

원격탐사와 GIS 기반의 산림탄소저장량 추정에 관한 주요국 연구동향 개관

김경민^{1*} · 이정빈¹ · 김은숙¹ · 박현주⁴ · 노영희² · 이승호¹ · 박기호² · 신휴석³

Overview of Research Trends in Estimation of Forest Carbon Stocks Based on Remote Sensing and GIS

Kyoung-Min KIM^{1*} · Jung-Bin LEE¹ · Eun-Sook KIM¹
Hyun-Ju PARK⁴ · Young-Hee ROH² · Seung-Ho LEE¹
Key-Ho PARK² · Hyu-Seok SHIN³

요 약

토지이용변화에 따른 산림탄소저장량 변화는 기후변화협약에서 요구하는 주요 자료 중 하나이다. IPCC 우수실행지침(intergovernmental panel on climate change good practice guidance, IPCC GPG) 수준 3에 근거하여 공간적으로 명확한 산림탄소저장량을 추정하게 되면 높은 신뢰도를 확보할 수 있다. 그러나 기존의 추정 방법은 표본점(sample plot) 단위의 국가산림자원조사(national forest inventory, NFI) 자료만을 이용하여 행정구역별 평균을 집계하는 것으로 폴리곤 혹은 셀 단위의 상세한 탄소저장량을 파악할 수 없었다. 이를 보완하기 위해 유럽, 북미 등에서는 NFI 자료, 원격탐사 및 GIS 기술을 결합하여 산림탄소저장량을 추정하기 위한 노력이 활발히 이루어져왔다. 주요국의 연구 동향을 활용 기법에 따라 분류해보면 원격탐사, GIS, 지구통계 및 환경변수 모델링 등 크게 4가지 범주로 나눌 수 있다. 이 중 가장 손쉽게 국내 적용을 고려해 볼 수 있는 방법은 NFI 자료와 임상도를 결합하는 GIS 기반의 방법이다. 특히, 복잡한 수종 구성을 가지고 있는 국내 산림 환경 특성을 고려할 때 국지적 변이 추정에 유용한 지구통계 기법의 활용성이 기대된다. 아울러, 고해상도 영상의 활용은 산림탄소저장량 추정의 검증 및 탄소배출권 확보를 위한 CDM(clean development mechanism, 청정개발체제) 사업 적지 선정 등에 유용할 것으로 판단된다. 국내 관련 연구는 아직 초기 단계로 최근된 기법(k-nearest neighbor, k-NN)의 적용성을 검토하는 연구가 주를 이루고 있으나 국내 산림 환경에 적합한 방법론의 선정을 위해서는 보다 다양한 공간 자료와 알고리즘의 적용성이 검토되고 방법론 간의 비교 연구가 필요하다.

2011년 5월 16일 접수 Received on May 16, 2011 / 2011년 7월 25일 수정 Revised on July 25, 2011 / 2011년 8월 16일 심사완료 Accepted on August 16, 2011

1 국립산림과학원 산림자원정보과 Division Forest Resources Information, Korea Forest Research Institute

2 서울대학교 지리학과 Dept. Geography, Seoul National University

3 서울대학교 국토문제 연구소 Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University

4 한국환경정책·평가연구원 환경전략연구본부 Environmental Strategy Research Group, Korea Environment Institute

* 연락처 E-mail : greenann@forest.go.kr

주요어 : 산림탄소저장량, 산림바이오매스, 원격탐사, GIS, 지구통계, 국가산림자원조사

ABSTRACT

Forest carbon stocks change due to land use change is an important data required by UNFCCC(United Nations framework convention on climate change). Spatially explicit estimation of forest carbon stocks based on IPCC GPG(intergovernmental panel on climate change good practice guidance) tier 3 gives high reliability. But a current estimation which was aggregated from NFI data doesn't have detail forest carbon stocks by polygon or cell. In order to improve an estimation remote sensing and GIS have been used especially in Europe and North America. We divided research trends in main countries into 4 categories such as remote sensing, GIS, geostatistics and environmental modeling considering spatial heterogeneity. The easiest way to apply is combination NFI data with forest type map based on GIS. Considering especially complicated forest structure of Korea, geostatistics is useful to estimate local variation of forest carbon. In addition, fine scale image is good for verification of forest carbon stocks and determination of CDM site. Related domestic researches are still on initial status and forest carbon stocks are mainly estimated using k-nearest neighbor(k-NN). In order to select suitable method for forest in Korea, an applicability of diverse spatial data and algorithm must be considered. Also the comparison between methods is required.

KEYWORDS : *Forest Carbon Stocks, Forest Biomass, Remote Sensing, GIS, Geostatistics, National Forest Inventory*

서론

지속적으로 증가하는 온실가스에 대한 유일한 흡수원(sinks)으로서 근래 산림의 중요성이 크게 부각되고 있다. 수목은 탄소동화작용을 통해 공기 중의 온실가스인 이산화탄소를 흡수하면서 자란다. 수목이 자란 무게인 바이오매스를 측정하면 얼마만큼의 온실가스를 흡수했는지 알 수 있기 때문에(산림청, 2009) 한 국가의 온실가스 배출량을 상쇄할 수 있는 흡수원으로서 그 중요성이 부각되고 있다. 2009년 11월에 발표된 2020년 우리나라 국가온실가스 감축목표는 배출전망치(Business As Usual, BAU)¹⁾ 대비 30% 감축으로 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)가 개발도상국에 권고한 감축범위

(BAU 대비 15~30% 감축)의 최고 수준에 해당한다(녹색성장위원회 홈페이지). 이러한 감축 목표를 달성하기 위해서 산림탄소흡수원 확충과 더불어 국제적으로 인정받을 수 있는 정확한 산림탄소저장량 추정이 요구된다. 기후변화협약에서 산림의 중요성이 부각된 것은 1997년 제 3차 당사국총회에서 채택된 교토의정서(Kyoto Protocol)에서 산림을 온실가스 흡수원으로 인정함으로써 비롯되었다. 최근에는 REDD(Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation) 및 REDD+ 등을 통해서 더욱 산림의 중요성이 높아져 가고 있는데 이러한 국제 협약에서는 산림탄소 변화량에 대한 국제적으로 신뢰할 수 있는 정도 높은 통계를 요구하고 있다. 이러한 통계를 작성·보고할 때에는 IPCC GPG를 따르도록 권고하고 있다. GPG에서는 바이

오매스 저장고에서의 탄소 변화에 중점을 두어 이를 집중적으로 다루고 있는데(이경학 등, 2004) GPG에 정의된 총 5가지의 탄소저장고(지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양유기물) 중 지상부 바이오매스(Aboveground Biomass, AGB)²⁾ 탄소저장량의 지도화와 정량화에 관한 다양한 방법론들이 개발되어 오고 있다.

현지조사 기반의 전통적인 기법은 산림탄소저장량 추정을 위한 가장 정확한 방법이지만 이러한 접근은 현지 조사에 많은 시간을 소비하게 되며 노동집약적이다. 특히 접근 불가능 지역에서는 수행하기 어렵다는 단점이 있으며 넓은 지역에 대해 바이오매스의 공간적 분포를 제시하지 못한다. 현재 우리나라는 국가산림자원조사 자료를 활용하여 국가 규모의 산림탄소저장량을 추정하고 있다.

IPCC GPG 수준 3(Tier 3)은 신뢰도가 가장 높은 수준의 온실가스 배출량 및 흡수량 추정을 위한 방법론으로 시간에 따라 반복되는 고해상도 활동 자료(activity data)등을 활용하여 국가 이하의 공간규모 단위를 보다 세밀한 격자 단위까지로 세분하고 국가별 조건을 다루기 위한 맞춤 모델 및 조사 체계를 포함한다(이경학 등, 2004). 따라서 온실가스 통계의 신뢰도를 높이기 위해서는 원격탐사와 GIS(Geographic information system) 등 다양한 공간정보기술을 활용하여 산림탄소저장량이 어디에 얼마만큼 분포하고 있는지를 공간적으로 명확하게 제시하는 것이 필요하다. 이를 위해 산림탄소저장량 추정에 대한 과거의 노력을 요약하고 추정에 영향을 미치는 이슈들에 대한 논의가 필요하다. 또한 다양한 스케일의 서로 다른 생물물리학적 환경에서의 산림탄소저장량 추정에 적합한 모델을 개발하기 위해 산림탄소저장량과 원격탐사 자료, 임상도 등 다양한 자료원과의 상관관계를 파악하는 것이 중요하다.

다른 나라의 경우 과거 수십년 간 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 다양한 연구 결과가 축적되었지만 우리나라는 관련 연구의

초기 단계로 산림탄소저장량의 공간적인 추정에 대한 포괄적인 리뷰는 아직까지 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구는 원격탐사와 GIS를 이용한 산림탄소저장량 추정 연구의 국제 동향을 분석하여 우리나라 산림에 대한 적용성을 검토하고 향후 연구의 방향을 제시하는데 목적이 있다.

본 논문에서는 산림탄소저장량 연구가 본격화되기 시작한 1990년대 이후를 조사대상기간으로 하여 원격탐사와 GIS를 이용한 산림바이오매스 및 탄소저장량 추정 연구 동향을 북미, 유럽, 중국 등 주요국별로 조사하였다. 국제 동향 분석을 기반으로 활용 기법을 크게 4가지 범주로 분류하였으며 각 기법별로 활용되는 자료 및 알고리즘을 정리하고 장·단점을 분석하여 국내 적용성을 검토하였다.

산림탄소저장량 연구동향 분석

1. 기존의 산림탄소저장량 추정 방법

기존의 산림탄소저장량 추정 방법은 현지조사 자료를 기반으로 한다. 현지 조사 자료는 NFI(National Forest Inventory)로부터 얻어진다. NFI에서 조사된 각 개체목의 흉고직경(D)³⁾과 수고(H)⁴⁾를 이용하여 줄기의 부피에 해당하는 수간재적⁵⁾을 구하고 수종별 목재밀도⁶⁾를 곱하여 줄기의 건중량인 수간바이오매스를 구한다. 줄기뿐만 아니라 가지, 잎 등 개체목의 전체 바이오매스로 확장하기 위해 수종별 바이오매스 확장계수⁷⁾를 곱하여 지상부 바이오매스를 구하고 마지막으로 탄소전환계수⁸⁾(0.5)를 곱하면 지상부 바이오매스가 보유하고 있는 탄소저장량을 구할 수 있다(그림 1).

이러한 방법은 산림탄소저장량 추정의 가장 정확한 방법이지만 현지 조사에 많은 시간을 소비하게 되며 노동집약적인 방법이다. 특히 접근 불가능 지역에서는 수행하기 어려운 한계가 있다. 가장 큰 문제는 기존의 방법은 넓은 지역에 대해 바이오매스의 공간적 분포를 제시

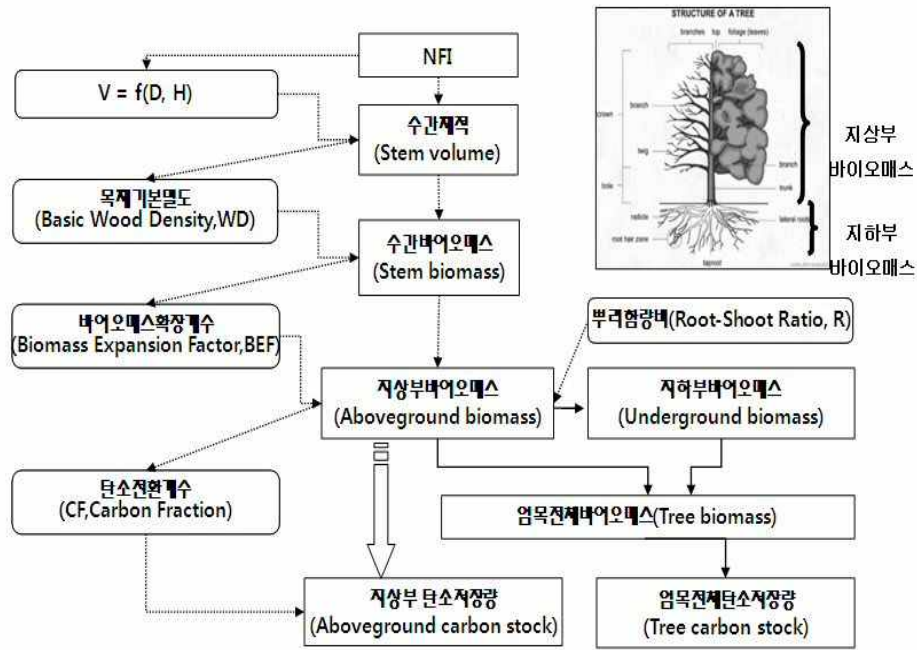


FIGURE 1. 현지조사 기반 탄소저장량 추정 방법

하지 못한다는 점이다. 산림탄소저장량 추정을 개체목 단위가 아닌 보다 넓은 면적으로 확장하기 위해서는 다수의 현지 표본점의 자료가 필요한데 현지 표본점의 표본 비율의 한계(우리나라의 경우, 4km 격자 배치)로 미조사지점에 대한 산림바이오매스 및 산림탄소저장량 추정에 어려움이 존재하는 것이다(임중수 등, 2009). 이에 NFI 자료뿐만 아니라 위성영상, 임상도 등 다양한 공간정보를 활용하고 이를 결합할 수 있는 기법을 개발하는 등 산림바이오매스 및 탄소저장량의 추정 정확도를 높이는 연구가 최근 들어 활발히 시도되고 있다.

2. 원격탐사와 GIS를 이용한 산림탄소저장량 추정 방법

본 연구에서는 산림탄소저장량 연구가 본격화되기 시작한 1990년대 이후를 조사대상기간으로 하여 원격탐사와 GIS를 이용한 산림

바이오매스 및 탄소저장량 추정 연구 동향을 주요국별로 조사하였다. 다양한 관점에서 연구 동향을 파악하고 주요 이슈를 도출하기 위해 국제 동향, 활용 기법의 종류, 국내 동향 및 한계점 등을 중심으로 분석하였다.

1) 국제 동향

미국, 캐나다, 독일, 중국 등에서는 NFI 자료와 위성영상 자료의 결합 방식이 광범위하게 연구되고 있으며(Huiyan *et al.*, 2006; McRoberts *et al.*, 2007; Blackyard *et al.*, 2008; Rahman *et al.*, 2008; Wulder *et al.*, 2008; Fuchs *et al.*, 2009) 북유럽을 중심으로 k-NN 기법을 활용한 연구가 활발히 수행되고 있다(Tomppo and Siitonen, 1991; Reese *et al.*, 2002; Tompp *et al.*, 2002; Gjertsen *et al.*, 2007; Tomppo *et al.*, 2008; Magnussen *et al.*, 2009).

특히 캐나다에서는 그림 2에서와 같이

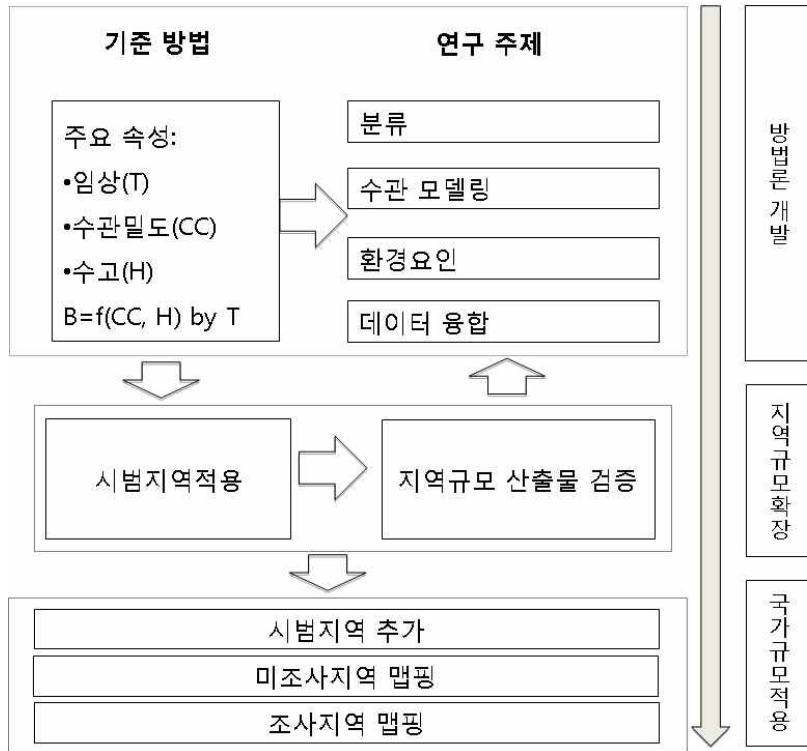


FIGURE 2. 캐나다의 바이오매스 추정 및 지도화 전략 (Luther *et al.*, 2002)

2002년부터 캐나다 산림청 산하 EOSD (Earth Observation for Sustainable Development of Forests)에서 산림바이오매스 추정 및 지도화 전략을 구축하고 체계적인 연구를 수행해오고 있다(Luther *et al.*, 2002). 캐나다 바이오매스 지도 구축 전략은 크게 3단계로 ①바이오매스 매핑 기법 개발 ②기법의 지역 규모 확장 ③국가 규모 수행으로 구성된다. Landsat TM 영상에서 임상 유형(forest cover type)과 임상 구조 정보(수관울폐도, 수고)를 추출하고 이를 활용하여 임분(forest stand) 단위의 바이오매스를 추정하는 것을 기본 방법론으로 채택하고 있다. 아울러 NFI 자료와 임상도와의 결합을 통해 지상부 바이오매스 추정을 시도하였으며(Fournier *et al.*, 2003) DRR(Direct

Radiometric Relationship), k-NN, Land Cover Classification(LCC), Biomass from Cluster Labeling Using Structure and Type(BioCLUST) 등 4가지 기법에 대한 비교를 통해 데이터 셋의 가용성과 정확도 요구 수준에 따른 방법 선택이 필요하다는 결론이 도출된 바 있다(Labrecque *et al.*, 2006). 아울러, Web GIS 기반의 산림탄소지도(forest carbon map) 서비스 구축 연구를 통해 연구 산출물의 공유 및 대시민 서비스를 권장하고 있다(Goodenough *et al.*, 2008). 특히, 지상 자료, 임상도 및 위성영상 정보를 결합하고 k-NN을 이용하여 산림정보를 폴리곤 단위로 추출하는 하이브리드 방식을 통해 단일 자료 원 중심의 분석을 수행했을 때보다 추정 정확도가 향상되었다는 보고가 있다(LeMay *et*

al., 2008).

현재 국가 규모의 바이오매스 지도가 구축된 대표적인 국가는 핀란드, 스웨덴, 노르웨이 등의 북유럽과 미국, 캐나다 등의 북미 지역 국가이다. 국가 규모의 바이오매스 지도 제작에 활용된 주요 자료는 위성영상 자료와 NFI 자료로 북유럽의 경우 중해상도의 Landsat 5 TM과 Landsat 7 ETM+를 주로 사용하였다(Luther *et al.*, 2002; Blackyard *et al.*, 2008; Tomppo *et al.*, 2008). 이는 획득 면적이 넓고 30m 정도의 공간해상도를 가지므로 NFI 자료와의 결합이 용이하다는 장점에서 채택된 것이다. 미국의 경우 산림청에서 운영하는 FIA(Forest Inventory and Analysis) 국가프로그램의 지역 간 실무그룹인 RSB(Remote Sensing Band)에서 국가 단위의 산림바이오매스 지도를 제작하였다. 미국은 북유럽 국가보다 대면적이므로 저해상도인 MODIS(250m~1km)를 활용하였으며 보조 자료로 국가토지피복도, 지형도, 기상자료 등이 활용되었다. 캐나다의 경우 EOSD에서 제공하는 Landsat 자료를 주로 활용하였으며 LiDAR와 Radar 자료를 추가 활용하는 것을 연구 중에 있다(Hall *et al.*, 2009).

2) 활용기법

산림탄소저장량 추정은 활용 기술에 따라 현지 측정, 원격 탐사, GIS 등의 3가지 접근법으로 구분할 수 있다.

현지 측정 중심의 추정은 전통적인 산림탄소저장량 추정방법으로 앞서 설명한 바와 같다. 원격 탐사 기반의 경우 데이터 취득 반복, 분광 밴드와 식생 파라미터와의 높은 상관 등과 같은 장점때문에 대면적 AGB 추정, 특히 접근 불능 지역에 대해 주요 자료원이 되고 있으며 일반적으로 회귀분석 및 k-NN 기법을 활용하여 산림바이오매스와 탄소저장량을 추정하고 있다. 그러나 대상 지역에서 개발된 회귀 모형 결과를 다른 지역에 확장해서 적용하는 것은 한계가 있다. 보조 자료를 활용한 GIS 기반의 방법은 현지 조사에 의한

바이오매스 추정치를 업스케일링할 수 있는 유용한 방법이지만 데이터 품질이 우수한 보조 자료를 확보하는데 어려움이 따르며 AGB와 보조 자료와의 간접적인 상관관계, AGB 축적에 대한 환경 조건의 광범위한 영향 등을 고려해야 하기 때문에 분석이 어려운 측면이 있다(Lu, 2006).

특히, 원격탐사와 GIS 기반의 방법론은 IPCC GPG 수준 3에 해당하는 것으로 공간적으로 명확한(spatially explicit) 산림탄소저장량 추정을 가능하게 하여 보다 높은 신뢰도 확보가 예상된다. 이러한 공간정보 기반의 방법론은 주요 자료와 기법에 따라 ① NFI 자료와 원격탐사자료와의 결합 ② NFI 자료와 임상도와의 결합 ③ 지구통계 ④ 환경변수 모델링 등 4가지 방법론으로 분류될 수 있다. 공통적으로 NFI 자료를 주요 자료원으로 하고 각국의 자료 상황에 따라 임상도 및 위성영상을 부가 자료로 활용하며 최근에는 지구통계를 이용한 하이브리드 방식의 추정 및 환경 변수를 고려한 모델링 등이 연구되고 있다. 활용기술 별 산림탄소저장량 추정 연구 현황은 표 1에 정리되었다. 방법론별 상세 내용은 다음 절에서 자세히 기술하였다.

(1) NFI 자료와 원격탐사 자료를 이용한 추정 임상도 활용에 제약이 있거나 대면적 산림 혹은 접근이 어려운 산림 지역이 많은 경우 원격 탐사 자료가 산림탄소추정에 유용하게 활용될 수 있다. 원격 탐사 자료와 NFI 자료를 이용한 추정은 산림탄소저장량 공간분포 추정에 가장 많이 사용되는 방법이다. 일반적으로 회귀분석모델이 활용되었으나(Lufafa *et al.*, 2008; Nijland *et al.*, 2009) 최근에는 최근린(k-Nearest Neighbor, 이하 k-NN) 기법이 많이 활용되고 있다(Tomppo and Siitonen, 1991; Dees *et al.*, 2000; Reese *et al.*, 2002; Gjertsen, 2007; McRoberts *et al.*, 2007; 임중수 등, 2007; Tomppo *et al.*, 2008; Fuchs *et al.*, 2009; 임중수 등, 2009; 정재훈 등, 2010).

TABLE 1. 원격탐사와 GIS를 이용한 지상부 바이오매스 추정 기법 요약

범주	활용자료	방법	참고문헌	년도	
원격탐사	고해상도	항공사진, IKONOS	단순회귀	Tiwari와 Singh	1984
			상대생장식, 단순회귀	Thenkabail 등	2004
		초분광 영상	다중회귀	Nijland 등	2009
		Quickbird, ASTER	k-NN	fuchs 등	2009
		Landsat 5	다중회귀	Roy와 Ravan	1996
		Landsat 5	선형 및 지수 회귀	Steininger	2000
		Landsat 5	다중회귀	Lu	2005
		Landsat 5	지수 모델을 활용하여 수관직경 추정된 뒤 수관직경으로부터 바이오매스 계산	Phua와 Saito	2003
		Landsat 4 & 5	다중회귀, 신경망	Foody 등	2003
		Landsat 5	k-NN	Fazakas 등	1999
	중해상도	Landsat 5	k-NN	Gjertsen	2007
		Landsat 5	k-NN	Haapanen 등	2001
		Landsat 7 ETM+	다중회귀	Zheng 등	2004
		Landsat 7 ETM+	k-NN	임종수 등	2007
		Landsat 7 ETM+	k-NN	정재훈 등	2010
		Landsat 5, SPOT	k-NN	Reese 등	2002
		Landsat 7 ETM+	다중회귀	Rahman 등	2008
		Landsat TM & IRS-1C WIFS	k-NN, 비모수회귀	Tomppo 등	2002
		Landsat TM/ETM+ SPOT, IRS-1C LISS	k-NN	Tomppo 등	2008
		Landsat TM에서 분석된 토지피복자료, 산림조사자료, 기후 및 토양 자료	생산력모델 (PnET)	Mickler 등	2002
저해상도	SPOT VEGETATION	다중회귀, 인공신경망	Fraser와 Li	2002	
	Landsat TM & AVHRR	선형회귀모델	Hame 등	1997	
	AVHRR NDVI	단순회귀	Dong 등	2003	
	MODIS, 강우, 온도, 고도 자료	일반화가법모델 트리기반모델	Baccini 등	2004	
	비광학 영상	Radar, Lidar	다중회귀	Harrel 등	1997
			다중회귀	Lefsky 등	1999
단순회귀			Santos 등	2003	
GIS	NFI, 임상도	바이오매스 변환표	Fournier 등	2003	
	NFI, MODIS 영상, DEM, 기후 자료 등	규칙기반모델(Cubist model), 크리깅	Freeman과 Moisen	2006	
지구통계	RADAMBRASIL project 표본점자료, 임상자료, 토성자료, 고도자료 등	KED(kriging with external drift)	Sales 등	2007	
	NFI, Landsat ETM+	상관관계 분석, 정규크리깅, 일반크리깅, 공동크리깅, 회귀크리깅	Meng과 Madden	2009	
	NFI, Landsat ETM+	공동크리깅	Wang 등	2009	
	환경변수	환경변수 (고도, 경사, 토양, 강우 등)	다중회귀	Brown 등	1994
Iverson 등				1994	
Brown과 Gaston				1995	
Hall 등				2001	
Magclae-Macandog 등				2006	
Ellenwood와 Krist				2007	
규칙기반모델				Blackyard 등	2008

대부분의 산림은 복잡한 임분 구조와 다양한 환경 조건을 갖기 때문에 회귀모델을 이용하여 산림속성을 추정하는 것은 다소 어려운 작업으로 여겨지고 있다(Lu, 2006). 왜냐하면 추정 지역이 광범위해질수록 원격탐사 자료나 NFI 자료를 이용한 간접적인 추정이 유용하지만, 환경의 다양성으로 인해 특정 지역에서 취득된 샘플만을 이용하여 결정론적 모형(deterministic model)을 구축하게 되면 샘플링되지 않은 지역에 대해 충분한 설명력을 지니지 못할 위험이 있기 때문이다. 회귀모델링이 산림탄소저장량 추정에 유용한 것은 분명하지만, 위성영상을 이용한 대부분의 연구에서 50% 이상의 설명력을 보여주는 힘들다는 연구 결과가 보고된 바 있다(Rahman *et al.*, 2008).

k-NN 기법은 비모수 회귀 추정식의 하나로, 알려지지 않은 정보를 얻기 위하여 야외 조사 자료와 위성 영상과 같은 부가정보를 사용하는 통계적 기법이다(임중수 등, 2007; Haapanen *et al.*, 2001). k-NN은 북유럽을 중심으로 발달되어 왔는데 북유럽 국가 중 가장 먼저 NFI 자료의 한계를 인식한 핀란드에서는 다양한 산림 주제도 작성과 산림통계 작성을 위해 k-NN을 활용한 다목적 국가산림조사(Multi-Source Forest Inventory, MSFI)를 그 해결책으로 개발하였으며(Tomppo and Siitonen, 1991), 노르웨이에서도 k-NN 기반의 MSFI를 통해 임목축적을 포함한 국가 전역에 대한 산림 변수의 추정을 시행하게 되었다(Gjertsen, 2007). 이어 스웨덴에서도 핀란드, 노르웨이와 같이 다양한 데이터를 활용한 MS-NFI가 행해졌으며, 추정 기법으로는 k-NN을 이용한 연구가 주를 이루었다(Reese *et al.*, 2002 Tomppo *et al.*, 2008). 이러한 k-NN은 독일(Dees *et al.*, 2000), 미국(McRoberts *et al.*, 2007), 러시아(Fuchs *et al.*, 2009) 등 다양한 지역에서 그 적용성이 검토되고 있다.

바이오매스 밀도는 임분 구조의 복잡성과 환경 특성의 변이에 따라 변할 수 있으므로

각 대상지 특성에 적합한 자료와 방법론을 선택할 필요가 있다(김경민 등, 2010). 항공사진과 IKONOS 영상과 같은 고해상도 자료는 국지적 규모(local scale)에서 정확한 AGB 추정을 가능케 한다. 그러나 자료가 대용량이라는 점과 그림자 효과의 문제 등은 고해상도 자료의 대면적 적용 시 제약으로 작용한다. Landsat TM과 같은 중해상도 자료는 지역 규모(regional scale)에서의 AGB 추정에 활용될 수 있다. 혼합 픽셀(mixed pixel)은 복잡한 생물물리학적 환경을 지닌 지역에서 AGB를 추정할 때 문제점이 있는 것으로 보고되었다(Lu, 2006). AVHRR 혹은 MODIS와 같은 저해상도 자료는 국가 혹은 전지구적 규모(national and global scale)에서의 AGB 추정 시 적용이 가능하다. 그러나 저해상도 자료와 현지조사 자료와의 연결 시 어려움이 있어 아직까지는 광범위하게 적용되지 못하고 있다(Lu, 2006). 결국, 지도 작성의 대상이 되는 공간의 규모에 따라 적절한 공간해상도의 영상을 선택하는 것이 중요한데 Lu(2006)는 바이오매스 추정 시 각 해상도별 장점과 단점을 표 2와 같이 정리하였다.

Lu(2006)는 원격탐사 자료를 이용한 바이오매스 추정 시 고려해야 할 5가지 주요 이슈를 도출하고 다음과 같이 논의하였다. 첫째는 적절한 변수 선택의 문제이다. 일반적으로, 선택된 변수는 AGB와는 높은 상관관을 가지고 있어야 하며 변수 상호간에는 상관관이 약해야 한다. 단계적 회귀분석(stepwise regression), 상관분석, 신경망, 사상추출(feature extraction) 등의 방법이 변수 선택에 활용될 수 있다. 두 번째는 모델링의 문제이다. 다양한 알고리즘 간의 비교 연구가 부족했기 때문에 어떤 알고리즘이 해당 대상 지역에 적절한 것인지를 선택하는 것은 또 하나의 과제이다. 일반적으로 중해상도 자료가 활용될 경우 다중회귀분석이 AGB 추정 모델에 많이 활용되었으며 보조 자료가 활용됨에 따라 신경망 기법이 활용되었다. 또한 원격탐사자료와 보조 자료의 결합을 통해 개선된 모델을 개발하는

TABLE 2. 영상의 해상도별 장·단점(Lu, 2006)

종류	장점	단점
고해상도 영상 (5m 이하) · 항공사진 · IKONOS · QuickBird	· 소면적에 적합 · 항공사진 관독은 특히 층화와 임목재적 추정에 유용 · 수고, 수관 직경, 수관 율폐도, 임분 면적과 같은 다양한 산림 특성을 측정 · 항공사진으로부터 생물물리학적 파라미터를 추출하는데 쓰여진 다양한 기법과 접근법은 고해상도 위성 영상에 동일하게 적용될 수 있음 · 중저해상도 자료 분석 결과의 검증 혹은 정확도 평가의 참조 자료로 활용	· 수관과 지형에 의해 야기된 높은 분광특성 변이와 그림자 효과는 AGB 추정 모델 개발에 어려움 야기 · 대용량 저장 공간 필요 · 이미지 프로세싱 시간 소요 · 영상 구매비용이 높아 대면적 적용에 제한
중해상도 영상 (10~100m) · Landsat TM, ETM ⁺	· 지역 및 광역 규모에 적합 · 식생탐지에 효과적인 근적외선 센서 · 무상 제공 · 가장 광범위하게 활용되고 있어 다양한 연구 결과 축적	· 혼합픽셀문제
저해상도 영상 (100m 이상) · NOAA AVHRR · MODIS	· 국가, 대륙 혹은 지구적 규모에 적합 · AVHRR 자료는 대륙 규모의 식생역학연구에 가장 광범위하게 사용	· 저해상도 자료와 현지조사 자료와의 연결 어려움

데 GIS 기술이 유용하게 활용될 수 있다. 세 번째는 원격탐사자료의 한계이다. 거친 산악 지형의 경우 경사와 향과 같은 지형 요인은 식생 반사도에 영향을 미칠 수 있으며 이로 인해 AGB와 반사도 간의 잘못된 관계식을 만들게 된다. 그러므로 식생 반사도에 대한 지형 효과의 제거는 중요하다. 이에 대한 많은 연구가 진행되었는데 밴드 비율(Holben and Justice, 1981), 주성분 분석 혹은 회귀모델과 같은 선형 변환(Conese *et al.*, 1988; Pouch and Campagna, 1990; Naugle와 Lashlee, 1992; Conese *et al.*, 1993), 지형 보정 기법(Civco, 1989; Colby, 1991), DEM과 원격탐사 자료의 통합(Walsh *et al.*, 1990), 경사/향 층화(Ricketts *et al.*, 1992) 등에 대한 연구가 진행되었다. 넷째는 자료 품질과 불확실성이다. 표본점과 원격탐사자료의 위치 정확도는 중요한데 위치정확도가 낮게 되면 AGB와 원격탐사자료간의 잘못된 관계식이 도출될 수 있기 때문이다(Halme and Tomppo, 2001). AGB 연구의 경우 불확실

성의 주요 원천은 AGB 표본점 자료의 취합, 대기 보정, 원격탐사자료와 AGB 표본점 자료 간의 좌표 등록 오류, 원격탐사자료로부터 적절한 변수 추출, AGB 추정 모델 개발에 사용된 알고리즘 등이 될 수 있다. 이러한 불확실성의 원인을 이해하고 이를 개선하기 위한 노력은 AGB 추정을 효율을 높이는데 필수적이다. 마지막은 경제적 요인의 제약이다. 현지조사 수행, 다양한 영상 자료 구입, 자료 분석 및 모델 개발에 필요한 전문가 확보 및 소요 시간 등이 이에 해당한다. AGB 설명 변수에 대한 탐색 시간을 줄이기 위해 선행 연구에 대한 이해와 특정 지역에 적합한 영상 분석 절차에 대한 설계가 필수적이며 현지 조사 자료와 고, 중, 저 해상도 자료의 결합을 통해 국가 및 지구적 규모에서의 AGB 추정 정확도를 보다 개선시킬 수 있다. 또한 임학, 원격탐사, GIS, 모델링 및 컴퓨터 프로그래밍 등 다양한 학문 분야 별 전문가로 구성된 연구팀은 AGB 추정의 효율을 높일 수 있다.

(2) NFI 자료와 임상도를 이용한 추정

임상도를 활용하는 방법은 이미 제작된 지역에 대해 비교적 간단하게 산림탄소저장량 지도를 산출할 수 있고 임상도 갱신에 따라 산림탄소저장량 지도 또한 자동으로 갱신될 수 있다는 측면에서 효율적일 수 있다. 그러나 전국적으로 임상도가 제작되어 있지 않은 경우 적용 지역이 제한되며 바이오매스 추정에 필요한 속성이 임상도에 포함되었는지를 고려해야 한다. 임상도는 위성 영상 등과 같은 빠른 갱신정보 취득이 어려우며, 시공간적인 불확실성이 산림바이오매스 지도에 그대로 전이되는 문제가 있다.

임상도 활용의 장점에도 불구하고 이러한 여러 한계로 산림바이오매스지도 제작에 임상도를 직접 활용한 국가는 캐나다에 국한되어 있다. Fournier *et al.*(2003)은 캐나다 뉴펀들랜드와 퀘벡 지역을 대상으로 산림자원조사의 수종, 밀도, 수고 정보를 이용해 바이오매스 변환표를 만들고 임상도의 수종, 밀도, 수고 지도에 이를 적용하여 바이오매스 지도를 제작했다. Labrecque *et al.*(2006)은 이 지도를 기준 지도(baseline map)로 활용하여 바이오매스 공간분포를 위한 네 가지 방법 DRR, k-NN, LCC, BioCLUST의 결과를 비교·평가했다. 우리나라의 경우 1972년부터 현재까지 5차에 걸쳐 국가산림자원조사와 1:25,000 임상도 제작이 함께 이루어져 공간자료와 현지 조사 자료의 연결성을 확보할 수 있으며 시계열적인 정보를 활용할 수 있다는 장점이 있다. 현재 전국을 대상으로 1:5,000 임상도가 제작 중(2008~2012)에 있어 구매비용이 발생하는 원격탐사 자료에 비해 자료 확보 측면에서 효율적이다.

(3) 지구통계를 이용한 산림탄소저장량 추정

최근 들어 지구통계를 활용한 산림탄소저장량의 추정 연구가 수행되고 있다. 반베리오그램과 같은 자기공분산(auto-covariance) 함수는 표본점 바이오매스 자료의 공간변이성의 구조와 공간의존성에 대한 유클리디안 거리를

제시할 수 있는데 크리깅은 바이오매스의 공간적 변이구조에 대한 반베리오그램을 활용하여 바이오매스를 내삽함으로써 전체 대상지에 대한 바이오매스 연속 표면을 생성하게 된다. 표본점 개수가 불충분할 경우 바이오매스 자료의 공간 변이성을 모델링하기 어려우므로 크리깅 내삽은 적절치 않을 수 있다(FAO, 2004).

지구통계를 이용한 산림탄소저장량 추정 사례로 미국의 경우, FIA에서 제작한 Cubist 바이오매스 모델 기반의 바이오매스 지도를 더욱 개선하기 위해 Freeman and Moisen(2006)은 공간 구조(spatial structure) 모델링을 통한 개선 방법을 탐색하였다. 이 연구에서는 공간 구조가 분명히 드러나는 지역에 대해서는 크리깅이 성공적인 결과를 보여주었지만, 일반적으로는 Cubist 모델을 이용한 경우가 더욱 효과적인 접근 방법이었다. Meng *et al.*(2009)은 산림변수 추정에 지구통계를 활용하는 방법을 체계적으로 발전시켰다. 추정 방법으로 공동 크리깅(co-kriging)과 회귀 크리깅(regression kriging)을 활용하였다. Sales *et al.*(2007)은 아마존의 산림바이오매스 공간분포를 더욱 정확하게 추정하기 위해 지구통계를 활용하였으며, 기존의 내삽 모델이 다양한 공간 정보를 잘 반영하지 못한다는 것을 발견하고 이를 보완하고자 하였다. 그 결과 아마존 전체에 대한 산림 바이오매스의 공간분포 추정 결과뿐만 아니라, 오차지도를 얻을 수 있었다. 최근에는 시뮬레이션 기법을 적용하여 추정치의 불확실성을 분석하기 위한 연구도 수행되고 있다. Wang *et al.*(2009)은 중국 국가산림조사 표본점을 대상으로 표본점과 영상에서 발생하는 불확실성의 원인을 정의하고 공동 크리깅(point co-kriging)과 블록 통합시뮬레이션(block co-simulation) 알고리즘을 통해 산림탄소저장량을 추정하였으며 추정치의 불확실성에 기여하는 정도를 정량화하였다.

(4) 공간이질성을 고려한 환경변수 모델링

지금까지 살펴본 연구에서의 산림바이오매스 설명변수는 주로 수종, DBH, 수고, 임령 등 임분(forest stand) 특성에 국한되었다. 그러나 산림 바이오매스는 지역, 임상, 산림 구조와 교란의 정도 등 환경조건에 따라 다르다(Brown *et al.*, 1989). 동일한 식생대의 연속된 산림 내에서도 바이오매스와 순생산량은 토양수분, 토양염류, 토심, 토성, 토양온도, 방위, 국소기상, 해발고 등에 따라 다른 것으로 보고되었다(Kimmins, 1997). 즉, 바이오매스 밀도의 공간이질성은 산림의 생장에 영향을 미치는 기후, 토양, 지형적 차이에 기인하기 때문에(Iverson *et al.*, 1994; Hall *et al.*, 2001) 보다 현실에 가까운 바이오매스 추정을 위해 이러한 환경 변수를 설명변수로 하는 GIS 모형이 구축되었다(Iverson *et al.*, 1994; Brown and Gaston, 1995; Hall *et al.*, 2001; Magclae-Macandog *et al.*, 2006; Ellenwood and Krist, 2007; Blackyard *et al.*, 2008).

Brown and Gaston(1995), Iverson *et al.*(1994)은 고도, 토양, 경사, 강우량 및 통합 기후지표(integrated climate index)와 같은 다양한 환경변수를 고려하여 인간 간섭 및 자연 교란이 배제된 잠재적인 바이오매스 밀도와 산림황폐화 및 산림전용 등의 인간 활동이 반영된 현실 바이오매스 밀도를 산출하고 토지이용변화에 따른 바이오매스 밀도 변화를 추정하였다. Hall *et al.*(2001)은 바이오매스 밀도와 기상, 지형 등의 환경변수 및 위성영상 변수와의 관계를 탐색하였다. 즉, 환경변수만으로 구성된 바이오매스 회귀식, 위성영상 변수만으로 구성된 바이오매스 회귀식, 두 종류의 변수 조합으로 구성된 바이오매스 회귀식의 정확도를 비교한 결과 단일변수보다 복합변수(위성영상변수+환경변수) 사용이 더 효과적이었다. Magclae-Macandog *et al.*(2006)은 상대성장식(allometric equation)을 이용하여 지상부 바이오매스를 추정한 후 바이오매스의 공간분포를 물리적 요인(토양형, 경사, 고도)과 기후요인(연강우

량, 농업기후 구역)을 설명변수로 하는 GIS 모형을 구축하였다. 이러한 환경변수를 고려한 GIS 모형은 환경조건이 상이한 지역의 산림바이오매스 추정에 효과적일 수 있지만 사용되는 자료의 가용성과 신뢰성에 따라 추정치의 정확도가 달라질 수 있는 한계가 있다.

3. 국내연구동향 분석

1) 국내연구동향

국내의 산림탄소저장량 추정 연구는 IPCC GPG 2 수준으로 산림기본통계의 임목축적에 수종별 바이오매스 확장계수와 탄소전환계수를 곱하여 산림탄소저장량을 추정하는 연구가 주로 이루어졌다(최성득, 2004; 권순덕 등, 2005; 손영모 등, 2007; 황상일 등, 2009; 산림청, 2009; 김현, 2010; Li, 2011). 이러한 방식으로 추정한 결과는 추정의 최소 단위가 시·군 등 행정구역 단위이기 때문에 행정구역보다 상세한 규모의 국지적인 공간 분포를 파악하기는 어렵다(박현주, 2011). 시공간적인 산림탄소저장량 변화를 공간적으로 명확하게 추정할 수 있는 IPCC GPG 3 수준의 방법론을 적용한 국내 연구는 아직 초기 단계이다. 국내에서는 대부분 원격탐사 자료를 활용한 산림 바이오매스 및 탄소저장량 추정 연구가 이루어지고 있는데 북유럽 등에서 활용빈도가 높은 k-NN의 국내 적용이 주로 시도되었으며(임종수 등, 2007; 임종수 등, 2009; 정재훈 등, 2010; 박동환, 2011) 회귀모형(이승호 등, 2004; 장안진과 김형태, 2008)을 이용한 사례가 있다. 최근 들어 다양한 자료와 활용 기법에 대한 적용이 시도되고 있는데 항공사진과 LiDAR 데이터를 이용하거나(곽두안 등, 2005; 장안진 등, 2006), NFI 자료와 임상도를 이용한 회귀모형(김은숙 등, 2011), NFI 자료와 임상도, 위성영상 등 다양한 자료원을 이용한 회귀크리깅(박현주, 2011), 그리고 다양한 활용기법간의 비교 연구(정상영 등, 2009; 김경민 등, 2011)가 수행된 바 있다(그림 3).

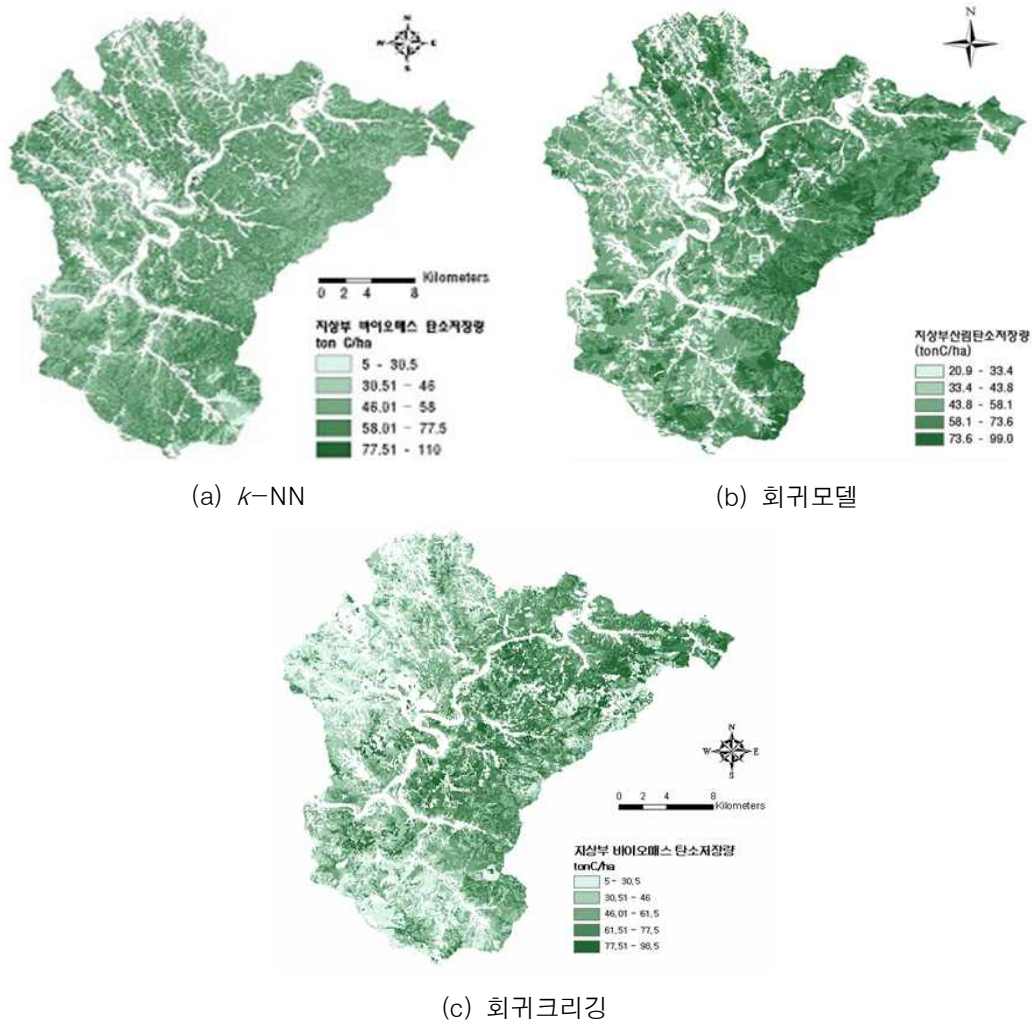


FIGURE 3. 3가지 방법론에 의한 산림탄소저장량 지도(김경민 등, 2011)

2) 국내 선행 연구의 한계점 분석

지금까지의 국내 연구들은 대부분 대상지역이 시군 단위의 소면적이며, 단순림이 많이 분포하고 지형적으로 평탄한 북유럽에서 주로 활용하고 있는 k -NN 알고리즘을 적용하였기 때문에 우리나라 지형 조건에서의 적용성을 보다 면밀히 검토하여 적용할 필요가 있다. 특히, 산림 바이오매스는 동일한 천이단계에 속할지라도 환경조건에 따른 생육 정도의 차이로 그 양이 다를 수 있기 때문에(Brown,

1989) 환경 변수를 고려할 경우 좀 더 현실 임분에 가까운 탄소저장량을 추정할 수 있으나(Iverson *et al.*, 1994; Brown *et al.*, 1995; Hall *et al.*, 2001; Magclae-Macandog *et al.*, 2006; Ellenwood and Krist, 2007; Blackyard *et al.*, 2008) 국내에서는 관련 연구가 수행된 바 없다.

바이오매스는 토지이용변화에 따라 변화할 수 있고 그에 따라 입목에 저장된 탄소가 대기 중으로 배출될 수 있기 때문에 기후변화협약에

서는 6개의 토지이용 범주별로 탄소저장량 변화에 대한 정량화를 요구하고 있다. 이러한 측면에서 산림탄소저장량 공간모델링에 그치지 않고 토지이용변화에 따른 바이오매스의 시공간적 변화 패턴을 분석하는 연구가 활발히 수행되고 있으나(Brown *et al.*, 1994; Iverson *et al.*, 1994; Brown *et al.*, 1995; FAO, 2004) 국내에서는 관련 연구가 부족하다.

결론

IPCC GPG 수준 3에 근거하여 공간적으로 명확한 산림탄소저장량을 추정하게 되면 높은 신뢰도를 확보할 수 있다. 그러나 기존의 산림탄소저장량 추정은 국가산림자원조사 자료만을 이용하기 때문에 세부적인 공간정보를 가지고 있지 않다. 따라서 다양한 공간정보와 기법을 활용한 과거 연구들에 대한 요약과 리뷰는 추정 결과를 보다 개선시키는데 주요한 정보가 될 수 있다. 주요국의 관련 연구 동향은 현재까지의 방법론이 원격탐사, GIS, 지구통계 및 환경변수 모델링 등 크게 4가지의 범주로 구분될 수 있음을 보여준다.

4가지 방법론의 장단점을 요약하면 첫째, NFI 자료와 원격탐사자료 결합의 경우 접근 불가능지역에 대한 산림탄소저장량 추정이 가능하며 다시기 영상을 이용한 변화량 분석 자료는 산림의 탄소배출 및 흡수 기능을 판단하는데 중요한 자료원이 된다. 그러나 영상의 종류와 시기에 따라 분광 반사 특성이 달라지기 때문에 동일한 산림탄소저장량 추정 회귀 모델을 적용하기가 어렵다. 둘째, NFI 자료와 임상도 결합의 경우 기구축된 임상도 등을 이용하기 때문에 현지 조사에 의한 바이오매스 추정치를 대면적으로 업스케일링(upsampling) 하기에 비용 측면에서 유리하다. 반면 임상도 제작 주기가 길 경우 단기간의 산림피복 변화를 추정하기 어렵다는 문제가 있으며 임상도 품질의 불확실성이 산출물의 품질에 많은 영향을 미친다. 셋째, 지구통계를 이용한 방법은 위성 영상을 비롯한 다양한 보조 자료와 현지

조사 자료간의 공간적 상관관계를 분석함으로써 산림바이오매스의 국지적 공간변이를 고려한 모델링이 가능하여 정확도 향상에 유리하다. 그러나 보조 자료의 품질에 따라 결과물의 정확도가 큰 영향을 받으며, 자료 분석량이 많아 대면적 적용 시 소요 시간이 길어진다는 문제가 있다. 마지막으로 환경변수 모델링은 산림의 생장에 영향을 미치는 기후, 토양, 지형적 차이를 고려함으로써 환경 조건이 상이한 지역의 산림바이오매스 추정에 효과적일 수 있지만 사용되는 자료의 가용성과 신뢰성에 따라 추정치의 정확도가 달라질 수 있는 한계가 있다.

이러한 방법론의 장단점을 고려해볼 때 우선적으로 국내 적용을 고려해볼 수 있는 방법은 임상도를 활용한 방법이다. 즉, 전국 규모의 동일한 기준으로 제작된 임상도를 활용함으로써 별도의 비용이 발생치 않아 유리하며 1970년대부터 국가산림자원조사 자료와 함께 지속적으로 구축되었다는 측면에서 산림탄소저장량 모니터링 등에도 유용하게 활용될 수 있다. 그러나, 영급, 경급, 소밀도 등과 같은 주요 속성이 범주형이므로 정확도 향상에 한계가 있으며 산림탄소저장량 추정에 필요한 수고 정보가 임상도에는 없기 때문에 별도의 수고 추정을 해야 되는 번거로움이 있다. 특히, 공간이질성과 복잡한 수종 구성을 가지고 있는 국내 산림 환경 특성이 잘 반영될 수 있도록 산림 성장과 관련된 환경 변수와 임상도 변수를 함께 고려한 회귀크리깅을 적용할 경우 산림탄소저장량 추정의 정확도 개선에 많은 진전을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 아울러, 고해상도 영상의 활용은 산림탄소저장량 추정치에 대한 검증 및 탄소배출권 확보를 위한 CDM(Clean Development Mechanism, 청정개발체제) 사업 적지 선정 등에 유용할 것으로 판단된다. 즉, 대상 지역과 산림탄소저장량 추정 목적에 적합한 공간 자료와 알고리즘을 선택하기 위해서는 알고리즘의 정확도 뿐만 아니라 자료 보유 현황, 갱신 주기, 자료 품질, 비용, 산림 환경 특성 등이 종합적으로

고려되어야 한다. 따라서 국내 산림 환경에 적합한 방법론의 선정을 위해 방법론 간의 비교 연구가 요구된다. 이에 향후 연구에서는 우리나라 산림에 적합한 산림탄소저장량 추정 모델을 개발하기 위해 4가지 방법론에 기반한 산림탄소저장량을 제작하고 정확도를 비교 평가하여 각 방법론의 장점을 융합한 하이브리드 모델을 개발하고자 한다. **KAGIS**

주

- 1) 특별한 조치를 취하지 않을 경우 배출될 것으로 예상되는 미래 전망치(지식경제부 블로그)
- 2) 줄기, 그루터기, 가지, 나무 껍질, 종자, 잎 등을 포함하는 지표(토양) 위의 모든 살아 있는 바이오매스(IPCC, 2003)
- 3) 胸高直徑(diameter of breast height). 가슴 높이에서 측정한 나무의 직경. 우리나라는 지상으로부터 1.2m 높이에서 측정하고 서구에서는 보통 1.3m 높이를 기준으로 하고 있다(산림청, 2001).
- 4) 樹高(tree height). 나무높이(산림청, 2001)
- 5) 樹幹材積(stem volume). 수간축을 중심으로 하여 수간곡선을 1회전했을 때 만들어지는 회전체의 부피(산림청, 2001)
- 6) 어떤 함수 목재의 단위 용적당 건진중량(oven-dry weight)(정희석, 2005)
- 7) 상업적인 목적으로 수확된 목재의 부피 즉, 임목축적으로부터 가지, 잎 등을 포함한 전체 임목바이오매스로 확장하는 계수(IPCC, 2003)
- 8) 바이오매스를 탄소로 전환하는 계수(손영모, 2009)

참고 문헌

곽두안, 이우균, 손민호. 2005. 개체목 및 임분 조사를 위한 LiDAR 응용에 관한 연구. 한국임학회지 94(6):431-440.

권순덕, 서정호, 손영모, 박영규. 2005. 산지전용에 따른 우리나라의 임목바이오매스 탄소 배출량. 임산에너지 24(2):10-15.

김경민, 김은숙, 이정빈, 노영희, 박현주, 이승호, 박기호. 2010. 지상부 바이오매스 공간분포 추정에 관한 주요국 연구동향 분석. 국립산림과학원 연구자료 제 389호. 서울. 109쪽.

김경민, 이정빈, 김은숙, 박현주, 정재훈, 이승호, 박기호, 허준. 2011. RS와 GIS를 이용한 3가지 방법론에 의한 산림탄소저장량 추정 비교 연구. 2011 한국지리정보학회 춘계 학술발표논문 초록집. 264-266쪽.

김은숙, 김경민, 이정빈, 이승호. 2011. 국가산림자원조사 자료와 임상도를 활용한 지상부 산림바이오매스의 공간규모 확장. 2011 대한원격탐사학회 춘계학술발표논문 초록집. 360-365쪽.

김현. 2010. GIS·RS 기법을 이용한 전라북도 산림의 바이오매스 추정. 전북대학교대학원 박사학위논문. 157쪽.

박동환. 2011. GIS와 원격탐사기술을 이용한 산림바이오매스 자원량 평가 -강원대학교 학술림을 대상으로-. 강원대학교대학원 석사학위논문. 56쪽.

박현주. 2011. 공간통계를 이용한 산림탄소저장량 추정방법에 관한 연구. 서울대학교대학원 석사학위논문. 91쪽.

산림청. 2001. 임업 및 임학 사전. 1341쪽.

산림청. 2009. 기후변화와 산림. 244쪽.

손영모. 2009. 우리나라 소나무 탄소계수 개발. 산림과학정보 vol. 217. 8-9쪽.

손영모, 이경학, 김래현. 2007. 우리나라 산림 바이오매스 추정. 한국임학회지 96(4): 477-482.

이경학, 구교상, 김영수, 김철민, 손영모, 심국

- 보, 안병준, 이윤영, 신만용, 박인협. 2004. IPCC 우수실행지침 -토지이용, 토지이용변화 및 임업- 국립산림과학원 연구자료 제 231호, 서울. 424쪽.
- 이승호, 김철민, 원현규, 김경민, 조현국. 2004. Landsat TM 위성영상을 이용한 산림자원량 산정. 한국임학회 학술연구발표논문집. 250-252쪽.
- 임종수, 공지수, 김성호, 신만용. 2007. k-NN 기법을 이용한 강원도 평창군의 산림주제도 작성과 산림통계량 추정. 한국임학회지 96(3):259-268.
- 임종수, 한원성, 황주호, 정상영, 조현국, 신만용. 2009. 위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정. 대한원격탐사학회지 25(4):311-320.
- 장안진, 김형태. 2008. 항공사진과 Lidar 데이터를 이용한 산림지역의 바이오매스 추정에 관한 연구. 한국지리정보학회지 11(3):166-173.
- 장안진, 유기윤, 김용일, 이병길. 2006. 컬러항공사진과 LiDAR 데이터를 이용한 수목 개체 및 수고 추정. 대한원격탐사학회지 22(6):543-551.
- 정상영, 임종수, 조현국, 정진현, 김성호, 신만용. 2009. 산림 바이오매스 변환표와 위성영상을 이용한 무주군의 산림 바이오매스추정. 한국임학회지 98(4):409-416.
- 정재훈, 허준, 유수홍, 김경민, 이정빈. 2010. kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정. 한국지형공간정보학회지 18(4):119-129.
- 정희석. 2005. 목재용어사전. 서울대학교 출판부. 345쪽.
- 최성득. 2004. 산림인벤토리와 원격탐사 기법을 이용한 한국 산림탄소의 분포와 거동 연구포항공과대학교 대학원 박사학위논문. 147쪽.
- 황상일, 명수정, 조공장, 조한나. 2009. 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안(I). 환경정책평가연구원. 113쪽.
- Baccini, A., M.A. Friedl, C.E. Woodcock and R. Warbingto. 2004. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. Geophysical Research Letters 31(10):L10501.
- Blackard, J.A., M.V. Finco, E.H. Helmer, G.R. Holden, M.L. Hoppus, D.M. Jacobs, A.J. Lister, G.G. Moisen, M.D. Nelson, R. Riemann, B. Ruefenacht, D. Salajanu, D.L. Weyermann, K.C. Winterberger, T.J. Brandeis, R.L. Czaplowski, R.E. McRoberts, P.L. Patterson and P.P. Tymcio. 2008. Mapping U.S. forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information. Remote Sensing of Environment 112:1658-1677.
- Brown, I.F., L.A. Martinelli, W.W. Thomas, M.Z. Moreira, C.A.C. Ferreira and R.A. Victoria. 1995. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: an example from Rondonia, Brazil. Forest Ecology and Management 75:175-189.
- Brown, S., A.J.R. Gillespie and A.E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science 35:881-902.
- Brown, S. and G. Gaston. 1995. Use of forest inventories and geographic information systems to estimate biomass density of tropical forests: Application to tropical Africa.

- Environmental Monitoring and Assessment 38:157-168.
- Brown, S. and L.R. Iverson. 1992. Biomass estimates for tropical forests. *World Resource Review* 4:366-384.
- Brown, S., L.R. Iverson and A.E. Lugo. 1994. Land-use and biomass changes of forests in Peninsular Malaysia from 1972 to 1982: GIS approach. In: V.H. Dale(ed.). *Effects of Land-use Change on Atmospheric CO₂ Concentrations: South and Southeast Asia as a Case Study*. Springer, New York, pp.117-143.
- Civco, D. 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55:1303-1309.
- Colby, J.D. 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57:531-537.
- Conese, C., G. Maracchi and F. Maselli. 1993. Improvement in maximum likelihood classification performance on highly rugged terrain using principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing* 14(7):1371-1382.
- Conese, C., G. Maracchi, F. Miglietta, F. Maselli and V.M. Sacco. 1988. Forest classification by principal component analyses of TM data. *International Journal of Remote Sensing* 9:1597-1612.
- Dees, M., J. Duvenhorst, C.P. Gross and B. Koch. 2000. Combining remote sensing data sources and terrestrial sample-based inventory data for the use in forest management inventories. *Proceeding of XIX ISPRS Congress. Commission VII. Amsterdam, 16-22 July 2000* pp.355-362.
- Dong, J., R.K. Kaufmann, R.B. Myneni, C.J. Tucker, P.E. Kauppi, J. Liski, W. Buermann, V. Alexeyev and M.K. Hughes. 2003. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment* 84(3):393-410.
- Ellenwood, J.R. and F.J. Krist. 2007. Building a nationwide 30-meter forest parameter dataset for forest health risk assessments. *ForestSat' 07 Conference. Montpellier, France, Nov. 5-7, 2007*.
- Fang, J., G. Wang, G. Liu and S. Xu. 1998. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications* 8(4):1084-1091.
- FAO. 2004. *Assessing Carbon Stocks and Modeling Win-Win Scenarios of Carbon Sequestration Through Land-Use Change*. 156pp.
- Fazakas, Z., M. Nilsson and H. Olsson. 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99:417-425.
- Foody, G.M. 2003. Remote sensing of tropical forest environments: towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. *International Journal of Remote Sensing* 24(20):4035-4046.

- Fournier, R.A., J.E. Luther, L. Guindon, M.C. Lambert, D. Piercey, R.J. Hall and M.A. Wulder. 2003. Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec. *Canadian Journal of Forest Resources* 33:1846–1863.
- Franklin, S.E., D.R. Connery and J.A. Williams. 1994. Classification of alpine vegetation using Landsat Thematic Mapper, SPOT HRV and DEM data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 20(1):49–58.
- Fraser, R.H. and Z. Li. 2002. Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION. *Remote Sensing of Environment* 82:95–110.
- Freeman, E.A. and G.G. Moisen. 2006. Evaluating Kriging as a tool to improve moderate resolution maps of forest biomass. *Environmental Monitoring and Assessment* 128:395–410.
- Fuchs, H., P. Magdon, C. Kleinn and H. Flessa. 2009. Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: combining satellite imagery and field inventory. *Remote Sensing of Environment* 113(3):518–531.
- Gjertsen, A.K. 2007. Accuracy of forest mapping based on Landsat TM data and a kNN-based method. *Remote Sensing of Environment* 110(4):420–430.
- Goodenough, D.G., R. Sobie, R. Impey, H. Chen, A. Agarwal, R. Desmarais, I. Gable, A. Guan, A. Charbonneau, G. Hobart, D. Vanderster and W. Podaima. 2008. Service oriented scientific grid computing. <http://cgs.saforah.org/attachment/wiki/PaPres/Goodenough-BCNet-NEP.ppt>.
- Haapanen, R., K. Lehtinen, J. Miettinen, M.E. Bauer and A.R. Ek. 2001. Progress in Adapting k-NN Methods for Forest Mapping and Estimation Using the New Annual Forest Inventory and Analysis Data. USDA. 87pp.
- Hall, R.J., D.T. Price, R.M. Siltanem, Y. Wang, R. Fournier, R.H. Fraser and J.E. Luther. 2001. Assessing the Role of Environmental and Remote Sensing Variables in Modeling Canada's Forest Biomass. 23rd Canadian Remote Sensing Symposium. Ste Foy, Quebec, pp.465–471.
- Hall, R.J., E.J. Arsenault, P. Boudewyn, M.Filiatrault, M.D. Gillis, A. Beaudion, J.E. Luther and M.A. Wulder. 2009. Creating a National Forest Biomass Map of Canada by Integrating Satellite Data and Models. GOFC-GOLD Biomass meeting.
- Halme, M. and E. Tomppo. 2001. Improving the accuracy of multisource forest inventory estimates by reducing plot location error—a multicriteria approach. *Remote Sensing of Environment* 78:321–327.
- Hame, T., A. Salli, K. Andersson and A. Lohi. 1997. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 18(15):3211–3243.
- Harrell, P.A., E.S. Kasischke, L.L. Bourgeau-Chavez, E.M. Haney and N.L.

- Christensen. 1997. Evaluation of approaches to estimating aboveground biomass in southern pine forests using SIR-C data. *Remote Sensing of Environment* 59(2):223-233.
- Holben, B.N. and C.O. Justice. 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 2(2):115-123.
- Huiyan, G., D. Limin, W. Gang, X. Dong, W. Shunzhong and W. Hui. 2006. Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data, *Science in China. Series E Technological Sciences* 49(I):54-62.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.
- Iverson, L.R., S. Brown, A. Prasad, H. Mitasova, A.J.R. Gillespie and A.E. Lugo. 1994. Use of GIS for estimating potential and actual forest biomass for continental South and Southeast Asia. In: V.H. Dale(ed.). *Effects of Land-Use Change on Atmospheric CO2 Concentrations: South and Southeast Asia as a Case Study*. Springer, New York, pp.67-116.
- Kimmins, J.P. 1997. *Forest Ecology* 2nd ed. Prentice-Hall. 596pp.
- Labrecque, S., R.A. Fournier, J.E. Luther and D. Piercey. 2006. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management* 226:129-144.
- Lefsky, M.A., D. Harding, W.B. Cohen, G. Parker and H.H. Shugart. 1999. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forest of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment* 67(1):83-98.
- LeMay, V., J. Maedel and N.C. Coops. 2008. Estimating stand structural details using nearest neighbor analyses to link ground data, forest cover maps, and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 112:2578-2591.
- Li, X. 2011. Biomass and Carbon Storage of Korean Forests. Ph.D. Thesis, Kangwon National University, Korea. 134pp.
- Lu, D. 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon Basin. *International Journal of Remote Sensing* 26(12): 2509-2525.
- Lu, D. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27(7):1297-1328.
- Lufafa, A., I. Diedhiou, S.A.N. Samba, M. Sene, M. Khouma, F. Kizito, R.P. Dick, E. Dossa and J.S. Noller. 2008. Carbon stocks and patterns in native shrub communities of Senegal's Peanut Basin. *Geoderma* 146:75-82.
- Luther, J.E., R.A. Fournier, R.J. Hall, C.-H. Ung, L. Guindon, D.E. Piercey, M.-C. Lambert and A. Beaudoin. 2002. A strategy for mapping Canada's forest biomass with Landsat TM imagery. *Geoscience and Remote Sensing*

- Symposium, IGARSS '02. 2002 IEEE International pp.1312–1315.
- Magclae–Macandog, D.B., M.E.M. Delgado, E.Ty and J.R.T. Villarin. 2006. A GIS–based model to improve estimation of aboveground biomass of secondary forests in the Philippines. *Journal of Tropical Forest Science* 18(1):8–21.
- Magnussen, S., R.E. McRoberts, E. Tomppo. 2009. Model–based mean square error estimators for k–nearest neighbour predictions and applications using remotely sensed data for forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 113(3) : 476–488.
- McRoberts, R.E., E.O. Tomppo, A.O. Finley and J. Heikkinen. 2007. Estimating areal means and variances of forest attributes using the k–nearest neighbors technique and satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 111(4):466–480.
- Meng, Q., C. Cieszewski and M. Madden. 2009. Large area forest inventory using Landsat ETM+: a geostatistical approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(1):27–36.
- Mickler, R.A., T.S. Earnhardt and J.A. Moore. 2002. Regional estimation of current and future forest biomass. *Environmental Pollution* 116:S7–S16.
- Naugle, B.I. and J.D. Lashlee. 1992. Alleviating topographic influences on land–cover classifications for mobility and combat modeling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing of Environment* 48:1217–1221.
- Nijland, W., E.A. Addink, S.M.D. Jong and F.D.V.d. Meer. 2009. Optimizing spatial image support for quantitative mapping of natural vegetation. *Remote Sensing of Environment* 113(4):771–780.
- Penner, M., K. Power, C. Muhairwe, R. Tellier and Y. Wang. 1997. Canada's forest biomass resources: deriving estimates from Canada's forest inventory. Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre Information Report BC–X–370, Victoria, BC. 33pp.
- Phua, M. and H. Saito. 2003. Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29:429–440.
- Pouch, G.W. and D.J. Campagna. 1990. Hyperspherical direction cosine transformation for separation of spectral and illumination information in digital scanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56:475–479.
- Rahman, M.M., E. Csaplovics and B. Koch. 2008. Satellite estimation of forest carbon using regression models. *International Journal of Remote Sensing* 29(23):6917–6936.
- Reese, H., M. Nilsson, P. Sandstrom and H. Olson. 2002. Application using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. *Computers and Electronics in Agriculture* 37:37–55.
- Ricketts, T.H., E.S. Bryant, R.W. Birnie and K.D. Kimball. 1992. Landsat TM mapping of alpine vegetation to monitor global climate change. *Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing/*

- ACSM/RT 92 Convention. Washington, D.C., USA, pp.86-97.
- Roy, P.S. and S.A. Ravan. 1996. Biomass estimation using satellite remote sensing data - an investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Bioscience* 21(4):535-561.
- Sales, M.H., C.M.S. Jr, P.C. Kyriakidis, D.A. Roberts and E. Vidal. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondnia, Brazil. *Ecological Modelling* 205:221-230.
- Santos, J.R., C.C. Freitas, L.S. Araujo, L.V. Dutra, J.C. Mura, F.F. Gama, L.S. Soler and S.J.S.S. Anna. 2003. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 87:482-493.
- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey and C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the US using inventory data. *Forest Science* 43:424-434.
- Steininger, M.K. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest aboveground biomass data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* 21:1139-1157.
- Thenkabail, P.S., N. Stucky, B.W. Griscom, M.S. Ashton, J. Diels, B.V.D. Meer and E. Enclona. 2004. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing* 25(23):5447-5472.
- Tiwari, A.K. and J.S. Singh. 1984. Mapping of forest biomass in India using aerial photographs and non-destructive field sampling. *Applied Geography* 4:151-165.
- Tomppo, E., H. Olsson, G. Stahl, M. Nilsson, O. Hagner and M. Katila. 2008. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment* 112(5):1982-1999.
- Tomppo, E., M. Nilsson, M. Rosengren, P. Aalto and P. Kennedy. 2002. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment* 82:156-171.
- Tomppo, E. and M. Siitonen. 1991. The national forest inventory of Finland. *Paper and Timber* 73(2):90-97.
- Tucker, C. 1978. A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44:1361-1380.
- Walsh, S.J., J.W. Cooper, I.E.V. Essen and K.R. Gallagher. 1990. Image enhancement of Landsat Thematic Mapper data and GIS data integration for evaluation of resource characteristics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56:1135-1141.
- Wang, G., Tonny Oyana, Maozhen Zhang, Samuel Adu-Prah, Siqi Zeng, Hui Lin, Jiyun Se. 2009. Mapping and spatial uncertainty analysis of forest vegetation carbon by combining national forest

- inventory data and satellite images. *Forest Ecology and Management* 258: 1275–1283.
- Wulder, M.A., J.C. White, R.A. Fournier, J.E. Luther and S. Magnussen. 2008. Spatially explicit large area biomass estimation: three approaches using forest inventory and remotely sensed imagery in a GIS. *Sensors* 8:529–560.
- Zheng, D., J. Rademacher, J. Chen, T. Crow, M. Bresee, J.L. Moine and S. Ryu. 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* 93(3):402–411.
- Zhuang, Q., T. Zhang and J. Xiao. 2009. Quantification of net primary production of Chinese forest ecosystems with spatial statistical approaches. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 14:85–99.
- 녹색성장위원회 홈페이지. 온실가스 감축목표. <http://www.greengrowth.go.kr/www/policy/onsil/onsil.cms>.
- 지식경제부 블로그. <http://blog.naver.com/mocienews?Redirect=Log&logNo=100093532902>. 