

**LiDAR 자료를 활용한 택지 및 농경지 주변 산림의
수직적 구조 비교 분석**
-시흥시 연성동 일대를 중심으로-

류 지 은 · 위 광 재*

서울대학교 조경 · 지역시스템공학부 · *한진정보통신 GIS기술연구소

**Comparative and Analysis of Forest Vertical Structure Near
Residential and Agricultural Area using LiDAR Data**
- A Case Study of Yeonseong-dong, Siheung -

RYU, Ji Eun · Gwang Jae WIE*

Laboratory of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University
Graduate School

*GIS Research Center, Hanjin Information Systems & Telecommunication Co., Ltd.

ABSTRACT

Residential development and agriculture makes to deterioration of forest ecosystem and decrease of habitats that bring about species diversity of creatures. It is important that quantitative analysis of forest vertical structure for forest management for biodiversity. On this paper, we study effect of disturbance from people to forest structure using LiDAR data. The forest near the agricultural area show high forest structure diversity and the forest near the residential area is effected by disturbance from edge to inner forest until about 60m. It offers various habitats to diversity of horizon structure and the forest near the agricultural area show high diversity because of stability of forest structure. Because the forest near the residential area is managed from people by periods. So, the forest is needed that management for increasing of forest structure how introduction of low layers vegetations.

Key words : forest ecosystem, disturbance from people, single tree, tree density, DBH, width of crown

서 론

인간의 활동은 거의 모든 생태계 유형에 대하여 광범위한 서식지 파편화와 고립을 초래하였다 (Meffe and Carroll, 1994). 도시지역뿐만 아니라 자연지역내의 산림까지 개발이 확대되는 등 환경을 충분히 배려하지 않은 사업들의 인허가로 인하여 현재 국토의 난개발이 이루어지고 있다(이 등,

2005). 특히 택지 개발로 인한 파편화는 녹지 및 서식지 감소를 야기하여 종 다양성을 크게 감소시킨다. 다양한 서식처에서 각 개체에 맞는 적합도를 평가하기 위해 미세 스케일에서 수직적·수평적 식생 구조와 밀도에 초점을 맞춘 서식처 구분과 경험적인 연구가 증가하고 있다(Michel *et al.*, 2008).

개발이 산림 생태계에 미치는 영향을 평가하는 기존 연구는 현장조사 및 2차원의 평면 데이터를 이용하여 분석하였기 때문에 입체적인 산림의 특성을 반영하기 어려웠다. 그러나 생태계의 이해는 단순한 경관요소의 수평적인 관계뿐만 아니라 지형과 식생의 분화로 이루어지는 수직적인 구조로 조망할 때 가능하다(이, 2003). 산림 구조는 잎, 줄기, 미기후 등을 포함한 산림의 구성요소들의 공간적 배열과 정량화를 의미하며, Light Detection and Ranging(LiDAR) 데이터는 임목의 수관, 가지, 하층식생, 지표면 등 여러 부분에서 반사된다는 신호적 특성을 이용하여 국내·외에서는 수고, 흉고 직경, 울폐도, 재적, 생체량 등 다양한 산림 구조와 관련된 연구가 진행되고 있다. 그러나 수목의 개체수 및 수목 밀도 분석 등 산림 구성요소의 분석에 관한 연구에 한정되어 있어서(장 등, 2005; 장 등, 2006; 우 등, 2007) 산림의 수직 구조의 측면에서의 연구는 미흡하다.

본 연구는 개발에 따른 인위적 훼손이 본래의 토지이용에 따른 영향과의 차이를 비교하기 위해 택지 개발 주변 산림과 본래의 토지 이용 형태인 농경지 주변 산림의 수직적 구조를 비교·분석하여 개발에 따른 영향 정도를 파악하고자 한다. 이는 주변 토지 이용이 산림에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여 개발 등 인위적인 간섭이 생태계에 미치는 영향을 최소화하는데 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

관련 이론 및 선행 사례 고찰

1. LiDAR 시스템의 개념

LiDAR(Light Detection And Ranging) 데이터는 능동 위성영상기술로 3차원 지형 공간에 대한 정확하고 밀도가 높은 정보를 제공한다(윤 등, 2006). 항공기에 레이더 장비를 탑재하여 측량하는 방법으로, LADAR(LASER Detection and Ranging)라고도 한다(한 등, 2003).

LiDAR 시스템은 GPS(Global Positioning System), IMU(Inertial Measuring Unit) 및 레이저 스캐너로 구성되어 있으며, 데이터의 처리와 장비의 운영 및 실제 관측을 위한 데이터 저장매체, 지상기준국용 GPS, 작업계획 및 데이터 처리를 위한 소프트웨어, 항법장치 및 추가적인 자료획득 보조 장비로 비디오키나 디지털 사진기가 사용되기도 한다(이 등, 2003)(Fig. 1). GPS는 센서의 위치, INS는 센서의 자세, Laser는 센서와 지표면과의 거리를 측정하여 지표면의 표고점에 대한 3차원 x, y, z좌표를 결정하며, 일반적으로 수직정확도 15cm, 수평정확도 30cm의 우수한 정확도를 가지며(최와 조, 2005), 측정마다 개별적인 위치정보를 얻을 수 있기 때문에 항공 삼각측량이나 기하보정¹⁾이 필요없다.

LiDAR 데이터는 항공기에 GPS와 IMU 장비를 장착하여 비행하면서 측정하는 항공 레이저 측량으로 레이저 펄스를 지표면에 주사하고 반사된 신호들간의 도달한 시간 경과를 측정하여 물리적 지표로

1) 기하보정(geometric correction): 원격탐사 영상은 전형적으로 내부 및 외부적인 기하오차를 가지고 있다. 내부기하오차는 원격탐사 시스템 자체나 지구 자전, 혹은 곡률 특성에 의해 발생하며, 외부기하오차는 시공간으로 고도, 자세(좌우회전, 전후회전, 수평회전) 변화에 의해 발생한다.

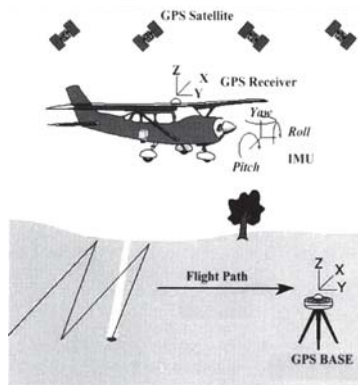


Fig. 1. LiDAR system components.
(최와 조, 2005)

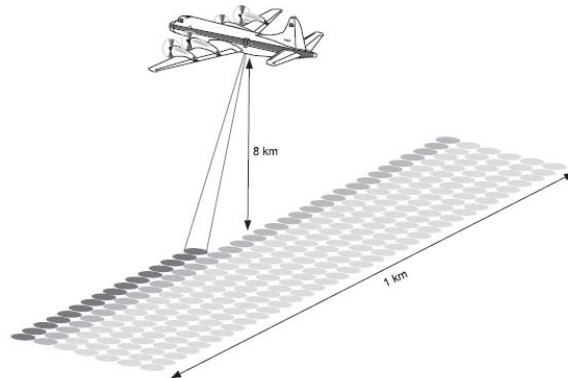


Fig. 2. LiDAR data measurement. (Blair *et al.*, 1999)

부터의 거리를 측정하여 지표면의 지형정보를 추출한다(Andrew *et al.*, 2002). LiDAR는 물체의 물질적 특성에 따른 높이와 반사 강도²⁾ 데이터를 함께 제공한다(한 등, 2003).

대상 지역 전체를 촬영하기 위해서는 여러 비행선들이 중첩되며, 측정 밀도는 단위시간당 송신할 수 있는 펄스의 수, 촬영 각도, 항공기의 고도와 비행속도 등에 의해 결정된다(John, 2006)(Fig. 2). 이와 같이, 다양한 정보의 결합으로 각 레이저 펄스의 3차원의 지리좌표가 결정되며, 그 밖에 시간측정의 정확도, 레이저 측정에서의 산포도, 반사신호 강도의 변이, 자료 처리과정에서의 합성오차 등 보다 정확한 LiDAR 데이터의 좌표등록을 위한 약간의 보정 요소들이 필요하다(Vaughn *et al.*, 1996).

다음과 같은 LiDAR 시스템의 특성으로 인하여 토지 표면의 특성 분석이 가능하다: (1) 반사광이 시간차를 두고 관측되는 다중반사에 의하여 동일 지상점에 대해 두 개 이상의 표고정보를 획득할 수 있다(강 등, 2006). (2) 다양한 크기의 footprint로 데이터를 획득할 수 있으며, 크기에 따라 획득 가능한 정보에 차이가 발생한다. 정밀도가 높은 small-footprint는 측정 단위가 직경 5~30cm이며, 낮게 비행하면서 높은 파장으로 측정(1,000~10,000Hz)한다. 상대적으로 정밀도가 낮은 large-footprint는 측정 단위가 직경 10~25m이며, 보다 넓은 면적에 대해 데이터 수집이 가능하다(Fig. 3). (3) 데이터 획득 시 속도 및 패턴 등에 영향을 받는다(Ralph, 2002).

최근 정밀한 3차원 정보를 포함하고 있는 LiDAR 데이터의 특성으로 인하여 각종 신규 개발 및 도로계획, 시각평가 분석, 홍수위험 분석, 배수 및 홍수지역 분석, 환경분석, 가상현실 모델링, 산림 및 시설원에 계획 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있다(김, 2003).

2. 산림 식생 구조의 다양성 관련 연구

산림은 지리적 위치, 지형, 토지, 종조성적 차이에 의해 다양하게 발달하며, 이러한 모든 환경조건

2) 반사 강도(intensity): 반사체에 반사되어 스캐너에 도달한 레이저 강도 대 발사된 레이저 강도의 비율로 나타나며, 일반적으로 반사체는 고유한 반사도를 가지며 반사체에 따라 그 값들이 상이하게 나타난다. 지상물의 종류를 규명하기 위한 중요한 정보로 LiDAR 측량에서는 지형지물의 고유한 반사도를 이용해 반사 강도를 측정하고, 이것을 이용해 지상물의 종류를 규명하며 지표면의 식생분포나 식생 밀집도를 추정한다(강 등, 2006).

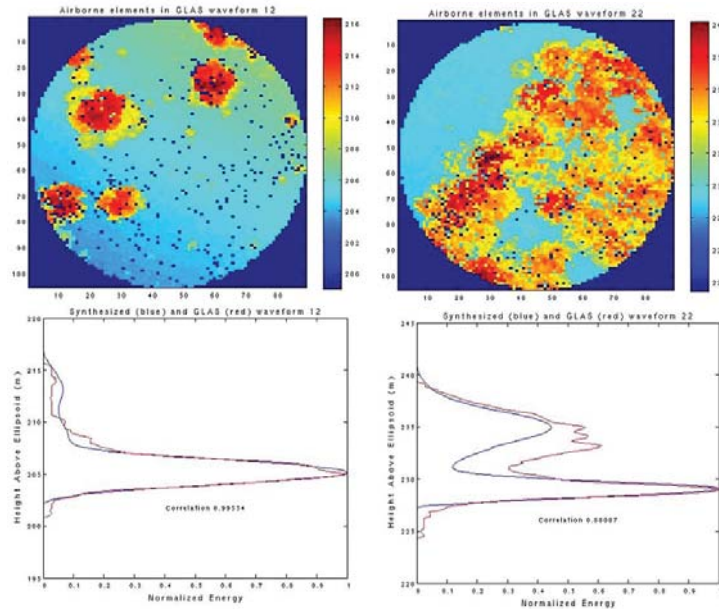


Fig. 3. Points density according to footprint size.

(Left: low points density, Right: high points density)

(Amy *et al.*, 2006)

을 통합하여 하나의 산림 식생이 형성된다. 따라서 어떤 입지에 발달하고 있는 산림 식생의 유형분석을 통하여 그 입지의 환경조건을 간접적으로 파악할 수 있다(김, 2006).

산림 구조는 수목의 위치, 수직적 층위(vertical layering), 수종의 혼재로 특성화되며(Lang *et al.*, 2006), 빛 조건과 입지의 안정성에 따라 다층의 식물군락으로 구성된다. 다층 구조는 에너지의 흐름, 대기와 토지간의 물질 및 에너지의 흐름, 생태계의 생물 다양성과 수목의 바이오매스, 잎의 유무에 따른 3차원 분포에 영향을 미친다(Kimes *et al.*, 2006)(Fig. 4). 조류나 포유류의 경우에도 그들이 서식하는 식생의 구조적 형태와 산림이 밀접한 관계가 있다(홍, 1999).

인간에 의한 파편화와 고립화, 토지이용과 인위적 교란에 의하여 식생 이질성이 나타나며, 이로 인해 구조적 다양성이 발생한다. 식생의 다양성은 종 다양성을 포함하여 식생 피복과 밀도, 조류를 포함한 국지적 종 풍부도에도 영향을 미치기 때문에 종 다양성을 나타낼 수 있는 기초 변수로 인식되어 왔다(Scott *et al.*, 2004). 따라서 생물적 다양성을 보존하기 위해서는 개체군 및 종 중심의 ‘ α (종) 다양성’에서부터 ‘ β (서식지) 다양성’과 ‘ γ (경관) 다양성’ 또는 ‘ δ (지역) 다양성’으로 발전된 패치나 통로와 같은 공간요소 수준에서의 경관다양성과 이질성을 조사하고 유지 및 관리하는 것이 무엇보다 중요하다(Naveh, 1994)(Fig. 5).

국내·외에서는 산림 자원의 효율적인 관리 및 보전을 위한 산림 식생의 구조를 파악하기 위하여 현장 조사를 통해 식물종과 식물군락의 구조를 직접 측정 및 분석하거나 기존의 2차원 데이터를 이용하여, 경관 스케일에서 산림경관의 변화를 분석하는 등 다양한 방법을 사용하고 있다(정, 1999; 박 등, 2004; Seto *et al.*, 2004).

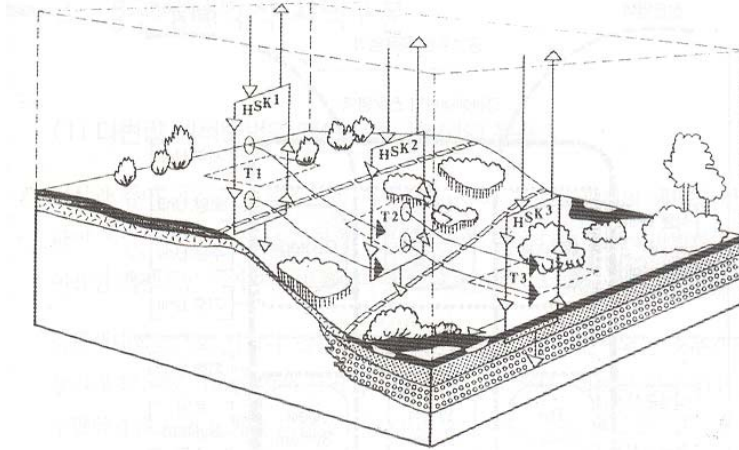


Fig. 4. 3D nature region unit.

(T1,2,3: horizontal elements, HSK1,2,3: vertical elements) (이 등, 2005에서 재인용)

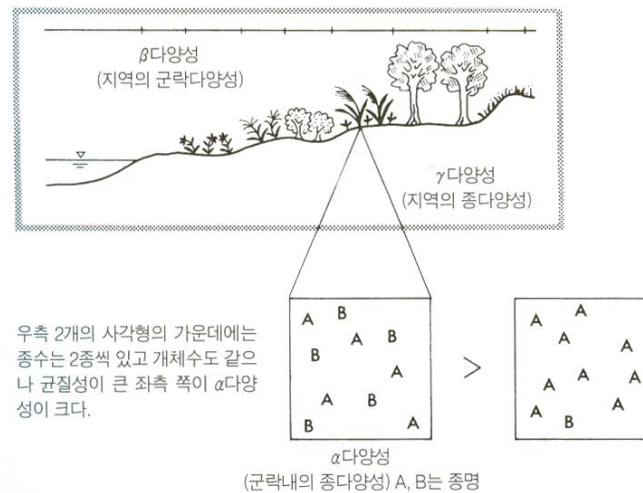


Fig. 5. Diversity. (문 등, 2002)

김 등(2002)은 방형구를 설치하여 층위별로 수종을 동정 및 기록하고 clinometer를 이용하여 수고를 측정하였으며, 이를 평균하여 수직구조(FHP; Foliage Height Profile)를 분석하였다. 방형구 내에서 흉고 직경 10cm 이상의 목본을 대상으로 흉고 직경을 측정하였으며, 측정 데이터는 5cm 간격으로 나누어 직경급별로 구분하여 분석하였다. 이러한 현장 조사는 국내에서 보편적으로 사용되는 식생구조의 분석 방법이다. 박 등(2004)은 산림경관의 다양성을 분석하기 위하여 수치지도에서 산림 지역만 추출하여 산림분포도를 작성하고, McGarigal and Marks(1995)가 제안한 크기, 밀도, 가장자리, 형태, 핵심구역 등에 관련된 경관지수를 토대로 FRAGSTATS 3.3을 사용하여 분석하였으며, 인자분석을 사용

하여 다수의 경관지수를 소수의 공통인자로 단순·축소해 산림경관의 구조적 패턴을 좀 더 용이하게 해석하였다. Roger and Richard(1979)는 Central Washington Cascades의 경도에 따른 세 지역에 위치한 소나무림을 대상으로 군락 구조, 종 풍부도와 다양성, growth-form 복잡성, 서식처 폭을 도면화 하여 중첩을 하였다. 총 231개의 임분을 샘플 plots으로 설정하여 현장조사를 수행하였다. 각 조사 지점의 지리적 현황(고도, 경사, 지형적 위치, 향)을 측정하였으며, 산림경관에 영향을 미치는 주요 인자로 토양환경을 고려하여 토양분석(토양 유기 물질, pH)도 수행하였다. 조사지점의 매개변수로 높이, 습도, 토양 pH, 토양 유기적 파편, 경사, 수목 밀도, 수목 기저면적(basal area), 유묘 밀도, 임관 울폐도를 설정하고 MINFO 프로그램을 이용해 분석하였다. 다양한 분석 중 다양성 평가는 다음과 같은 세 단계로 수행하였다. Shannon diversity를 이용해 α 다양성을 평가하였고, Whittaker(1965)의 공식을 이용해 β 다양성을 평가하였다. γ 다양성은 Shannon 함수를 이용하여 growth-form 내에 구분된 식물상의 구성과 토양, 습도, 임관의 차이에 따라 평가하였다. 서식처의 폭과 다양한 환경 인자를 고려하여 서식처의 다양성까지 평가하였다는 것에 의의가 있다. 홍 등(2000)은 인간의 영향을 받고 있는 경관 모자이크의 최근 변화를 경관다양도 지수(diversity index), 프랙탈차원(FD), 인위적 교란 지수(human disturbance index)를 이용하여 정량적으로 분석하고 교란이 산림경관의 구조와 이질성 및 다양성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하였다.

3. LiDAR 시스템을 이용한 산림의 구조 분석 관련 연구

LiDAR 시스템의 독특한 특성 중 하나는 레이저가 식물의 수관층을 통과하여 그 아래 바닥에 도달함으로써 지표면의 상태를 조사할 수 있다는 것이다. 식물과 지표면에서 반사되어 오는 레이저파를 기록함으로써 식물의 높이와 지표면의 정확한 고도를 측정할 수 있게 된다(Jason, 2002)(Fig. 6).

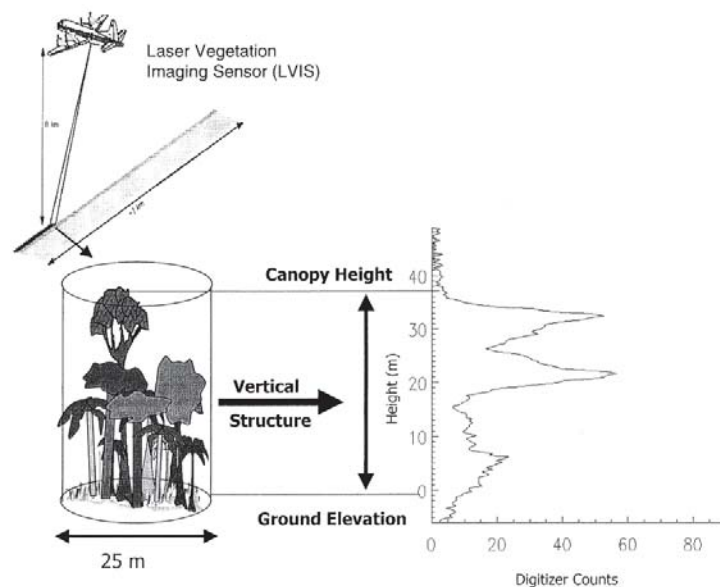


Fig. 6. Principal of LiDAR measurement. (Jason *et al.*, 2002)

Small-footprint LiDAR 데이터를 이용하여 수목 임관과 같은 수직적 구조를 파악하는 것이 가능하다 (Maltamo *et al.*, 2005). 따라서 2차원 영상이 제공하는 공간의 수평적 분포 이외에 산림의 복잡한 수직적 구성에 대한 정보를 제공함으로써 그 활용 가치가 높아(윤 등, 2006) 최근 LiDAR 기법을 이용한 산림 생태계 특성 측정은 빠르게 증가하고 있다.

산림 및 생태학 분야에서 LiDAR 데이터의 활용은 임관의 표면, 수고, 줄기의 밀도, 수관폭과 같은 식생 매개변수 등을 이용한 환경적 모델링뿐만 아니라(Sorin *et al.*, 2002) 현장조사를 통한 생물의 종 조사 데이터와 결합하여 종 풍부도의 패턴을 예측한 식생도면 작성도 가능하게 되었다(Gould, 2000). LiDAR 데이터의 직접 분석을 통해 도출한 수고, 임목밀도, 수관올폐도, 흉고직경과 같은 물리적 인자와 이를 이용하여 생체량 및 엽면적 지수와 같은 직접적인 조사가 어려운 생태학적 인자에 대해서는 회귀식을 이용한 모델링 등을 통한 간접 분석 방법을 사용하는 연구도 활발히 진행되고 있다(윤 등, 2006).

Pang *et al.*(2004)은 large footprint LiDAR 파장을 이용하여 산림 공간적 구조를 분석하기 위해 흉고 직경, 수고, 임분의 각 수종을 변수로 하는 3차원적인 수형 모델(the area under the waveform from vegetation, AWAV)을 만들어 기존의 지표인 HOME(Height of Median Energy)와 비교하였다(Fig. 7, Fig. 8). Scott *et al.*(2007)은 LiDAR 데이터의 높이와 반사 강도, 계절 차이가 있는 Landsat ETM 영상 2개를 이용하여 지표를 분석하였고, 조류 중 조사를 수행하여 영상 분석을 통한 식생 다양성 평가 결과를 검증하였다. Maltamo *et al.*(2005)은 HistMod 알고리즘(Lloyd, 1982)에 대상지의 식생조사 데이터와 3D 영상을 적용하여 하층 수목의 식생을 포함한 다층 구조의 임분을 분석하였다. 이것은 샘플의 K-차원의 구역에 대하여 N-단계의 벡터 코딩 방법이며, 데이터들의 오류를 줄일 수 있는 방법이다. 하층 식생의 정확한 부피 측정을 위해 수목 밀도(수목 개체수/ha)와 수목들의 Lorey's mean height 회귀 모델을 이용하여 정량화하였다.

Kimes *et al.*(2006)은 NASA의 Laser Vegetation Imaging Sensor(LVIS)를 이용하여 Gap 분포 측정을 하였다. 4개의 다른 각도로 촬영하는 디지털 카메라인 Airborne Multi-Angle Imaging spectrometer(Air-MISR)와 ASTER 영상을 함께 이용하였다. LVIS 데이터는 미세규모(직경 20m footprints)에서 산림의

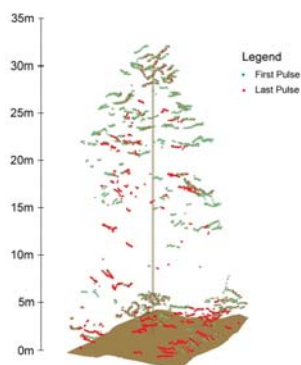


Fig. 7. Tree shape polygon using LiDAR data. (Blaschke *et al.*, 2004)

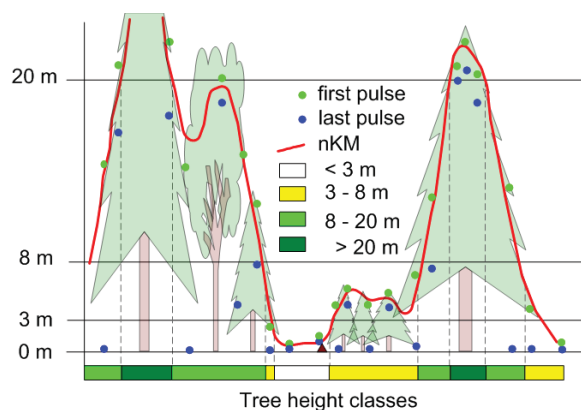


Fig. 8. Height standard. (Maier *et al.*, 2006)



Fig. 9. LiDAR points data and trees modeling.
(Left: LiDAR data, Right: 3D image modeling)(Tiede *et al.*, 2005)

수직적 구조를 보다 정확히 나타내었다. 산림 구조 내 높은 다양성을 나타내는 연구 대상지에서 산림 군락의 정교한 패치워크(patchwork) 정보의 획득을 위해 다중선형회귀식과 신경망모델을 개발하였다. 이 모델은 28 AirMISR 값으로부터 LVIS의 LVIS forest energy 측정하는 것으로, AirMISR 데이터를 이용한 최고 임관 높이의 예측 정확도가 가장 높았다.

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer) 영상의 경우, 넓은 공간 스케일에서 산림 유형, 피복 비율, 엽면적지수(LAI), 일차순생산량(NPP)와 같은 산림 매개변수의 유형 파악은 가능하지만, 산림의 수직적·공간적 구조에 대한 통찰력은 제공하지 못한다(Kimes *et al.*, 2006). 따라서 현장 조사 데이터와 함께 이용하여 흉고 단면적 합계, 생체량, 임관 부피와 같은 수직적 특성과 엽면적, 높은 생물량 평가가 가능하다(Nelson *et al.*, 1984; Lefsky *et al.*, 1999; Means *et al.*, 2000)(Fig. 9).

4. 소결

LiDAR 데이터를 이용한 산림 식생의 구조적 다양성 관련 이론 및 선행 사례의 주요 내용은 다음과 같이 종합할 수 있다. 우선 산림 식생의 구조적 다양성에 관련하여 식생의 수평적·수직적 상호 연관관계에 의해 산림 생태계의 특성이 결정되며, 이는 생물의 다양성에 영향을 미친다고 하였다(김, 2006; 이, 2004; 이 등, 2005; Kimes *et al.*, 2006; Lang, 2006).

선행 연구를 고찰한 결과, 식생 및 조류 종을 대상으로 출현 여부를 관찰하는 현장조사 방법과 위성영상 등 평면적인 데이터를 활용하여 지표를 통해 경관스케일에서 산림 식생의 다양성을 분석하는 방법을 사용하고 있었다. 그러나 산림은 면적이 넓고, 지형 특성으로 인하여 접근이 용이하지 않기 때문에 현장조사의 경우 시간, 경비, 인력, 취득되는 정보의 양, 정확성 등의 측면에서 효율적이지 못하고, 산림의 특성을 정량적, 정성적으로 측정하기가 어렵다. 또한, 2차원 영상의 경우, 수평적인 분포 분석만 가능하기 때문에 산림의 복잡한 수직적 구성에 대한 정보를 파악하기가 어렵다(윤 등, 2006). 최근, 이러한 현장조사와 2차원 영상의 한계를 보완하기 위하여 3차원 정보를 포함하고 있는 LiDAR 데이터를 이용하여 산림 식생의 수직구조의 다양성을 분석한 연구가 증가하고 있다(Pang *et al.*, 2004; Maltamo *et al.*, 2005; Scott *et al.*, 2007).

그러나 국내에서는 아직까지 산림 식생구조의 수직적 요소를 고려한 다양성을 연구 및 평가한 사례가 없으며, 수목 개체의 분석 등 산림 구성요소의 파악(곽 등, 2005; 장 등, 2005; 장 등, 2006)과

LiDAR 데이터를 이용한 수직적 구조 분석이 일부 이루어지고 있을 뿐(이 등, 2008) 기존의 선행 연구를 포함하여 전반적인 산림 식생의 구조적 다양성 평가는 미흡하다.

따라서 본 연구는 다양한 개발 계획 수립 이전에 선행되어야 하는 산림 생태계에 대한 정확한 평가가 가능하도록 수직적·수평적 측면에서 산림 식생의 구조적 다양성을 정량적으로 평가하고자 한다는 점에서 의의가 있으며, 기존의 연구와 차별화 될 수 있을 것으로 판단된다.

연구의 범위 및 방법

1. 연구의 범위

본 연구에서는 산림 주변의 인위적 간섭 중 택지 개발과 농경지를 중심으로 연구의 범위를 설정하였으며, LiDAR 데이터를 활용하여 토지이용에 따른 산림의 수직적 구조를 분석하였다. 연구 대상지는 택지와 농경지의 토지이용이 나타나는 경기도 시흥시 연성동의 산림을 대상으로 하였다(Fig. 10). 연구에 사용된 데이터는 Table 1과 같다.

한국토지공사(2004)에 의하면 천연기념물, 환경부지정 멸종위기 야생식물 및 보호 야생식물종은 분포하고 있지 않으며, 인근 산림의 식생형은 이차림의 상수리나무군락, 식재림의 밤나무군락, 밤나무-아까시나무군락, 밤나무-상수리나무군락, 리기다소나무군락, 리기다소나무-밤나무군락, 아까시나무군락, 아까시나무-밤나무군락으로 구성되어 있다. 산림 식생 이외의 지역에서는 이차초원, 과수원, 묘포장, 경작지, 주거지 및 나지의 형태로 이용되고 있다. 녹지자연도 등급별 분포현황은 경작지, 이차림, 식재림 순으로 넓은 면적을 차지하고 있다. 육상동물의 경우, 두더지, 족제비, 멧토끼, 청설모, 다람쥐, 애급쥐, 생쥐, 등줄쥐, 멧발쥐, 고라니 총 6과 10종이 서식하는 것으로 확인되었으며, 법적보호종은 포함되어 있지 않다. 인근에 서해안고속도로, 지방국도 등으로 인하여 인간의 교란이 심한 지역으로 이 지역의 포유동물의 서식밀도는 낮다. 조류의 경우 1종의 보호종을 포함하여(말뚝가리) 해오라기, 황로, 쇠백로, 중대백로, 꿩, 뺨뺨도요, 멧비둘기, 쇠딱다구리, 직박구리, 때까치, 굴뚝새, 딱새,

Table 1. Attributes of LiDAR data

Information	Data
Date	2006. 10
Measurement altitude	1,400 m
Footprint	71 KHz
Point density	8 points/m ²
Scan frequency	40Hz
Scan angle	±18
Velocity	66.9m/s
Overlapping rate	50%
Overlapping width	780m

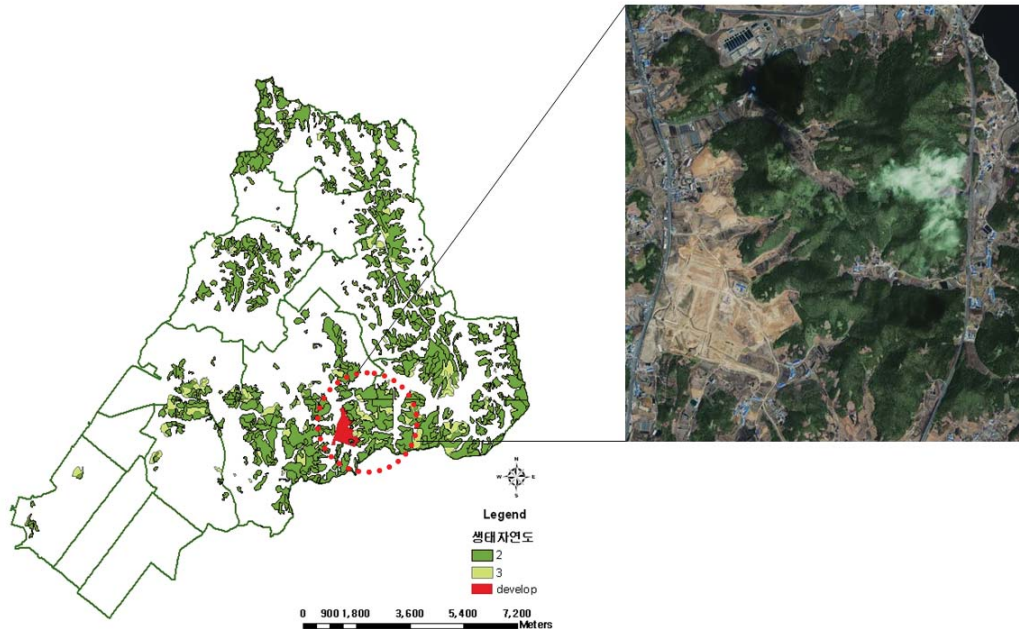


Fig. 10. The location of the study area.

노랑지빠귀, 붉은머리오목눈이, 오목눈이, 박새, 쇠박새, 족새, 노랑턱멧새, 되새, 콩새, 참새, 피꼬리, 어치, 까치 총 18과 26종이 서식하고 있다.

시흥시는 개발제한구역 대상은 총 11개 동 5,738가구(36,093인)에 해당되며, 총 면적은 102.29km²으로 임야가 43.29km²(42.3%)로 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 연구 대상지는 과거에는 개발제한구역에 포함되었지만 건설교통부고시 제 2003-275호(2003. 11. 13)에 의하여 개발제한구역이 해제(시흥 도시관리계획변경결정)되어 택지 개발이 진행 중에 있는 상황으로, 개발에 의한 산림 생태계의 훼손을 정량적으로 판단하는 것이 필요한 지역이다.

2. 연구의 방법

LiDAR 데이터를 이용하여 택지와 농경지에 인접한 산림의 구조를 비교하기 위하여 산림의 단면 분석, 수목 개체수 분석, 수목의 수고 분석, 흉고직경 및 평균 수관폭 분석을 수행하였다. 개체수 및 수고는 LiDAR 데이터 분석을 통해 직접 분석이 가능하지만, 흉고 직경, 평균 수관폭 등 직접 분석이 어려운 경우 실제 조사를 통해 도출된 수종별 함수식을 적용하여 산림의 다양한 정보를 간접적으로 분석이 가능하다(전 등, 2007). 본 연구에서는 농림부(2007)에서 수고 및 흉고 직경 실측치를 바탕으로 선정한 흉고 직경-총 수고 모델식을 적용하여 흉고 직경과 평균 수관폭을 분석하였다.

대상지의 산림 지역을 추출하기 위하여 생태자연도(환경부, 2005)와 임상도(산림청, 1992), LiDAR 데이터를 이용하였으며, 분석을 위하여 ArcMap 9.2, ArcView 3.2, SPSS 2006, ENVI 4.2, TERASCAN,

AutoCAD 2006 프로그램을 이용하였다.

LiDAR의 포인트 데이터는 역거리가중보간법(Inverse Distance Weight; IDW)³⁾을 이용하여 2m 격자 단위의 nDSM(normalized Digital Surface Model)을 생성하였고, 택지와 농경지에 인접한 산림의 단면도를 생성하여 각 토지이용에 따른 수목의 수직구조를 파악하였다. 유역분할 알고리즘(Watershed algorithm)⁴⁾을 적용하여 수목 개체를 분석하였으며, 평균 수관폭이 6m 이상인 수목을 기준으로 필터링하고, 수목 개체 polygon의 중심점을 도출하여 수목 개체수를 추정하였다. 중심점의 높이를 수고로 분석하였고 분석한 수고 값을 이용하여 수목의 흉고직경과 평균 수관폭을 예측하였다⁵⁾.

택지개발 및 농경지에 인접한 산림을 비교하기 위하여 각 지역을 대상으로 2지점씩 100×100m 크기의 plot을 선택하여 개체수, 밀도, 수고, 흉고직경, 수관폭으로 대표되는 산림의 구조적 차이를 비교하였다.

결과 및 고찰

본 대상지의 생태자연도 분석 결과 대상지의 63%가 생태자연도 2등급, 2영급이며, 37%는 3등급과 1영급으로 구성되어 있으며, 혼효림 군락을 이루고 있다. LiDAR 데이터를 이용하여 nDSM을 생성하여 분석하였다(Fig. 11).

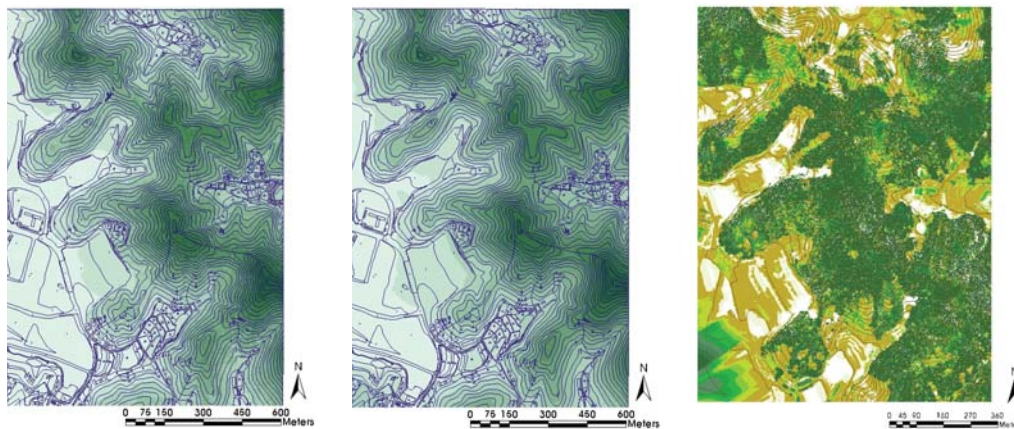


Fig. 11. DSM, DEM, nDSM at the study area.

- 3) 역거리가중보간방법(Inverse Distance Weight; IDW): 주변의 가까운 점으로부터 선형으로 결합된 가중치를 사용하여 새로운 셀의 값을 결정하는 보간방법.
- 4) 유역분할 알고리즘: 유역은 지리학에서 서로 다른 강의 지류들에 의해 배수되는 영역들을 나누는 능선이다. 집수 지역은 물을 강이나 저수지로 흘려보내는 지리학적 영역이다. 유역분할알고리즘이란 이러한 개념을 명암단계(Gray-Scale) 영상에 적용한 것이다. 그레이-스케일 영상의 화소값을 높이로 해석하여 위사학적 표면으로 생각한다면, 빗방울이 3차원 표면에 떨어졌을 때 집수지역으로 모이게 된다. 이 때 2곳 이상의 집수 지역으로 모일 확률이 같은 곳이 능선이 된다. 이러한 집수지역과 능선을 찾아 각 지역을 분할하는 것을 유역분할 알고리즘이라고 한다(장 등, 2006).
- 5) DBH: $\ln H = 0.349 + 0.770 \ln DBH$
수관폭: $C.W. = 3.794 + 0.046 DBH$

단면도를 통하여 산림의 수직 구조를 분석하였을 때, 택지와 인접한 산림의 수고는 평균 14.5m였으며, 농경지에 인접한 산림의 수고는 평균 15.3m였다. 택지에 인접한 산림에서 평균 수고는 비교적 낮게 분석되었지만, 최고 수고는 농경지에 인접한 산림보다 높게 분석되었다(Table 2). 택지에 인접한 산림은 농경지에 인접한 산림에 비하여 약 8m 이내의 관목 및 아교목, 낮은 교목의 출현 개체수가 높았고, 농경지에 인접한 산림에서는 택지 인근의 산림에 비하여 8m 이상의 높은 교목의 출현 빈도가 높았으며, 택지는 산림의 외부 지역에서부터 내부 지역으로 약 60m까지 교란을 야기하는 것으로 분석되었다(Fig. 12, 13).

Table 2. Analysis of forest at the study area

Height(m) \ Site	Forest near the residential area	Forest near the agricultural area
Average	14.5	15.3
Max.	22.4	21.3
S.D.	4.7	4.0

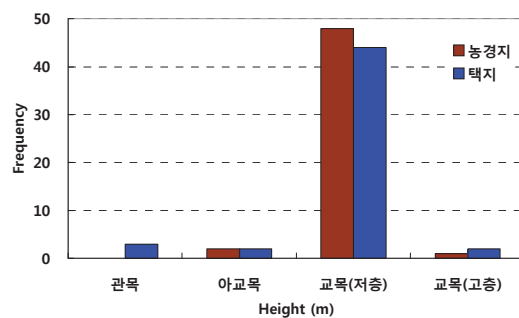


Fig. 12. Analysis of forest vertical structure.

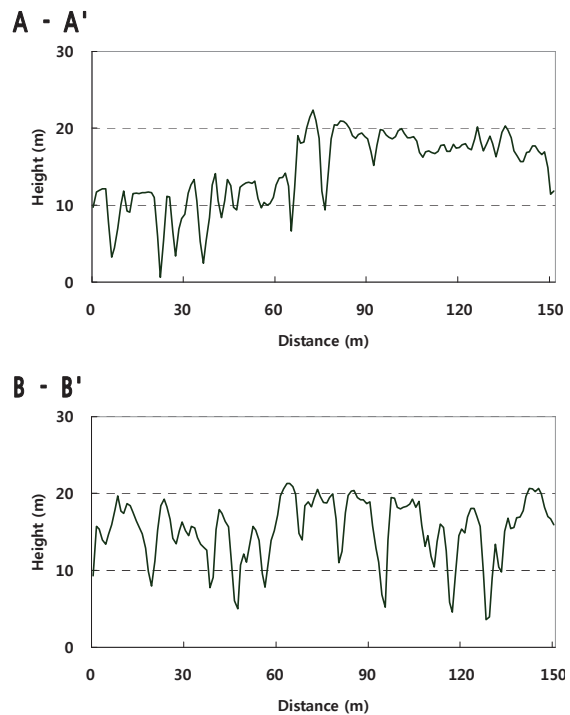
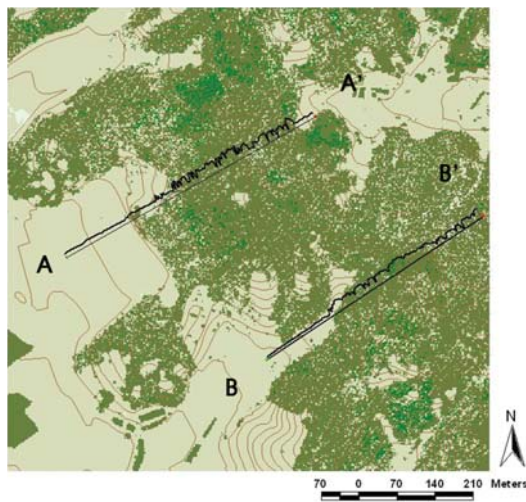


Fig. 13. Section analysis of forest structure.

(A: Forest near the residential area, B: Forest near the agricultural area)

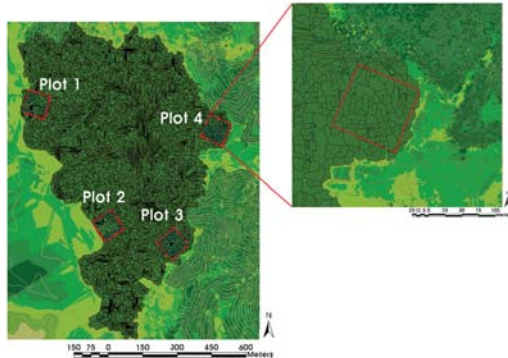


Fig. 14. Analysis of individual trees.

Table 3. Analysis of forest structure

Average	Site	Forest near the residential area		Forest near the agricultural area	
		Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4
Height (m)		12.1±3.1	14.9±4.0	16.2±4.4	15.3±3.6
D.B.H. (cm)		16.4±5.6	21.4±7.6	23.5±8.0	22.1±6.8
Width of crown (m)		4.6±0.26	4.8±0.3	4.9±0.4	4.8±0.3
Density (individual tree/ha)		38	34	38	45

대상지 전체 지역의 수목은 총 3,447개체로 분석되었다(Fig. 14). 8m 이상의 교목을 대상으로 수목 개체수를 분석하였을 때, 택지에 인접한 산림에 비하여 농경지에 인접한 산림의 수고 분포가 고른 경향을 보였다. 택지와 농경지에 인접한 산림에서 각 100×100m 크기의 plot(테스트 지역)을 두 지점을 선정하여 비교하였을 때, 택지에 인접한 산림의 교목은 1ha당 평균 36개체, 농경지에 인접한 산림에서는 평균 41.5개체로 분석되었다. 평균 수고를 비교하였을 때 택지에 인접한 산림은 13.5m, 농경지에 인접한 산림의 평균 수고는 15.8m로 분석되었다(Table 3).

모델링 결과, 평균 흉고 직경과 수관폭은 농경지에 인접한 산림에서 값이 높게 나타났다(Table 4). 평균적인 참나무의 흉고 직경은 15.5cm, 수고 11.7m, 수관폭 4.7m, 3영급을 나타내는 것을 기준으로 하였을 때, 농경지에 인접한 산림의 수목이 택지에 인접한 산림에 비하여 보다 성숙한 산림으로 분석되었다.

장 등(2006)의 연구에서 LiDAR 데이터를 분석하여 개체수와 수고를 분석하고 정확도 검증을 위하여 현장 조사를 통해 확인하였다. T-test 결과 개체수 추정의 R^2 값이 0.83으로 높은 상관관계를 보였다. 현장조사에서 수고를 측정하는 도구인 하그로프수고측정기(Haglof Hypsometer)를 사용한 경우에도 여러 요인으로 인하여 측정오차가 1~2m 정도 발생하기 때문에 이러한 점을 감안하면 수고 추정치와 실측값이 높은 상관도를 보인다고 하였다. 곽 등(2005)도 잣나무림, 낙엽송림, 참나무림, 비식생 지역을 대상으로 LiDAR 데이터를 분석하여 수고, 지하고, 흉고 직경, 흉고 단면적 등을 분석하였는데, 최대 0.68, 0.19, 0.86, 0.96의 높은 상관관계를 보였다.

분석 대상지 현장을 확인한 결과, 택지 인근의 산림은 산책로를 조성하여 인근 주민들의 여가활동 향상을 도모하였기 때문에 조림이 잘 되어 있었다. 따라서 관목 등의 낮은 하층 식생들이 많이 분석된 결과가 타당하다고 사료된다. 또한, 농경지 인근의 산림을 확인하였을 때, 농경지 조성을 위하여 산림을 지속적으로 관리하고 있기 때문에 하층 식생이 거의 존재하지 않았다(Fig. 15).

영상의 촬영 시기가 수목에 잎이 붙어있는 10월이고, 현장조사 시기가 잎이 떨어진 12월임을 감안하여 추후, 비슷한 시기에 식생조사를 하여 수목의 개체수와 밀도 및 흉고 직경과 수관폭 분석 결과와 현장조사를 통해 수집한 데이터를 비교하는 것이 추후 보완되어야 하며, 일반적으로 택지 인근의 산



Fig. 15. Status of the study area.

(Left: forest near the residential area, Right: forest near the agricultural area)(2008. 12. 17)

림 가장자리는 급격한 인위적 교란으로 인하여 관목 및 아교목의 발달이 적지만, 본 연구 대상지에서는 인근 주민을 위한 조림지 조성으로 인하여 선행 연구 결과를 통해 나타나는 산림 가장자리 구조의 분석 결과와 차이가 있었다. 대상지가 일부 지역에 집중되어 있어 연구 결과를 일반화하기 어렵기 때문에 다른 산림을 대상으로 추가적인 분석이 필요하다고 사료된다. GIS를 이용한 중첩분석이 가능하도록 포인트 데이터를 격자의 데이터로 변환하는 과정에서 발생하는 오차를 간과할 수 없기 때문에 추후 연구에서는 LiDAR 데이터의 처리방법 및 수목지역 추출방법을 보완해야 할 것이며, 추정된 수고와 개체수 등을 이용하여 임분체적, 바이오매스 등의 추정에 관한 연구도 필요할 것이다.

참고문헌

- 강준목, 윤희천, 민관식, 위광재. 2006. LiDAR 자료에 의한 지형해석. 한국측량학회지. 24(5): 389-397.
- 곽두안, 이우균, 손민호. 2005. 개체목 및 임분조사를 위한 LiDAR 응용에 관한 연구. 한국임학회지. 94(6): 431-440.
- 김대식. 2003. 항공레이저 매핑시스템 LiDAR와 GPS 기술의 응용. 한국관개배수학회지. 10(1): 103-111.
- 김영숙, 박현우, 권미경, 김수일. 2002. 산림환경구조에 따른 조류군집 비교 연구. 한국조류학회지. 9(2): 105-114.
- 김종원. 2006. 녹지생태학. 월드사이언스. 103-164.
- 농림부. 2007. 지속가능한 산림 자원관리를 위한 통합 산림경영 시스템 개발.
- 박경훈, 정성관, 이현택, 오정학, 김경태. 2004. 금호강 유역 산림의 경관생태적 패턴분석. 한국지리정보학회지. 7(3): 22-34.
- 산림청. 1992. 임상도.
- 우충식, 윤정숙, 신정일, 이규성. 2007. 항공 LiDAR 데이터를 이용한 산림지역의 개체목 자동 인식 및 수고 추출. 한국임학회지. 96(3): 251-258.

- 윤정숙, 이규성, 신정일, 우충식. 2006. 산림지역에서의 항공 LiDAR 자료의 특성 및 지면점 분리. 한국위성영상학회지. 22(6): 533-542.
- 이근상, 고덕구, 채효석, 신영호. 2003. 항공레이저측량 자료의 해상도에 따른 DEM 오차 비교평가 연구. 한국지리정보학회지. 6(3): 33-42.
- 이도원. 2004. 경관생태학: 환경계획과 설계, 관리를 위한 공간생리. 서울대학교출판부.
- 이동근, 김명수, 구본학, 김경훈, 김동성, 나정화, 윤소원, 이명우, 전성우, 정홍락, 조정두, 제종길, 홍선기. 2005. 경관생태학. 보문당. 120-126.
- 이동근, 김은영, 오규식. 2005. 패치크기, 연결성, 가장자리를 고려한 보전가치평가. 환경영향평가. 8(5): 56-67.
- 이동근, 류지은, 김은영, 전성우. 2008. LiDAR 데이터를 이용한 산림 구조 분석: 오산시 남촌동의 산림을 대상으로. 환경영향평가. 17(5): 279-288.
- 장안진, 김대성, 김용일, 김경욱. 2005. LiDAR 데이터와 컬러항공사진을 이용한 수목의 개체 추출 및 높이 추정. 한국GIS학회지. 22: 67-74.
- 장안진, 유기윤, 김용일, 이병길. 2006. 컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용한 수목 개체 및 수고 추정. 대한원격탐사학회지. 22(6): 543-551.
- 장안진, 유기윤, 김용일, 이병길. 2006. 컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용한 수목 개체 및 수고 측정. 한국위성영상학회지. 22(6): 543-551.
- 전성우, 홍현정, 이종수, 이우균, 성현찬. 2007. LiDAR를 활용한 국토환경성평가지도 산림부문 신규 평가항목의 도입 가능성 평가. 한국환경복원녹화학회지. 10(5): 20-30.
- 정종철. 1999. 식생지수에 의한 경관파편화의 해석기법. 한국지리정보학회지. 2(3): 16-22.
- 최연웅, 조기성. 2005. 도시지역 LiDAR DSM으로부터 DEM 추출기법 연구. 한국지형 공간정보학회논문집. 13(1): 19-25.
- 한국토지공사. 2004. 시흥능곡지구 택지개발사업 환경영향평가서.
- 한수희, 김용일, 유기윤. 2003. LiDAR 반사 강도와 DSM을 이용한 토지피복 분류에 관한 연구. 측량 및 지형 공간정보공학지. 23(1): 107-114.
- 홍선기. 1999. 경관생태학적 관점에서의 생물다양성 보전. 한국생물다양성협의회보. 9:3-14.
- 홍선기, 임영득, 중월신화, 장남기. 2000. 한국 농산촌 경관의 구조와 이질성 및 다양성의 최근 변화: 경관의 보전과 복원과의 관계. 한국생태학회지. 23(5): 359-368.
- 환경부. 2005. 생태자연도.
- Amy, L. N., G. Roberto, E. S. Bob and J. U. Timothy 2006. Comparison of small-footprint and large-footprint waveform LiDAR for terrestrial surface characterization. IEEE. 3741-3744.
- Andrew, T. H., A. L. Michael, B. C. Warren and B. Mercedes. 2002. Integration of lidar Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. Remote Sensing of Environment. 82: 397-416.
- Blair J. B., L. R. David and A. H. Michelle. 1999. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only. Airborne Laser Altimeter for Mapping Vegetation and Topography. 54: 115-122.
- Blaschke, T., D. Tiede and M. Heurich. 2004. 3D-landscape metrics to modelling forest structure and

- diversity based on laser-scanning data, International archives of the photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 36(8/W2): 129-132.
- Gould, W. 2000. Plant species richness, and regional biodiversity hotspots, ecological applications. Remote Sensing of Vegetation. 10: 1861-1870.
- Jason, B. D., O. D. Ralph, B. C. David, G. K. Robert, J. B. Blair, A. H. Michelle, L. C. Robin, F. W. John and D. P. Stephen. 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. Remote Sensing of Environment. 79: 305-319.
- John, R. J. 2006. Remote Sensing of the Environment and Earth Resource Perspective. Prentice Hall.
- Kimes, D. S., K. J. Ranson, G. Sun. and J. B. Blair. 2006. Predicting lidar measured forest vertical structure from multi-angle spectral data. Remote Sensing of Environment. 100: 503-511.
- Lang, S., D. Tiede, B. Maier and T. Blaschke. 2006. 3D forest structure analysis from optical and LiDAR data. Revista mbiencia, Guarapuava, v.2 Edicao Especial. 1: 95-110.
- Lefsky, M. A., W. B. Cohen, S. A. Acker, G. G. Parker, T. A. Spies and D. Harding. 1999. LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. Remote Sensing of Environment. 70: 339-361.
- Lloyd, S. P. 1982. Least Squares Quantization in PCM. IEEE Trans. Inf. Theory. 28(2): 129-137.
- Maier, B., D. Tiede and L. Dorren 2006. Assessing mountain forest structure using airborne laser scanning and landscape metrics. Bridging Remote Sensing and GIS-1st International Conference on Object-Image Analysis, Salzburg.
- Maltamo, M., P. Packalen, X. Yu, K. Eerikaninen, J. Hyypä and J. Pitkanen 2005. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. Forest Ecology and Management. 216: 41-50.
- McGarigal, K. and B. Marks. 1995. Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA Forest Service, General technical report PNW-GTR-351. Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- Means, J. E., S. A. Acker, B. J. Fitt, M. Renslow, L. Emerson and C. J. Hendrix. 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 66: 1367-1371.
- Meffe, G. K. and C. R. Carroll. 1994. Principles of Conservation Biology, Sunderland: Sinauer Associate, Inc.
- Michel, P., J. Jenkins, N. Mason, K. J. M. Kickinson and I. G. Jamieson. 2008. Assessing the ecological application of lasergrammetric techniques to measure fine-scale vegetation structure. Ecological informatics. Article in Press.
- Naveh, Z. 1994. From biodiversity to ecodiversity: A landscape-ecology approach to conservation and resoration. Restoration Ecology. 2: 180-189.
- Nelson, R. F., W. Krabill and G. Maclean. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne

- laser data. Remote Sensing of Environment. 15: 201-212.
- Pang, Y., S. Guoqing and Z. Li. 2004. Effects of forest spatial structure on large footprint LiDAR waveform. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 7: 4738-4741.
- Ralph, D., K. Robert, H. Michelle, J. B. Blair and D. Fason. 2000. Land surface characterization using LiDAR remote Sensing, Spatial information for land use management.
- Scott, G., S. Daniel, D. Ralph and B. Bryan. 2007. Laser remote sensing of canopy habitat heterogeneity as a predictor of bird species richness in an eastern temperate forest, USA. Remote Sensing of Environment. 108: 254-263.
- Seto, K. C., E. Fleishman, J. P. Fay and C. J. Betrus. 2004. Linking spatial patterns of bird and butterfly species richness with Landsat TM derived NDVI. Remote Sensing. 25(20): 4309-4324.
- Sorin, C. P., R. H. Wynne and J. A. Scrivani. 2004. Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in virginia, USA. Forest Science. 50(4): 551-565.
- Tiede, D., G. Hochleitner and T. Blaschke. 2005. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning, the international archives of photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVI, Part 3/W24, Vienna, 9-14.
- Vaughn, C. R., J. L. Bufton and D. Rabine. 1996. Georeferencing of airborne laser altimeter measurements. International Journal of Remote Sensing. 17(11): 2185-2200.
- Whittaker, R. H. 1965. Dominance and diversity in land plant communities. Science. 147:250-259.

요 약

택지 개발과 농경지 이용 등으로 인한 산림의 훼손은 생물이 서식하는 공간을 감소시키며, 이는 생물의 종다양성 감소를 초래한다. 다양한 생물의 서식을 위하여 산림 생태계의 보전 및 복원 등을 위한 수목 관리를 하기 위해서는 산림의 구조를 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 LiDAR 데이터를 활용하여 인위적 훼손이 산림의 구조에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 연구 결과, 농경지에 인접한 산림의 구조적 다양성이 높았으며, 택지의 경우 산림의 외부지역에서부터 약 60m까지 교란이 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 다양한 층위구조는 보다 다양한 생물의 서식공간을 제공하며, 본 연구 결과 농경지에 인접한 산림의 경우 구조적으로 안정되어 보다 높은 다양성을 보이고 있었다. 택지에 인접한 산림의 경우 지속적인 수목의 관리가 이루어지기 때문에 사료되며, 이러한 연구를 바탕으로 다양성이 낮은 지역에는 하층식생의 도입 등을 통한 산림의 구조적 다양성 증진을 위한 산림 관리가 필요하다.

검색어: 산림 생태계, 인위적 교란, 수목 개체, 수목 밀도, DBH, 수관폭