

원격탐사자료를 이용한 국외 산림 바이오매스 추정 현황 및 비교분석: 다섯 가지 관점에서의 고찰

Review and Comparative Analysis of Forest Biomass Estimation Using Remotely Sensed Data: from Five Different Perspectives

조경훈* · 허 준** · 정재훈*** · 김창재**** · 김경민*****

Cho, Kyung Hun · Heo, Joon · Jung, Jae Hoon · Kim, Chang Jae · Kim, Kyung Min

要 旨

최근 환경오염으로 인한 기후변화가 문제시 되고 있는 가운데, 지구온난화의 주범인 탄소의 배출 및 저장량 추정이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 특히 산림 바이오매스는 대기과 토양 간 탄소 순환의 중요한 매개체로서 전 지구적인 탄소 순환에 잠재적인 영향을 미치기 때문에 이러한 산림 바이오매스의 각종 파라미터를 추정하고 정량화 하려는 노력이 각국에서 진행중에 있다. 그러나 현장조사를 통한 추정은 시간 및 인력낭비가 심하고, 접근이 용이 하지 않은 지역에 대한 조사가 어렵기 때문에 원격탐사자료를 이용한 방법이 각광받고 있다. 본 논문은 총 41개의 해외연구 사례를 바탕으로 원격탐사자료를 이용한 산림 바이오매스 추정 연구를 다섯 가지 관점(연구대상지역; 연구대상면적; 생태군계; 원격탐사자료; 추정기법)에 따라 분류하고, 연구사례 및 기반 기술이 제한적인 국내 관련 분야의 기반자료로서 활용할 수 있도록 하고자 하였다. 조사결과 연구대상지역으로는 북미지역이 39%로 가장 많은 연구 사례가 존재하였으며, 연구대상면적에 대한 조사에 있어서는 지역크기를 대·중·소로 분류 시 소규모 지역 (3,600km²)의 연구 수가 59%로 가장 많았다. 생태군계의 경우 북쪽 수림대/타이가 지역이 30%로 연구가 활발하게 수행되었고, 원격탐사자료 사용 빈도는 Landsat 시리즈와 LiDAR가 각각 35%, 16%를 차지하였다. 마지막으로 산림 바이오매스 추정기법에 있어서는 회귀분석 방법이 71%로 가장 많이 사용된 것으로 나타났다.

핵심용어 : 지구 온난화, 산림 바이오매스, 원격탐사

Abstract

Carbon emissions and storages that are strongly related to global warming has have emerged as one of the important issues while many governments and researchers have been interested in climate change and pollution. In this regards, forest biomass estimation is quite importance since forest biomass works as an important medium of the global carbon cycle between the atmosphere and soil. Forest biomass estimation through field survey needs lots of time and labors, and has accessibility issues. Hence, many researchers have focused on the forest biomass approaches based on remotely sensed data. This research comprehensively reviewed forty one international studies using remote sensing data according to five different categories (i.e., location of study area, size of study area, biome, used remote sensing data, and estimation technology). It would be expected that the results of this study can be used for suggesting domestic research directions; domestic research in this field is at the beginning stage in terms of level of technologies and useful materials. As results, 39% out of the reviewed studies used the areas located in North America. 59% out of the researches dealt with small size of the study areas (less than 3,600km²). In case of biome, around 30% of the studies focused on the boreal/taiga areas. Moreover, 35% and 16% of the studies were carried out using Landsat series and Lidar data, respectively. Finally, regression analysis method was most frequently used for forest biomass estimation by 71% out of 41 studies.

Keywords : Global Warming, Forest Biomass, Remote Sensing

2011년 2월 15일 접수, 2011년 3월 17일 채택

- * 연세대학교 토목환경공학과 석사과정(vanguard22@yonsei.ac.kr)
- ** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 부교수(jheo@yonsei.ac.kr)
- *** 고신저자 · 학생회원 · 연세대학교 토목환경공학과 통합과정(lionheart_kr@yonsei.ac.kr)
- **** 정희원 · 연세대학교 건설공학연구소 연구교수(changjaekim@yonsei.ac.kr)
- ***** 국립산림과학원 산림자원정보과 임업연구사(greenann@forest.go.kr)

1. 서 론

21세기에 들어 지구 온난화 및 기후 변화는 전 세계적인 문제로 인식되고 있으며, 이러한 지구 온난화의 주범인 탄소의 배출과 순환을 파악하고자 하는 많은 연구가 진행 중에 있다. 특히 산림 바이오매스는 이산화탄소의 주요 흡수원으로서 대기과 토양 사이의 탄소 순환에 중요한 역할을 하고 있고 지구온난화에 잠재적으로 영향을 미치기 때문에 이러한 산림 바이오매스를 모니터링하고 체계적으로 관리하고자 하는 많은 연구가 시도되어 왔다(Goetz et al., 2009; Turner et al., 2004). 각종 산림 바이오매스와 관련된 파라미터를 조사하기 위해서는 현장자료를 수집하는 방법이 있으나 시간 및 인력의 낭비가 심하고, 접근이 용이하지 않은 지역에 대한 조사가 어렵다는 단점이 있다. 한편, 원격탐사의 경우 광범위한 지역을 대상으로 자료취득이 가능할 뿐만 아니라, 자료 취득 및 처리가 용이하므로 현장조사에 대한 대안으로서 많은 각광을 받고 있다(Fuchs et al., 2009). 따라서 최근 산림 바이오매스 추정 시 현장자료와 원격탐사를 연계하는 방법이 널리 사용되고 있다(Wulder et al., 2008; Labrecque et al., 2006; Boudreau et al., 2008).

2000년대 이후 국내에서도 이러한 원격탐사자료를 이용해 산림 바이오매스를 추정하려는 연구가 활발히 시도되고 있다. 장안진과 김형태(2008)는 현장조사의 단점을 보완하기 위해 항공사진과 LiDAR 자료를 이용하여 산림 바이오매스 추정 연구를 수행한 바 있으며, 정성영 등(2009a)은 산림 바이오매스 변환표와 위성영상을 이용하여 전라북도 무주군의 임분 변수 주제도를 작성하고 이를 통해 총 산림 바이오매스의 양을 추정하고자 하였다. 또 다른 연구에서 임종수 등(2007, 2009)은 강원도 평창군과 전라북도 무주군을 대상으로 위성영상 자료와 kNN 기법을 이용해 산림 바이오매스를 추정한 바 있다.

하지만 아직 국내의 경우 해외 동향에 비추어 연구 사례 및 기반 기술이 제한적인 상황이다. 따라서 국내 지역에 적합한 산림 바이오매스 추정을 위해서는 다양한 기존 연구 사례를 검토하고, 연구 지역의 환경과 추정기법, 원격탐사자료를 조사하여 국내 지역에 대한 적용성 검토가 필요하다. 이러한 시점에서 본 원격탐사기반 산림 바이오매스 추정 연구 현황조사는 향후 국내 연구의 방향을 제시하고, 관련 연구의 기반 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서는 국외 사례를 중심으로 원격탐사자료를 이용한 산림 바이오매스 추정 연구 현황 및 동향을

조사하였다. 최신 동향 조사를 위해 조사 기간은 최근 10년 간 발표된 논문으로 제한하였으며, 총 41개의 해외저널 등재논문이 검토되었다. 기존의 연구들을 바탕으로 산림 바이오매스 추정에 영향을 미친다고 사료되는 다섯 가지 범주(연구대상지역; 연구대상면적; 생태군계; 원격탐사자료; 추정기법)로 구분하여 산림 바이오매스 추정 현황을 정량적으로 조사하였으며, 최종적으로 각 범주에 대한 경향을 조사하였다.

2. 원격탐사를 이용한 산림 바이오매스 추정

제5차 국가산림자원조사 지침서(국립산림과학원 2009)에 따르면 산림은 최소 면적(Minimum area)이 0.5ha 이상, 수고가 최소한 5m 까지 자랄 수 있는 입목의 수관밀도(Canopy cover)가 10% 이상인 토지로서, 최소 폭(Minimum width)이 30m 이상이어야 한다고 정의하고 있다. 여기에는 인위적 또는 자연적 요인에 의해 일시적으로 나무가 제거되었지만 산림으로 회복될 것으로 예상되는 미립목지와 죽림을 포함한다. 원격탐사를 통해 추정하는 변수로는 이러한 산림의 임령(Sivanpillai et al., 2006), 재적 및 입분밀도(Franco-Lopez et al., 2001), 바이오매스 등을 들 수 있으며, 전환계수를 통해 수종별 탄소량 또한 추정할 수 있다.

산림 바이오매스를 추정하기 위한 원격탐사자료로는 주로 항공 및 위성 영상이 이용되고 있다. 지표상의 모든 물질은 에너지를 방출하고 있으며, 원격탐사자료는 이러한 에너지를 센서로 감지하여 대상지역에 대한 분광특성정보를 제공한다(김태근 등, 1996). 원격탐사자료를 통한 산림 변수추정의 장점은 야외에서 수집된 현장자료를 이용, 야외조사가 이루어지지 않은 미 조사지점에 대한 산림 바이오매스를 영상소(Pixel value) 단위로 추정해 낼 수 있다는 점이며(임종수 등, 2007), 이는 원격탐사를 통해 취득된 자료에 해당하는 미 조사지점과 현장자료 조사지점의 분광유사성에 기반한다.

라이다(Light Detection And Ranging, LiDAR)는 레이저를 목표점에 주사한 뒤 반사되어 돌아오는 레이저 펄스의 도달 시간을 계산, 반사지점의 공간위치정보를 취득하는 방법이다(강규찬, 2010). 특히 항공라이다측량의 경우 높은 정확도로 지표면의 높이값을 빠른 시간에 취득할 수 있으며, 자료를 통해서 취득한 수고 정보를 통해 흉고 직경을 간접적으로 계산함으로써 산림 바이오매스를 산출한 연구 등이 보고되고 있다(장안진과 김형태, 2008). 한편, Lefsky et al.(2002)는 라이다 자료를 이용하여 수관 또는 임관을 모델링하여 직접 바이오매스를 산출하는 연구를 수행한 바 있다.

원격탐사를 통한 산림 바이오매스 추정에는 정확도 향상과 검증에 의해 산림자원조사로부터 취득된 표본 점 통계 자료가 반드시 동반되어야 한다. 이러한 산림 자원조사 자료의 경우 각 연구별로 독립적인 조사를 통해 취득하는 경우도 있으나, Tuominen et al.(2010)이 수행한 핀란드 지역의 산림 바이오매스 지도화 연구, Reese et al.(2002, 2003)이 수행한 스웨덴 지역의 산림 바이오매스 추정 연구 등 국가 산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료를 이용한 연구 사례가 많이 보고되고 있다. 국내의 경우 국립산림과학원의 주도로 국가 산림자원조사가 진행되어 왔으며, 2010년 현재 제 5차 산림자원조사가 진행 중에 있다. 구체적인 조사 내용은 임분현황, 임목, 벌근고사목피해목, 산림식생 및 토양탄소 등이며, 조사지점은 전국의 산림 640만 ha를 대상으로 계통추출법(Systematic sampling)에 의해 추출된 약 4,000개의 고정표본점(Permanent sample plot)을 배치하여 조사한다(국립산림과학원, 2009). 국내외적으로 이러한 NFI 자료의 원격탐사자료를 연계한 산림 바이오매스 추정 연구는 점차 증가하고 있으며, 향후 그 활용도 역시 높아질 것으로 전망된다.

3. 다섯가지 관점에 의한 분류

앞에서 산림 바이오매스 추정에 대한 국내외 현황에 대하여 알아보았다. 이러한 특성을 기초로 다음 절들에서는 원격탐사를 이용한 국외 산림 바이오매스 추정 연구를 다섯 가지 범주를 통해 분류하고자 한다. 우선 원격탐사를 이용한 산림 바이오매스 추정 연구가 가장 활발하게 일어나고 있는 지역에 대한 현황을 파악하기 위해 대상지역에 따른 분류를 시행하였다. 다음으로 연구지역의 면적을 지역적, 국가적, 전 지구적 등급(regional, national, global level)의 세 가지 범주로 구분하고 경향을 조사하였으며, 대상 지역의 지형적, 기후적 특성 역시 중요한 요소로 판단, 이를 고려한 생태군계에 따른 분류를 수행하였다. 또한 다양한 원격탐사자료의 종류 및 사용 빈도를 조사하였으며, 실질적인 산림 바이오매스 추정에 사용되는 여러 가지 추정기법에 대한 분류 조사를 수행하였다. 한편, 본 연구에서 검토된 총 41개의 연구사례 중 다섯 가지 관점(연구대상지역; 연구대상면적; 생태군계; 원격탐사자료; 추정기법)에 언급되지 않은 논문은 대해서는 고려 대상에서 제외되었으며, 각 범주에서 두 가지 이상의 분류항목에 포함될 경우 중복으로 처리하였다.

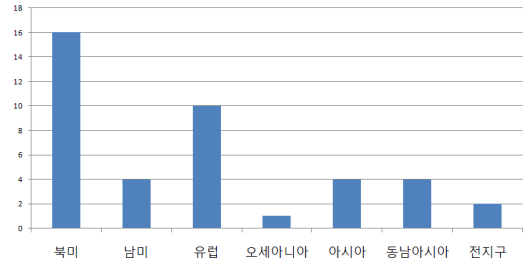


그림 1. 연구대상지역에 따른 연구 빈도

3.1 연구대상지역

본 논문은 산림 바이오매스 추정의 대상지역별 연구 빈도수를 알아보기 위하여 북미, 남미, 유럽, 오세아니아, 동남아시아, 아시아의 여섯개 지역과 전 지구를 대상으로 한 연구로 나누어 조사하였으며, 관련된 연구가 없는 아프리카와 남극지역은 연구고려 대상지역에서 제외 하였다. 다음의 그림 1은 총 41편의 논문을 바탕으로 조사한 연구대상지역에 따른 연구 빈도를 나타낸다.

조사 결과 산림 바이오매스 추정에 관한 연구는 북미지역과 유럽이 각각 전체 연구사례의 약 39%와 24%를 차지하였으며, 남미나 동남아시아, 아시아 지역을 대상으로 한 연구는 약 10%로 북미나 유럽지역에 비해 연구의 수가 다소 뒤떨어지는 것으로 나타났다. NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)나 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer) 등의 공간해상도가 낮은 원격탐사자료를 사용하여 전 지구를 대상으로 한 연구는 전체 연구의 약 5%를 차지했다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 산림부문 탄소저장고별(바이오매스, 고사유기물, 토양탄소, Non-CO₂)로 배출계수에 대한 산정방법을 수준(tier) 별로 나누었다. 수준 1은 대체적으로 IPCC 또는 인접국가에서 제시하는 계수를 그대로 이용하고, 수준 2는 국가 고유의 계수를 개발하며, 수준 3은 국가 고유 계수를 개발하되 성장모델, 지역별, 영급별로 구분하여 세분화하는 방법이다(국립산림과학원, 2008). 또한 수준 3의 경우 광대역에 대한 지속적인 모니터링을 포함하고 있으며, 단계가 높을수록 탄소 계정에 있어 국제적인 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 이러한 수준 3의 가장 신뢰도가 높은 국가 배출계수 개발은 주로 자체 원격탐사 위성을 보유하고 있고, 산림 바이오매스 추정과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있는 북미와 유럽 국가들을 중심으로 진행 중인 상황이다.

반면, 남미나 동남아시아, 아시아 지역에 속한 나라들은 산림 바이오매스 추정과 관련된 국가 차원의 연구나 프로젝트가 상대적으로 부족한 편으로, 대부분의 국가가 수준 1 혹은 2 단계에서 머물러 있는 실정이다. 우리나라의 경우도 아직 탄소 저장고별로 수준 2 정도에 머물러 있는 실정이며, 차후 IPCC가 권장하는 수준 3의 신뢰성 있는 배출계수 제시를 위해서는 각종 수종별 배출계수의 개발 및 검증, 그리고 다양한 산림 바이오매스 추정 연구가 요구되고 있다(국립산림과학원, 2008). 이를 위해 현재 우리나라의 경우 국립산림과학원을 중심으로 온실가스 배출계수 개발 및 검증 연구가 진행 중에 있으며(국립산림과학원, 2008), 이외에도 최근 NFI와 kNN 기법을 이용한 산림 바이오매스 추정(임종수 등, 2007; 2009), 역시 NFI와 kNN 및 최신 탄소배출계수를 이용한 단양군 지상부 산림 바이오매스 탄소저장량 추정(정재훈 등, 2010), 항공 사진과 라이다자료를 이용한 산림 바이오매스 추정(장안진 등, 2008), 산림 바이오매스 변환표와 위성영상을 이용한 무주군의 산림 바이오매스 추정(정상영 등, 2009a) 등 다양한 연구가 진행 중에 있다.

3.2 연구대상지역의 면적

연구대상지역의 면적은 크게 지역적, 국가적, 전 지구적 등급(regional, national, global level)으로 나누어 분류하였다. 그 결과 대부분의 연구에서 지역적 등급의 연구가 진행되었으며, 국가적 등급은 북미지역에서 두 편과 스웨덴지역에서 한 편만이 보고되었다. 전 지구적 등급은 NOAA-AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)을 사용하여 북반구 전역의 산림 바이오매스를 추정한 사례 두 편과 MODIS영상을 사용하여 유럽 16개국을 대상으로 한 연구 한 편이 보고되었다.

한편, 지역등급 면적 단위의 연구를 좀 더 자세히 조사하기 위해 총 41편의 논문 중 연구대상지역의 면적이 정확히 기재되어 있는 27편의 연구사례를 바탕으로 소규모($3,600\text{km}^2$ 미만), 중규모($3,600\text{km}^2 \sim 35,000\text{km}^2$), 대규모($35,000\text{km}^2$ 이상)로 재분류하였다. 규모는 위성영상과 연구대상지의 면적의 상관성을 중점적으로 알아보기 위하여 위성영상의 주사폭(swath width)을 기준으로 하였으며, 소규모는 ASTER와 SPOT영상의 주사폭인 60km 을 기준으로 정사각형으로 가정했을 때 해당되는 범위인 $3,600\text{km}^2$ 미만으로 하였다. 중규모는 Landsat 시리즈의 주사폭인 185km 을 중심으로 정사각형으로 본 넓이인 $35,000\text{km}^2$ 로 하였으며, 그 이상을 대규모로 분류 하였다. 대규모에는 주사폭이

각각 $2,330\text{km}$ 와 $2,700\text{km}$ 인 MODIS와 NOAA-AVHRR이 포함된다.

조사결과 소규모, 중규모, 대규모 지역에 해당하는 연구 사례가 각각 59%, 19%, 22%로 조사되어 소규모 지역에 대한 연구 사례가 가장 많은 것으로 나타났다. 소규모 지역에 대한 연구 사례에서는 주로 SPOT, ASTER, Landsat 시리즈 등, 중고해상도 전영상 혹은 부분영상이 사용되었다. 대부분의 사례에서 소규모 지역에 대한 연구가 많이 진행된 이유로는 한정된 영상 크기 내에 연구대상지역을 전부 포함하기 위함이며, 영상크기가 넓은 영상의 경우 낮은 해상도로 인해 정확도가 떨어지기 때문으로 판단된다.

3.3 생태군계

산림의 분포는 기상, 강수량, 토양, 토양 수분, 고도 및 경사 등 다양한 지형적, 기후적 영향을 받고 있으며(윤정호, 2004), 본 논문에서는 이러한 산림분포의 체계적인 분류를 위하여 세계자연보호기금(World Wide Fund for Nature, WWF)에서 사용된 14개의 지구 생태군계(열대 및 아열대 습윤한 활엽수림 / 열대 및 아열대 건조한 활엽수림 / 열대 및 아열대 침엽수림, 온대 활엽수림과 혼효림, 온대 침엽수림, 북쪽 수림 및 타이가 / 열대 및 아열대 초원의 사바나와 관목지 / 온대 초원의 사바나와 관목지 / 범람된 초원과 사바나 / 산지의 초원과 관목지 / 툰드라 / 지중해성 산림 및 관목지 / 사막과 건조한 관목지 / 맹그로브)를 사용하였다(그림 2).

다음의 그림 3은 총 40개의 논문을 바탕으로 조사한 생태군계에 따른 연구 사례의 분류를 나타낸다. 본 생태군계 조사에서 가장 많이 포함된 연구 사례는 유라시아 대륙에서 북아메리카에 걸쳐 대규모 침엽수림이 분포하고 있는 북쪽 수림 및 타이가 지역으로 전체 연구의 30%에 해당하였다. 그 다음으로는 열대 우림인 아마존과 동남아시아를 포함하고 있는 열대 및 아열대 습윤한 활엽수림, 북아메리카 동쪽과 유럽, 극동 지역에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 온대 활엽수와 혼효림 두 지역이 각각 25%를 차지하였다.

한편, 그림 4는 각 생태군계에서 수행된 연구대상지역의 분포를 나타내고 있다. 북미의 경우 지역이 넓은 만큼 온대 활엽수와 혼효림, 온대 침엽수림, 북쪽 수림 및 타이가 등 다양한 생태군계를 포함하고 있으며, 각 생태군계별로 다른 지역에 비해 상대적으로 많은 연구가 이루어진 것으로 조사되었다. 유럽의 경우도 다양한 생태군계에서 연구가 이루어졌지만, 북미에 비해서는 상대적으로 연구사례가 적은 것으로 나타났다. 반

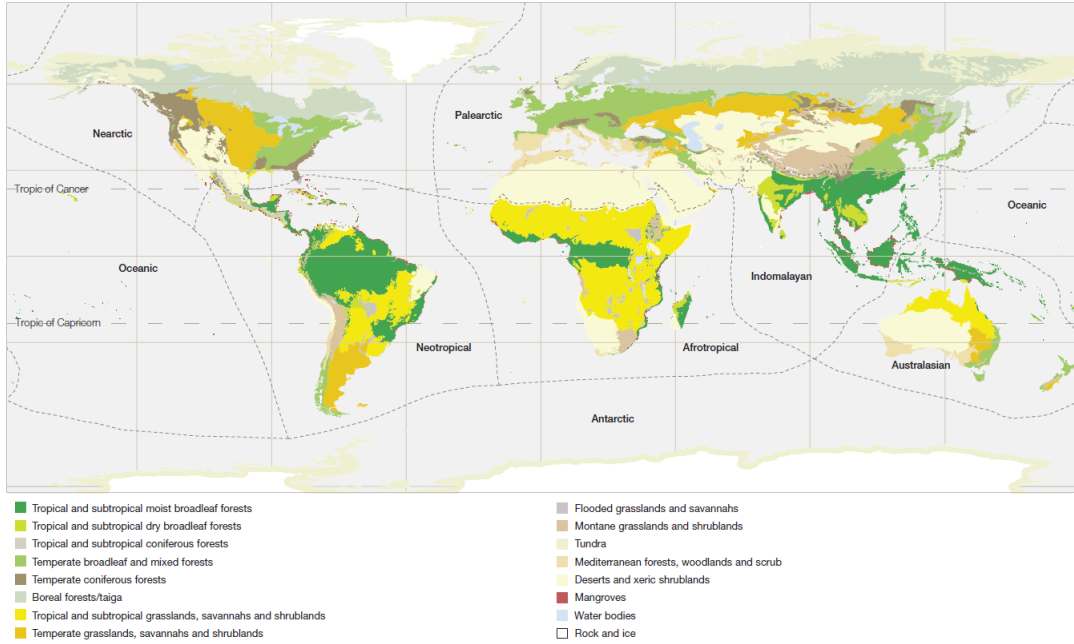


그림 2. 전 세계의 생태군계(WWF, 2008)

면, 아시아 지역의 경우 다양한 생태군계를 포함하고 있음에도 불구하고 다른 지역에 비해 연구사례가 매우 적어 향후 관련 분야의 연구가 시급한 것으로 분석되었다.

3.4 원격탐사시스템

산림 바이오매스 추정에서 사용하는 원격탐사자료는 보통 비용, 분광해상도 및 공간해상도, 영상크기, 대상 지역의 포함 여부 등을 고려하여 선택하게 된다.

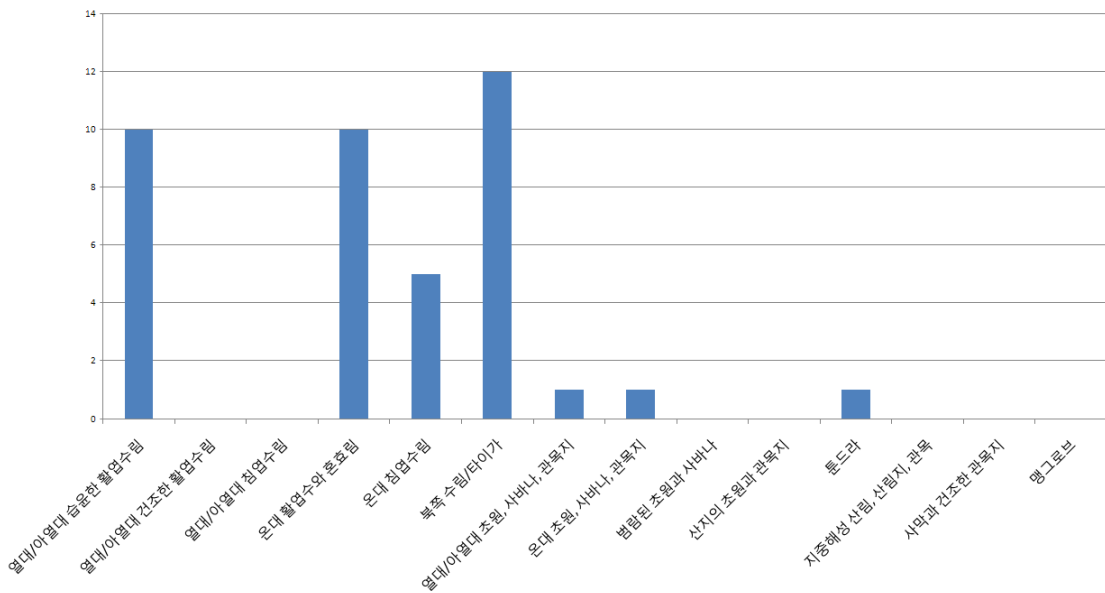


그림 3. 생태군계에 따른 연구 빈도

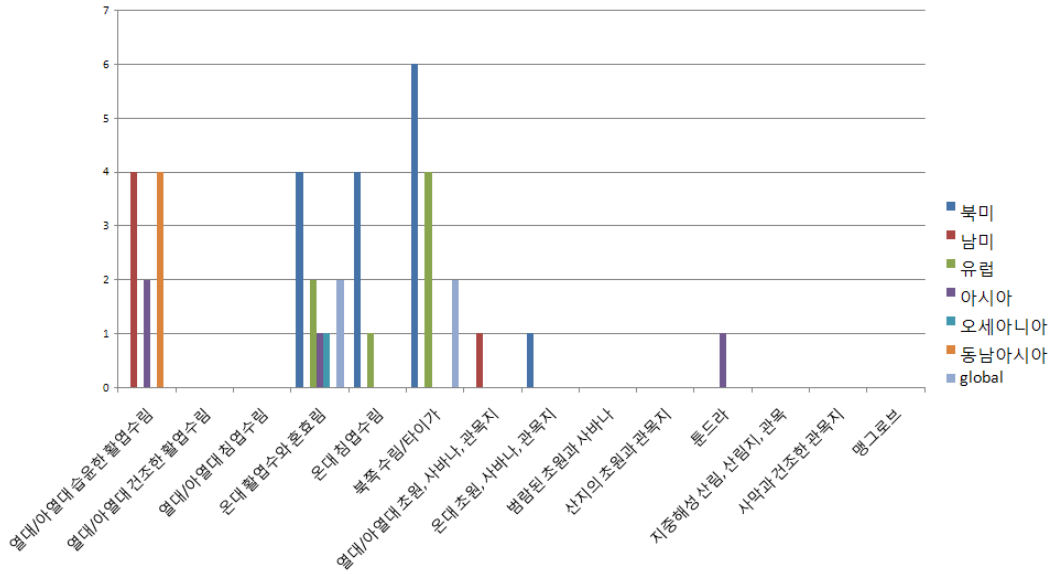


그림 4. 생태군계에 따른 연구대상지역의 분포

다음의 표 1은 본 연구에서 조사된 국외 연구사례에서 사용된 총 14 가지의 원격탐사시스템의 제원을 나타내고 있으며, 표에는 포함되어 있지 않지만 사례조사에는 LiDAR 및 SAR와 같은 능동형 원격탐사 시스템도 포함되어 있다.

조사에는 각 범주에서 두가지 이상의 분류항목에 포함되어 중복 처리한 총 49편의 논문이 사용되었다. 가장 많은 연구 사례(35%)에서 사용된 Landsat 시리즈의 경우 30m의 중해상도로 기본적인 R, G, B와 더불어 식생탐지에 효과적인 근적외선 및 열적외선 파장대의 센서를 포함하고 있으며(Tucker, 1978), 전 세계를 대상으로 구축된 방대한 양의 데이터베이스와 관련 홈페이지를 통해 무상으로 제공된다는 이점 등으로 각광을 받고 있다. 현재 1984년에 발사된 Landsat 5 TM위성이 아직 기능 중에 있으며, 1999년에 발사된 Landsat 7 ETM+의 경우 2003년 scan line corrector의 고장으로 인해 활용성이 떨어지게 되었다. 한편, 능동형 시스템인 LiDAR와 SAR를 이용한 연구는 각각 전체 사례의 16%와 10%로 Landsat 시리즈에 이어 많이 사용된 것으로 나타났다. LiDAR는 레이저 펄스를 지상에 주사하고 반사된 레이저의 도달시간 및 intensity 정보 등을 통해 수고추출 및 개체목 구분에 사용되고 있다(장안진 등, 2008, Lefsky et al., 1999; 2002). SAR의 경우도 지상에 레이더파를 주사하여 정보를 취득하는 능동형 시스템으로서, 산림의 수분 함유량이나 식물의 종류, 잎, 줄기, 잔가지 등의 요소별

생물량은 물론 식생의 구조나 잎의 방향, 줄기의 형상과 분포 등 식물에 대한 변수들을 취득할 수 있으며, 특히 JERS-1와 같은 L 밴드의 경우 높은 투과성으로 산림 구조와 바이오매스 추정에 효과적으로 사용될 수 있다(Saatchi, 2007). 이러한 능동형 시스템의 경우 대기 및 일조 현상에 상관없이 영상 취득이 가능하다는 장점으로 인해 그 활용성이 더욱 증대될 전망이다.

저해상도 원격탐사자료인 NOAA-AVHRR과 MODIS의 경우 전 지구적 규모의 산림 바이오매스 추정 연구에 사용된 바 있으나, 낮은 해상도와 정확도 문제로 인해 효과적인 추정이 어려운 상황이다. 반면, SPOT과 Quickbird와 같은 1m급 미만의 고해상도 영상을 제공하는 시스템의 경우, 밴드수가 상대적으로 제한적이고 대상면적이 매우 좁으며 고가의 비용으로 인해 사용빈도는 그리 많지 않은 상황이다.

3.5 추정기법

전 세계적으로 산림 바이오매스를 추정하기 위해 많은 방법들이 이용 혹은 개발되어 왔으며, 그 중 회귀분석은 가장 일반적으로 사용되고 있다. 회귀분석은 둘 또는 그 이상의 변수들 간의 관계를 파악함으로써 어떤 특정한 변수 값을 다른 한 개 또는 그 이상의 변수들로부터 설명하고 예측하는 통계적 기법이다(노남진 등, 2006). 산림 바이오매스 추정에서의 회귀분석기법은 현장 표본점 자료로부터 조사된 산림 바이오매스 변수와 원격탐사자료 분광값들 간의 관계를 이용하여

표 1. 원격탐사시스템의 제원

원격탐사시스템	밴드	분광해상도(μm)	공간해상도 (m)	재방문주기(일)
Landsat TM 4,5	1-5, 7	0.45-2.35	30×30m	16일
	6	10.40-12.5	120×120m	
	pan	0.48-0.69	10×10m	
Landsat ETM+	1-5, 7	0.45-2.35	30×30m	16일
	6	10.40-12.5	60×60m	
	pan	0.52-0.90	15×15m	
Landsat MSS	4-7	0.5-1.1	79×79m	16-18일
	8	10.4-12.61	240×240m	
SPOT -1,2,3 HRV	1-3	0.50-0.89	20×20m	26일
	pan	0.51-0.73	10×10m	
SPOT-4 HRVIR	1-3	0.50-0.89	20×20m	26일
	SWIR	1.58-1.75	20×20m	
	pan	0.61-0.68	10×10m	
ASTER	1-3, 3B	0.52-0.86	15×15m	5일
	4-9	1.6-2.43	30×30m	
	10-14	8.125-11.65	90×90m	
IRS-1C	1	-	-	적도: 24일 전정색 영상 (±26°경사): 5일 WiFS 적도: 5일
	2-4	0.52-0.86	23×23m	
	5	1.55×1.70	70×70m	
	pan	0.50-0.75	5.8×5.8m	
	WiFS 1, 2	0.62-0.86	188×188m	
MODIS	1-2	0.62-0.876	250×250m	1-2일
	3-7	0.459-2.155	500×500m	
	8-36	0.405-14.385	1×1km	
AVIRIS	1-224	0.41-2.5	20×20m	가변적
NOAA/AVHRR 6, 8, 10	1-2	0.580-1.1	1.1×1.1km	14.5일
	3	3.55-3.93		
	4	10.50-11.50		
NOAA/AVHRR 7, 9,, 11, 12, 13, 14, 15	1-2	0.580-1.1	1.1×1.1km	14.5일
	3	3.55-3.93		
	4,5	10.30-12.50		
Quickbird	pan	0.445-0.9	61cm	3.5일
	blue	0.45-0.52	2.4×2.4m	
	green	0.52-0.6		
	red	0.63-0.69		
	near IR	0.76-0.9		

회귀모형을 도출한 후, 미조사 지점의 산림 바이오매스를 해당 분광값을 통해 추정하는 방법이다(임종수 등, 2009). 역시 회귀분석과 더불어 산림 바이오매스 추정에 있어 가장 많이 사용되고 있는 kNN 기법은 원격탐사로 취득된 조사지점과 미조사지점 사이의 분광 유사성을 이용, 참조표본점을 선정한 후 참조표본점들의 산림축적으로부터 미조사지점의 산림 바이오매스를 추정하는 방법이다(황주호 등, 2009).

이 외에 k-means 방법을 이용하여 수고와 수관밀도의 분류작업으로 산림 바이오매스 변환표를 작성하고, 이를 통해 산림 바이오매스를 추정하는 BioCLUST

(BIOmass from Cluster Labeling Using Structure and Type) 기법과 위성영상을 통해 수고나 밀도 모델을 개발하여 지도를 만들고 바이오매스 모델을 적용시킨 BioSTRUCT(BIOmass from stand STRUCTure) 기법(Hall et al., 2006), 전체 나무의 바이오매스와 수고, 수간직경 등에 대한 경험적인 관계를 기반으로 바이오매스를 추정하는 Allometric equation (Balzter et al., 2007), 산림 생산력을 예측하기 위하여 개발된 생산력 모델(PnET) 등의 다양한 방법이 산림 바이오매스 추정에 사용되고 있다(Mickler 등, 2002).

이러한 대표적인 산림 바이오매스 추정 기법들에 대

한 사용 빈도를 조사한 결과, 총 41개의 논문 중 회귀 분석을 이용한 방법이 71%로 가장 높았으며, 그 뒤를 이어 kNN과 allometric equation 기법을 이용한 사례가 각각 12%,와 7%로 조사되었다. BioCLUST 기법은 전체 연구의 약 5%에서 사용되었으며, BioSTRUCT 기법과 생산력 모델은 각각 2%만 사용된 것으로 나타났다. 회귀분석의 경우 가장 대표적인 통계적 추정 기법 중 하나로써 이미 많은 분야에서 그 효용성이 검증되어 왔고, 산림 바이오매스 추정에서 역시 많이 사용된 것으로 조사되었다. 한편, kNN 기법의 경우 특히 핀란드나 스웨덴 등 유럽 지역에서 각광을 받고 있으며, BioCLUST 기법은 북미에서 주로 사용된 것으로 나타났다. 본 조사에서는 북미지역을 대상으로 한 산림 바이오매스 추정의 경우 회귀분석 다음으로 BioCLUST 기법이 많이 사용된 것으로 나타났다.

국내의 경우 회귀모형과 더불어 BioCLUST 및 kNN 기법을 이용한 산림 바이오매스 파라미터 추정 연구가 2000년도 이후로 진행 되어 왔다(임종수 등, 2007; 2009, 정상영 등, 2009b, 정재훈 등, 2010). 하지만 아직까지는 해외 사례에 비해 연구 사례나 방법론이 제한적인 상황으로 차후 국내 지역에 적합한 산림 바이오매스 파라미터 추정 기법을 찾기 위해 보다 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 총 41개의 국외 산림 바이오매스 추정 연구 사례를 대상지역과 대상지역의 면적, 생태군계, 원격탐사시스템 및 추정기법 등의 다섯 가지 관점에서 살펴보았다. 조사 결과, 연구대상지역으로는 북미지역이 37%로 가장 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이 지역을 비롯한 유럽 국가들은 산림부문 바이오매스 배출계수의 산정방법은 수준 3의 신뢰성 있는 배출계수를 제시하고 있다. 현재 수준 2에 머물러 있는 우리나라는 IPCC가 권장하는 수준 3의 배출계수 제시를 위하여 다양한 산림 바이오매스 추정 연구가 요구되고 있으며, 이를 위해 다양한 연구가 진행 되어야한다. 연구대상면적의 경우 3,600km² 미만의 소규모 지역에 대한 연구가 활발히 진행 중인 것으로 나타났다. 이는 한정된 영상크기 내에 연구대상지역을 전부 포함하기 위함이며, 영상의 크기가 넓은 영상의 경우 해상도가 낮기 때문에 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 산림 바이오매스 추정의 높은 정확도를 위하여 SPOT이나 ASTER 등 중고해상도의 영상 사용이 요구된다. 생태군계의 경우 WWF의 14개의 분류체계를 바탕으로,

북쪽 수림 및 타이가, 열대 및 아열대 습윤한 활엽수림, 온대 활엽수와 혼효림의 세 생태군계에 대부분의 연구(80%)가 집중되어 있는 것으로 조사되었다. 우리나라 생태군계는 온대 활엽수와 혼효림으로써 북미지역 및 유럽등 많은 지역이 이 생태군계와 일치한다. 따라서 차후 연구방향을 선정 시 이들 동일한 생태군계 지역에 대한 선행 연구를 참조할 필요가 있다. 산림 바이오매스 추정을 위한 기초자료로써 원격탐사시스템의 경우 중해상도의 Landsat 시리즈가 35%로 가장 많이 활용되었으며, 이는 시계열 분석이 용이하고, 무상으로 제공된다는 이점 때문인 것으로 보인다. 하지만, 이보다 정확한 추정을 위하여 더 높은 해상도의 영상을 사용하거나, 성장단계별 바이오매스가 추정이 가능한 SAR영상이나 임분의 수직적 구조분석에 의해 구성요소별 바이오매스 추정이 가능한 LiDAR에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 마지막으로 추정기법에 있어서는 회귀분석이 71%로 가장 많은 사례에서 사용된 것으로 나타났으며, 이 외에 BioCLUST 및 kNN 기법 등 다양한 방법을 사용하여 더 정확한 추정을 해야 한다. 이러한 본 논문의 결과는 향후 국내 지역의 산림 바이오매스 추정 연구를 위한 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기후변화연구센터 산림자원정보과 “지상부 바이오매스의 탄소저장량 분포 추정을 위한 최적 공간모델 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강규찬, 2010, “항공디지털카메라와 레이저측량을 이용한 정사영상 제작 및 평가”, 연세대학교 대학원 석사논문.
2. 김태근, 김광은, 조기성, 김환기, 1996, “Landsat TM 영상자료를 이용한 호수수질 관측”, 한국지형공간정보학회지, 제4권, 제2호, pp.22-33.
3. 국립산림과학원, 2008, *산림부문 온실가스 흡수 배출계수 관리 방안*, 연구보고서, pp.17-21.
4. 국립산림과학원, 2009, *제5차 국가산림자원조사 현지 조사 지침서 Version 1.3*, pp.3-6.
5. 노남진, 손요환, 김종성, 김래현, 서금영, 서경원, 구진우, 경지현, 박인협, 이영진, 손영모, 이경학, 2006, “가평지역 낙엽송림의 바이오매스와 영급별 줄기 밀도 및 바이오매스 확장계수 추정 연구”, 임산에너지, 제 25

- 권, 제 1호, pp.1-8.
6. 윤정호, 2004, 소나무림 공간 분포의 특성 및 변화 예측: 지형, 기상, 토양인자의 영향을 중심으로, 박사학위 논문, 고려대학교, pp.68-99.
 7. 임종수, 공지수, 김성호, 신만용, 2007, "kNN 기법을 이용한 강원도 평창군의 산림 주제도 작성과 산림 통계량 추정", 한국임학회지, 제96권, 제3호, pp.259-268.
 8. 임종수, 한원성, 황주호, 정상영, 조현국, 신만용, 2009, "위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정", 대한원격탐사학회지, 제 25권, 제4호, pp.311-320.
 9. 장안진, 김형태, 2008, "항공사진과 Lidar 데이터를 이용한 산림지역의 바이오매스 추정에 관한 연구", 한국 지리정보학회지, 제11권 제3호, pp.116-173.
 10. 정상영, 임종수, 조현국, 정진현, 김성호, 신만용, 2009a, "산림 바이오매스 변환표와 위성영상을 이용한 무주군의 산림 바이오매스 추정", 한국임학회지, 제98 권, 제4호, pp. 409-416.
 11. 정상영, 임종수, 황주호, 조현국, 신만용, 2009b, "BioCLUST 기법을 이용한 무주군 산림 바이오매스의 추정 및 주제도 작성", 한국임학회 정기 학술연구발표회.
 12. 정재훈, 허준, 유수홍, 김경민, 이정빈, 2010, "kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정", 한국 지형공간정보학회지, 제 18권, 제 4호, pp.119-129.
 13. 황주호, 임종수, 정진현, 김성호, 신만용, 2009, "위성 영상과 국가산림자원조사를 이용한 소면적의 산림통계량 추정", 한국임학회 정기 학술연구발표회.
 14. Balzter, H., Rowland, C.S., Saich, P., 2007, "Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood national nature reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry", Remote Sensing and Environment, Vol. 108, pp.224-239.
 15. Boudreau, J., Nelson, R.F., Margolis, H.A., Beaudoin, A., Guindon, A., Kimes, D.S., 2008, "Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec", Remote Sensing of Environment, vol.112, pp.3876-3890.
 16. Franco-Lopez, H., Ek, A.P., Bauer, M.E., 2001, "Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method", Remote Sensing of Environment, Vol.77, pp.251-274.
 17. Fuchs, H., Magdon, P., Kleinn, C., Flessa, H., 2009, "Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: Combining satellite imagery and field inventory", Remote Sensing of Environment, Vol.113, pp.518-531.
 18. Goetz, S.J., Baccini, A., Laporte, N.T., Johns, T., Walker, W., Kellendorfer, J., Houghton, R.A., Sun, M., 2009, "Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods", Carbon Balance and Management, 4:2.
 19. Hall, R.J., Skakun, R.S., Arsenault, E.J., Case, B.S., 2006, "Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume", Forest Ecology and Management, Vol.225, pp.378-390.
 20. Labrecque, S., Fournier, R.A., Luther, J.E., Piercey, D., 2006, "A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland", Forest Ecology and Management, Vol.226, pp.129-144.
 21. Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G., Shugart, H.H., 1999, "Surface Lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA", Remote Sensing of Environment, Vol.67, pp.83-98.
 22. Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D.J., Parker, G.G., Acker, S.A., Gower, T., 2002, "Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes", Global Ecology & Biogeography, Vol.11, pp.393-399.
 23. Mickler, R.A., Earnhardt, T.S., Moore, J.A., 2002, "Regional estimation of current and future forest biomass", Environmental Pollution, Vol.116, pp. S7-S16.
 24. Reese, H., Nilsson, M., Sandstrom, P., Olsson, H., 2002, "Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data", Computers and Electronics in Agriculture, Vol.37, pp.37-55.
 25. Reese, H., Nilsson, M., Pahlen, T.G., Hagner, O., Joyce, S., Tingelof, U., Egberth, M., Olsson, H., 2003, "Countrywide Estimates of Forest Variables Using Satellite Data and Field Data from the National Forest Inventory", Royal Swedish Academy of Sciences 2003, Ambio Vol.32 No.8, pp.542-548.
 26. Saatchi, S.S., Houghton, R.A., Dossantos Alvala, R.C., Soares, J., Yu, Y., 2007, "Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin",

- Global change biology, Vol.13, pp.816-837.
27. Sivanpillai, R., Smith, C.T., Srinivasan, R., Messina, M.G., and Wu, X.B., 2006, "Estimation of Managed Loblolly Pine Stand Age and Density with Landsat ETM+ Data", *Forest Ecology and Management*, 223:247-254
 28. Tucker, C.J., 1978b, "A Comparison of Satellite Sensor Bands for vegetation Monitoring", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.44, No.3, pp.289-295.
 29. Tuominen, S., Eerikäinen, K., Schibalski, A., Haakana, M., Lehtonen, A., 2010, "Mapping biomass variables with a Multi-Source Forest Inventory Technique", *Silva Fennica*, Vol.44, No.1, pp.109-119.
 30. Turner, D.P., Guzy, M., Lefsky, M.A., Ritts, W.D., Tuyl, S.V., Law, B.E., 2004, "Monitoring forest carbon sequestration with remote sensing and carbon cycle modeling", *Environment Management*, Vol.33, No.4, pp.457-466.
 31. Wulder, M. A., White, J. C., Fournier, R. A., Luther, J. E., Magnussen, S., 2008, "Spatially explicit large area biomass estimation: three approaches using forest inventory and remotely sensed imagery in a GIS", *sensor*, Vol.8, pp.529-560.
 32. WWF, 2008, *Living planet report 2008*, research report.