후처리 된 포인트 클라우드 주위에 사용자가 정의한 셀 크기를 가진 옥트리(Octree) 구조를 재구성하는 것을 의미한다. 단일 후처리 과정 없이 아웃라이어 및 측정 오류가 포함된 포인트 클라우드를 복셀로 재구성한다면 샘플 식생의 형태적 오류가 나타날 뿐만 아니라 부피가 과대평가될 수 있다(Bienert et al., 2014). 식생의 형태학적 복잡성을 적절하게 구현하려면 최적의 복셀 크기를 선택하는 것이 가장 중요하다. 또한 복셀 크기를 줄이면 식생을 구현하는 데 필요한 셀 수가 급격하게 증가하므로 이를 활용한 수치모의 시 훨씬 더 많은 계산 시간이 소요될 수 있다. 따라서 본 절에서는 샘플 식생을 재구성하기 위한 복셀 크기별 부피 산정 결과를 비교하였다.

3.3.1 잎이 없는 식생의 부피 산정

먼저 잎이 없는 상태 식생을 복셀의 크기별로 재구성하였다 (Fig. 6). 최소 8개의 복셀이 있을 때 식생 형태를 재구성할 수 있으며, 이 때 복셀 사이즈는 355.015 mm이고, 식생의 부피는 357,956 ml인 것으로 나타났다. 이는 부피가 355.015³ mm³인 정육면체 8개를 쌓았을 때 산정되는 부피이며, 실제 식생을 포함하기 위해 과도하게 큰 복셀을 사용하였음을 의미한다. 즉, 실제 부피인 176.5 ml와 357.661.5 ml의 차이가 있는 것으로 복셀 사이즈를 훨씬 더 작게 설정해야 한다. 복셀 사이즈별 반복적인 부피 계산 결과, 복셀의 사이즈가 2.774 mm 일 때의 부피는 272.139 ml로 실제 부피와 가장 작은 오차인 것으로 나타났으며, 이때 복셀의 개수는 12,755개이다. 또한 복셀 사이즈를 작게 할수록 식생 줄기의 부피는 감소하였으며, 특히 복셀의 사이즈를 1.387 mm 보다 작게 설정할 경우, 실제 부피와의 차이가 다시 벌어지는 것을 알 수 있다(Table 3). 복셀의 사이즈는 포인트 클라우드의 규모와 분할 횟수에 의해 결정되기 때문에 실제 부피와 동일한 복셀의 사이즈를 설정하는데 한계가 있다. 그러나 이와 같이 잎이 없는 단순한 실린더 형태의 부피는 실제 부피와 상당히 유사함을 알 수 있다.

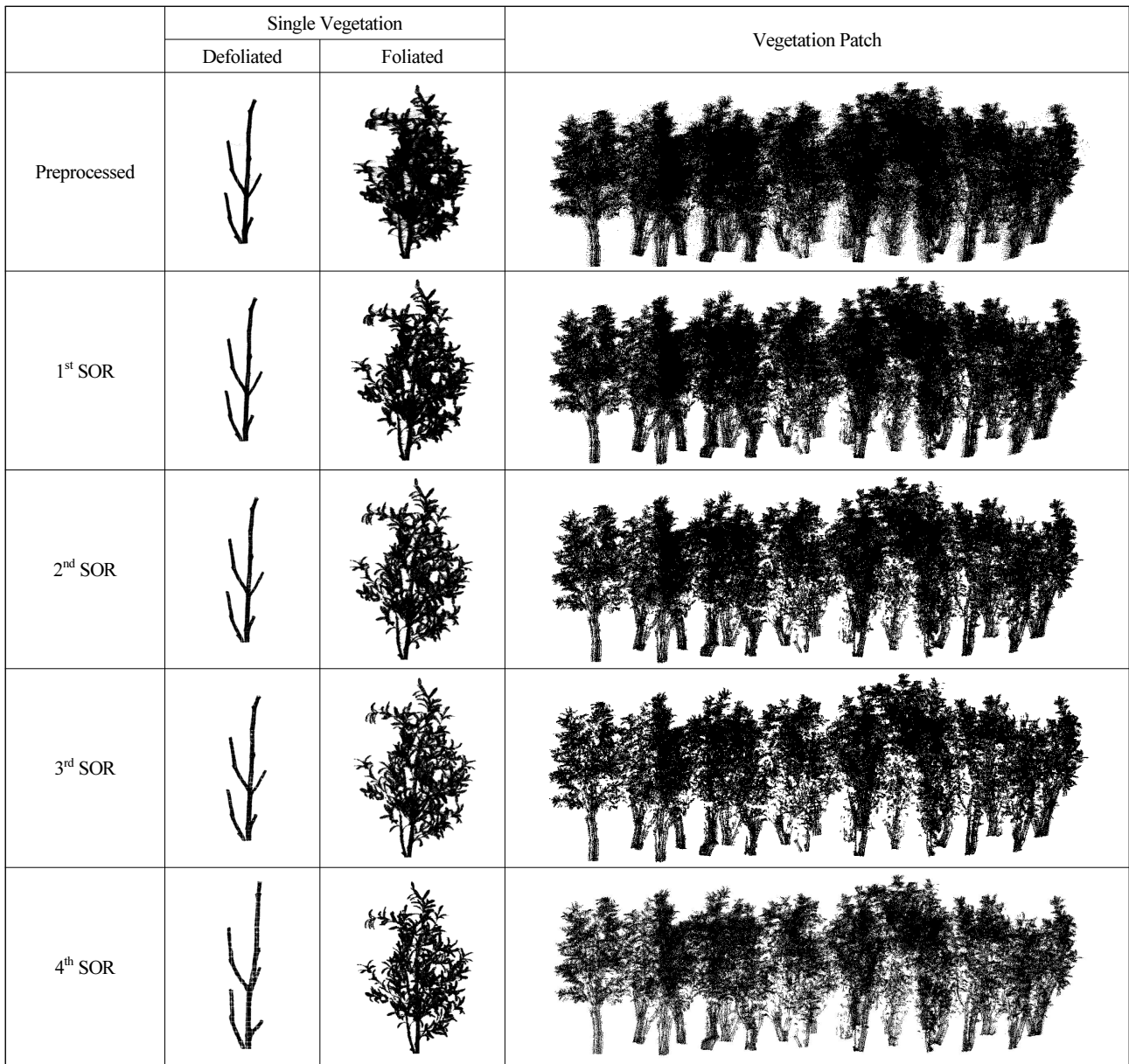


Fig. 5. Effect of Passing the Statistical Outlier Removal (SOR)

Table 2. Removal of Isolated Points with Successive Passes of The Statistical Outlier Removal (SOR) Tool

	Defoliated		Foliated		Patch	
	No. of Points	Reduction (%)	No. of Points	Reduction (%)	No. of Points	Reduction (%)
Pre-processed	97,165	—	2,097,475	—	838,384	—
1 st SOR	89,490	7.90	1,838,256	12.36	748,954	10.67
2 nd SOR	80,733	9.79	1,561,804	15.04	628,422	16.09
3 rd SOR	76,102	5.74	1,393,898	10.75	542,157	13.73
4 th SOR	73,044	7.02	1,226,121	12.04	471,195	13.09

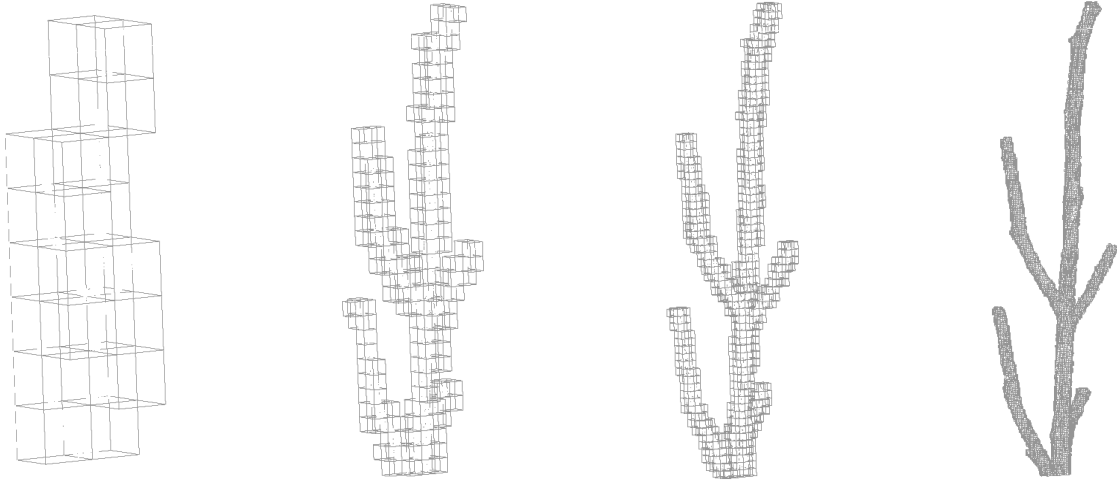


Fig. 6. Variation of Volume by Voxel Size in Defoliated Vegetation

Table 3. Number of Cells, Volume, and Error by Voxel Size in Defoliated Vegetation

Voxel Size (mm)	Voxel Count	Voxel Volume (ml)	Error (ml)	Error (%)
355.015	8	357,956	357,661.5	121,447
177.508	12	67,116	66,822.3	22,690
88.754	23	16,080.1	15,785.6	5,360
44.377	74	6,466.99	6,172.49	2,096
22.188	218	2,381.42	2,086.92	709
11.094	809	1,104.69	810.190	275
5.547	3,193	545.003	250.503	85
2.774	12,755	272.139	22.361	8
1.387	43,912	117.113	177.387	60
0.693	73,825	24.611	269.889	92

3.3.2 잎이 있는 식생의 부피 산정

다음으로 식생 잎이 있는 경우의 복셀을 활용하여 식생을 재구현해 봄으로써 잎에 의한 영향을 분석해보고자 하였으며, 복셀 사이즈별 식생 형상은 Fig. 7과 같다. 가장 큰 복셀 사이즈를 사용하여 총 8개의 복셀로 구성했을 때, 실제 부피와 비교하여 큰 오차가 발생하였으며, 3.3.1절과 마찬가지로 복셀 사이즈가 작아질수록 오차의 범위가 작아짐을 알 수 있다. 최적의 복셀 사이즈는 0.985 mm 이었으며, 복셀의 개수는 614,087개인 것으로 나타났고 이때 실제 부피 471 ml와 오차는 116.477 ml 이다. 잎이 있는 경우의 포인트 클라우드는 잎이 없는 경우의 포인트 클라우드 개수와 비교하면 약 14배 정도 많았으며, 잎이 없는 경우의 최적의 복셀 사이즈 2.774 mm와 비교하여 복셀의 사이즈는 약 1.8 mm 더 작아지고 복셀 개수는 더 늘어난 것을 알 수 있다(Table 4). 따라서 단순화된 잎이 없는 상태의 식생 줄기에 비해 식생을 포함하는 복셀화하기 위해 더 세분되고 더 많은 복셀이 필요함을 알 수

있다. 복셀의 사이즈는 실제 부피와의 비교하기 위해 중요한 요소이지만 복셀의 개수는 수치모델의 계산을 결정짓는 데 중요한 요소가 될 수 있으므로 이에 주의하여야 할 것이다.

3.3.3 식생패치 부피 분석

마지막으로 현장 수로 내에서 측정된 패치 규모의 식생 부피와 포인트 클라우드를 통해 복셀화된 부피를 비교하고자 하였다 (Fig. 8). 한 패치안의 식생은 총 23개였으며, 이에 따라 패치의 실제 부피는 포인트 클라우드로 추정된 한 그루의 식생 부피 471 ml에 23을 곱하여 총 10,833 ml로 추정할 수 있었다. 복셀 사이즈별 재구현 된 식생의 부피 산정 결과, 최적의 복셀 사이즈는 1.862 mm였으며, 측정 부피는 4,023.96 ml이었다. 측정 부피는 구현 가능한 복셀 사이즈 중 가장 작은 오차임에도 실제 부피로 추정된 10,833 ml와는 6,809.04 ml만큼 과소 산정되었다(Table 5). 복셀화하려는 대상 포인트 클라우드의 규모가 커질수록 세밀한 복셀

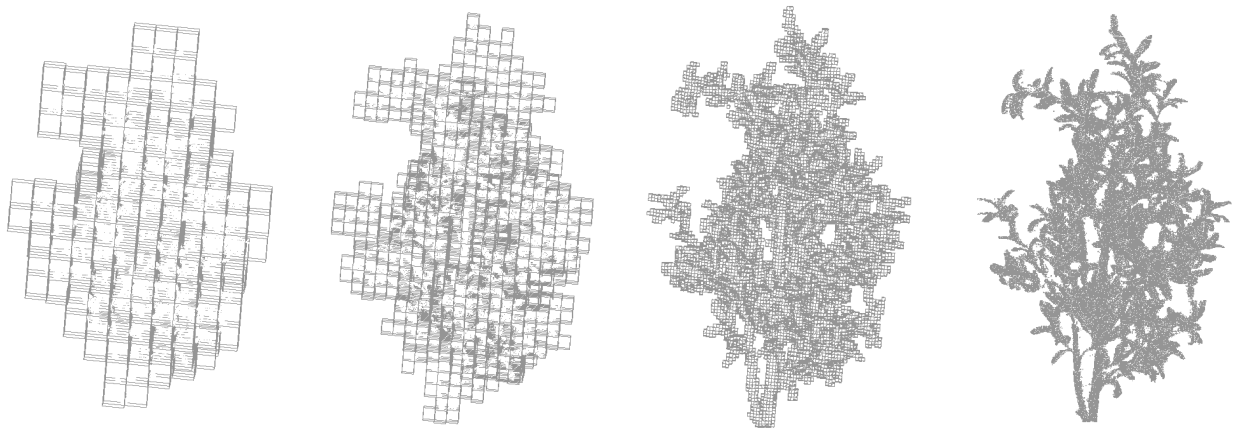


Fig. 7. Variation of Volume by Voxel Size in Foliated Vegetation

Table 4. Number of Cells, Volume, and Error by Voxel Size in Foliated Vegetation

Voxel Size (mm)	Voxel Count	Voxel Volume (ml)	Error (ml)	Error (%)
504.495	8	1,027,210	1,026,739	217,991
252.248	37	593,858	593,387	125,985
126.124	137	274,860	274,389	58,257
63.062	558	139,938	139,467	29,611
31.531	2,237	70,125.6	69,654.6	14,789
15.766	8,011	31,391.2	30,920.2	6,565
7.883	28,604	14,010.6	13,539.6	2,875
3.941	102,261	6,261.1	5,790.1	1,229
1.971	341,994	2,617.39	2,146.39	456
0.985	614,087	587.477	116.477	25
0.493	614,087	73.435	397.565	84

사이즈 설정이 어려웠으며, 이에 따라 실제 부피에 비해 큰 오차가 포함되었다. 가장 작은 규모였던 잎이 없는 경우의 오차가 8 %인 것에 반해 잎이 있는 경우의 오차는 25 %였으며, 패치 규모의 오차는 63 %로 증가하였다. 이를 통해 정밀한 식생 부피를 산정하기 위해서는 포인트 클라우드의 데이터 범위를 세분화한 후 시도해야 할 것으로 판단된다. 특히 대규모의 식생 패치의 경우, 소규모로 세분화한 후 검증된 복셀 사이즈 및 부피 결과를 활용하여 적용할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3D 지상 레이저 스캐닝을 통해 수집된 고해상도 포인트 클라우드를 활용하여 대상 샘플을 복셀화한 후 식생의 물리적 구조를 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 대상이 되는 식생 샘플의 실제 부피를 측정하기 위해 물이 들어있는 메스실린더를 활용하였으며, 잎이 없는 단순한 실린더 형태의 부피는 176.5 ml이었으며, 잎이 있는 완전한 형태의 한 그루 식생의 부피는 471 ml였다. 또한 패치 규모의 부피 비교를 위해 23개의 인공 식생을 설치하였으며, 총 부피는 10,833 ml로 추정하였다. 또한 각각의 경우에 대해 3차원 지상 레이저 스캐닝을 통해 대용량 포인트 클라우드 형태를 구축하였다.

둘째, 측정된 데이터의 이상치를 제거하기 위해 포인트 클라우드 데이터의 후처리 과정을 거친 후, 통계적 이상치 제거(SOR) 방법을 활용하였다. 두 차례에 걸친 통계적 이상치 제거를 통해 데이터의 노이즈 및 불필요한 데이터가 제외되었으며, 최종적으로 초기 데이터와 비교하여 각각 17 %, 26 %, 25 % 포인트가 제거되었다.

셋째, 포인트 클라우드로부터 복셀 크기별 식생형상을 재구현하여 실제 식생의 부피와 비교하였다. 분석 결과, 잎이 없는 경우 최적의 복셀 사이즈는 2.774 mm이며, 이 때 실제 부피와의 오차는

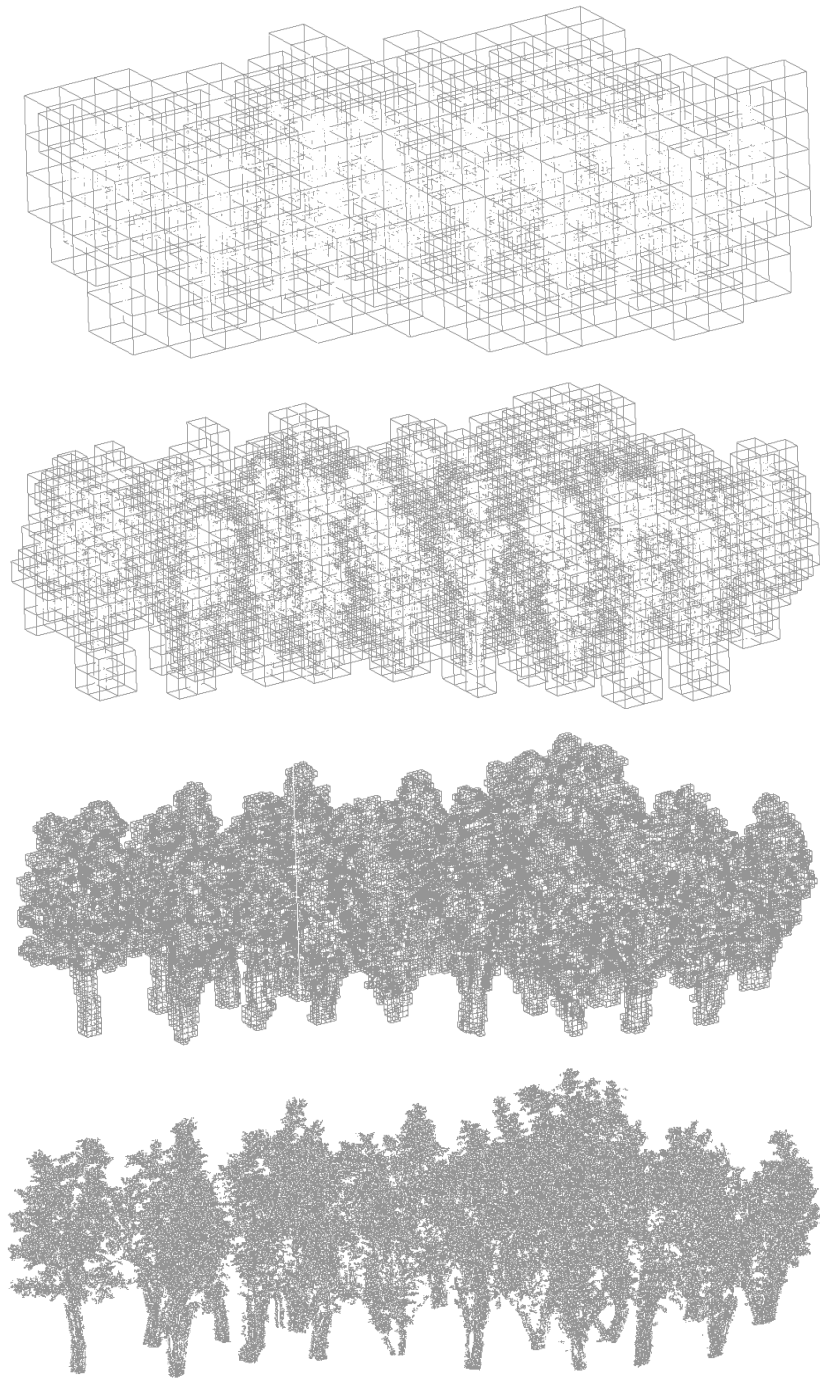


Fig. 8. Variation of Volume by Voxel Size in Vegetation Patch

8 %였다. 잎이 없는 한 그루 식생의 최적 복셀 사이즈는 0.985 mm이고, 실제 부피와의 오차는 25 %였다. 또한 패치 규모에서의 최적 복셀 사이즈는 1.862 mm이고, 실제 부피와의 오차는 63 %로 증가하였다. 이를 통해 복셀 크기를 조정할 때 식생의 표면이 시각적으로 비슷하게 보이지만 전체 식생의 부피는 이러한 변화에

매우 민감함을 알 수 있으며 복셀 크기가 미세할수록 전체 부피가 더 작아지는 것을 알 수 있었다. 또한 정밀한 식생 부피를 산정하기 위해서는 포인트 클라우드의 데이터 범위를 세분화한 후 분석할 필요가 있다. 그러나 복셀 크기를 줄이면 식생을 나타내는 데 필요한 셀 수가 급격하게 증가하므로 수치모델에서 훨씬 더 많은 계산시간이

Table 5. Number of Cells, Volume and Error by Voxel Size in Vegetation Patch

Voxel size (mm)	Voxel Count	Voxel Volume (ml)	Error (ml)	Error (%)
1,906.880	8	55,470,300	55,459,467	511,949 %
953.440	25	21,668,100	21,657,267	199,919 %
476.720	114	12,350,800	12,339,967	113,911 %
238.360	473	6,405,630	6,394,797	59,031 %
119.180	2,224	3,764,830	3,753,997	34,653 %
59.590	10,398	2,200,240	2,189,407	20,211 %
29.795	42,908	1,134,930	1,124,097	10,377 %
14.898	146,642	484,840	474,007	4,376 %
7.449	382,650	158,144	147,311	1,360 %
3.724	577,828	29,851	19,018	176 %
1.862	623,136	4,023.96	6,809.04	63 %
0.931	628,422	507.261	10,325.739	95 %

요구될 수 있다. 따라서 불필요한 포인트를 적절하게 제거하고 대상체를 재구현하기 위한 효율적인 복셀 사이즈가 적용되어야 한다.

본 연구를 통해 캐노피로 가려지는 부분에 대한 포인트 클라우드 측정의 한계, 현장 측정에서 발생하는 대략적인 오차의 범위를 확인할 수 있었다. 본 연구는 하나의 식생 샘플의 두 가지 조건과 단일 패치를 대상으로 진행되었지만 다수의 대상을 통해 반복적인 분석을 수행한다면 현장에서 발생하는 오차 범위를 패턴화 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 최종적으로 본 연구를 통해 정확한 식생의 물리적 구조 정보를 획득함으로써 식생 정보의 현장 취득이 어렵다는 기존의 한계를 보완할 수 있었다. 또한 하천 흐름에서 식생으로 인해 차단되는 부피와 형태, 형상 등 정확한 식생 정보를 제시함으로써 식생으로 인해 차단 또는 방해된 하천 흐름에 미치는 영향을 분석하기 위한 수치 모델링 연구에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2019R1C1C1009719)을 받아 수행된 연구임.

References

- Aberle, J. and Järvelä, J. (2013). "Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 51, No. 1, pp. 33-45. DOI: 10.1080/00221686.2012.754795.
- Antonarakis, A. S., Richards, K. S., Brasington, J. and Bithell, M. (2009). "Leafless roughness of complex tree morphology using terrestrial lidar." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 10. DOI: 10.1029/2008WR007666.
- Béland, M., Widłowski, J. L. and Fournier, R. A. (2014). "A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 51, pp. 184-189. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.09.034.
- Bienert, A., Hess, C., Maas, H. G. and Von Oheimb, G. (2014). "A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, pp. 101-106. DOI: 10.5194/isprsarchives-xl-5-101-2014.
- Boothroyd, R. J. (2017). *Flow-vegetation interactions at the plant-scale: the importance of volumetric canopy morphology on flow field dynamics*, Doctoral thesis, Durham University, Durham, UK.
- Boothroyd, R. J., Hardy, R. J., Warburton, J. and Marjoribanks, T. I. (2016). "The importance of accurately representing submerged vegetation morphology in the numerical prediction of complex river flow." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 41, No. 4, pp. 567-576. DOI: 10.1002/esp.3871.
- Brodu, N. and Lague, D. (2012). "3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 68, pp. 121-134. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006.
- Gumell, A. (2014). "Plants as river system engineers." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 39, No. 1, pp. 4-25. DOI: 10.1002/esp.3397.
- Hosoi, F. and Omasa, K. (2006). "Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar." *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 44, No. 12, pp. 3610-3618. DOI: 10.1109/TGRS.2006.881743.
- Jalonen, J. and Järvelä, J. (2014). "Estimation of drag forces caused by natural woody vegetation of different scales." *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 26, No. 4, pp. 608-623. DOI: 10.1016/S1001-6058(14)60068-8.

- Jalonen, J., Järvelä, J., Virtanen, J. P., Vaaja, M., Kurkela, M. and Hyyppä, H. (2015). "Determining characteristic vegetation areas by terrestrial laser scanning for floodplain flow modeling." *Water*, Vol. 7, No. 2, pp. 420-437. DOI: 10.3390/w7020420.
- Jang, E. K., Ahn, M. H. and Ji, U. (2020). "Introduction and Application of 3D Terrestrial Laser Scanning for Estimating Physical Structures of Vegetation in the Channel." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 7, No. 2, pp. 9-96. DOI: 10.1080/00221686.2012.754795 (in Korean).
- Luhar, M. and Nepf, H. M. (2013). "From the blade scale to the reach scale: A characterization of aquatic vegetative drag." *Advances in Water Resources*, Vol. 51, pp. 305-316. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.02.002.
- Rutzinger, M., Pratihast, A. K., Oude Elberink, S. and Vosselman, G. (2010). "Detection and modelling of 3D trees from mobile laser scanning data." *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, pp. 520-525.
- Wu, D., Phinn, S., Johansen, K., Robson, A., Muir, J. and Searle, C. (2018). "Estimating changes in leaf area, leaf area density, and vertical leaf area profile for mango, avocado, and macadamia tree crowns using terrestrial laser scanning." *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 11, 1750. DOI:10.3390/rs10111750.