

국가산림자원조사 DB와 임상도를 이용한 산림탄소저장량 공간분포 추정방법 비교

김경민^{1*} · 노영희² · 김은숙¹

Comparison of Three Kinds of Methods on Estimation of Forest Carbon Stocks Distribution Using National Forest Inventory DB and Forest Type Map

Kyoung-Min KIM^{1*} · Young-Hee ROH² · Eun-Sook KIM¹

요 약

기존의 산림탄소저장량 통계는 현지 조사 표본 기반의 통계로 표본점 단위에서는 비교적 정확하지만 미조사 지점에 대해서는 정확도가 떨어질 수 있다. 이를 보완하기 위한 것이 공간 정보를 보조 자료로 함께 활용하는 면적 기반 추정이며 우리나라의 경우 디지털 항공사진 판독과 현지 조사를 통해 상세 수준의 산림정보를 얻을 수 있는 1:5,000 임상도를 보유하고 있으므로 임상도의 활용성에 주목할 필요가 있다. 본 연구에서는 1:5,000 임상도와 제5차 국가산림자원조사 자료에 기반한 세 가지 업스케일링 방법을 비교하였다. 충청남도와 대전시를 대상으로 지도대수(방법 1), 회귀크리깅(방법 2) 및 지리가중회귀(방법 3)를 이용하여 산림탄소저장량을 각각 추정하였다. 탄소저장량 범위의 경우, 방법 2(1.39~138.80 tonC/ha)와 방법 3(1.28~149.98 tonC/ha)이 방법 1(0.00~93.37 tonC/ha)에 비해 기존의 현지 조사 표본 기반 방법의 추정치 범위(1.56~156.40 tonC/ha)와 유사한 범위로 추정하여 공간자기상관성을 고려한 회귀크리깅과 지리가중회귀 방법이 탄소저장량 분포의 공간이질성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 정확도 평가를 위해 독립검증 지점 186개소의 탄소저장량에 대한 대응표본 t-검정을 수행한 결과, 방법 2의 평균 추정치와 NFI 표본 기반 평균 추정치는 통계적으로 유의한 차이가 없으며($p>0.05$) 방법 2의 결과가 가장 낮은 RMSE를 보였다. 따라서 지형과 임분 구조가 복잡한 우리나라 산림의 경우, 회귀크리깅이 기존 통계 방법과 가장 유사한 평균 탄소저장량을 산출하면서 탄소저장량의 국지적 변이를 나타내기에 유용할 것으로 판단된다.

주요어 : 임상도, 국가산림자원조사, 산림탄소저장량, 업스케일링

2014년 8월 24일 접수 Received on August 24, 2014 / 2014년 10월 17일 수정 Revised on October 17, 2014 / 2014년 12월 9일 심사완료 Accepted on December 9, 2014

1 국립산림과학원 기후변화연구센터 Center for Forest & Climate Change, Korea Forest Research Institute

2 성신여자대학교 한국지리연구소 Korean Institute of Geographical Research, Sungshin Women's University

* Corresponding Author E-mail : greenann@forest.go.kr

ABSTRACT

Carbon stocks of NFI plots can be accurately estimated using field survey information. However, an accurate estimation of carbon stocks in other unsurveyed sites is very difficult. In order to fill this gap, various spatial information can be used as an ancillary data. In South Korea, there is the 1:5,000 forest type map that was produced by digital air-photo interpretation and field survey. Because this map contains very detailed forest information, it can be used as the high-quality spatial data for estimating carbon stocks. In this study, we compared three upscaling methods based on the 1:5,000 forest type map and 5th national forest inventory data. Map algebra(method 1), RK(Regression Kriging)(method 2), and GWR(Geographically Weighted Regression)(method 3) were applied to estimate forest carbon stock in Chungcheong-nam Do and Daejeon metropolitan city. The range of carbon stocks from method 2(1.39~138.80 tonC/ha) and method 3(1.28~149.98 tonC/ha) were more similar to that of previous method(1.56~156.40 tonC/ha) than that of method 1(0.00~93.37 tonC/ha). This result shows that RK and GWR considering spatial autocorrelation can show spatial heterogeneity of carbon stocks. We carried out paired t-test for carbon stock data using 186 sample points to assess estimation accuracy. As a result, the average carbon stocks of method 2 and field survey method were not significantly different at $p=0.05$ using paired t-test. And the result of method 2 showed the lowest RMSE. Therefore regression kriging method is useful to consider spatial variations of carbon stocks distribution in rugged terrain and complex forest stand.

KEYWORDS : *Forest Type Map, National Forest Inventory, Forest Carbon Stocks, Upscaling Methods*

서론

최근 국가 온실가스 배출량을 상쇄할 수 있는 온실가스 흡수원(carbon sink)으로서 산림의 중요성이 크게 부각되고 있다. 기후변화협약에서는 각 국가별 온실가스 흡수량 추정을 위해 바이오매스를 활용하고 있는데(IPCC, 2003) 이는 수목이 탄소동화작용을 통해 공기 중의 온실가스인 이산화탄소를 흡수하면서 자라므로 수목의 무게인 바이오매스를 측정하면 얼마만큼의 온실가스를 흡수했는지 알 수 있기 때문이다(Korea Forest Service, 2009). 특히, 기후변화협약에서는 토지이용변화에 따른

산림탄소저장변화량에 대한 통계를 요구하고 있으므로 공간적으로 명확한 산림탄소저장량 분포 추정이 요구된다.

국가 스케일에서 산림탄소저장량을 추정하는 방법은 IPCC 우수실행지침에 따라 표준화되고 체계화되어 있다. 그러나 기존의 국가 단위 추정 방법은 표본점 단위의 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료만을 이용하여 행정구역별 평균을 집계하는 것으로 행정구역 내 공간이질성에 따른 산림탄소저장량 변이를 파악할 수 없으며 표본점 개수가 부족한 소면적의 경우 정밀도가 낮고 편향된 추정치를 산출하는 문제가 발생할 수 있다(Köhl *et al.*, 2006). 이를 보완하기 위해 유럽, 북미

등에서는 NFI 자료, 원격탐사 및 GIS 기술을 결합하여 산림탄소저장량을 추정하기 위한 노력이 활발히 이루어져왔다(Brown and Gaston, 1995; Reese *et al.*, 2002; Fournier *et al.*, 2003; Freeman *et al.*, 2006; Huiyan *et al.*, 2006; Labrecque *et al.*, 2006; Blackyard *et al.*, 2007; Gjertsen *et al.*, 2007; McRoberts *et al.*, 2007; Sales *et al.*, 2007; Lufafa *et al.*, 2008; Rahman *et al.*, 2008; Wulder *et al.*, 2008; Fuchs *et al.*, 2009; Magnussen *et al.*, 2009; Meng *et al.*, 2009; Nijland *et al.*, 2009; Zhuang *et al.*, 2009). 특히, 유럽에서는 산림탄소저장량 분포 추정을 위해 위성영상 기반의 k-NN (k-Nearest Neighbor) 기법을 많이 활용하고 있으며(Tomppo and Siitonen, 1991; Reese *et al.*, 2002; Tomppo *et al.*, 2002; Gjertsen *et al.*, 2007; Tomppo *et al.*, 2008; Magnussen *et al.*, 2009) 우리나라에서도 관련 연구가 최근에 수행된 바 있다(Yim *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2010). 하지만, k-NN은 비교적 단순림이 많이 분포하는 북유럽에서 주로 활용되는 기법으로 우리나라와 같이 임분 구조와 지형이 복잡한 산림 환경에 적용하는 것은 보다 충분한 검토가 뒷받침되어야 한다.

본 연구에서는 현실 임분 특성에 가까운 산림탄소저장량을 추정하기 위해, 항공사진 판독과 현지 대조를 통해 구축된 임상도와 NFI 자

료의 활용성에 주목하였다. 1:5,000 임상도는 디지털 항공사진 판독(0.5m)과 현지 대조 과정을 거쳐 제작되므로 위성 영상 분석에 의한 산림 구분보다 명확하다. 또한 1972년 이래로 NFI 및 항공사진 촬영을 통해 시계열 임상도가 구축되어 왔고 앞으로도 지속적으로 갱신될 예정이므로 임상도를 활용할 경우, 산림탄소저장량 장기 모니터링 등에도 유용하게 활용될 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 임상도를 활용한 세 가지 산림탄소저장량 추정 방법을 개발하고 그 결과를 비교하여 공간적으로 명확한 산림탄소지도 제작을 위한 최적 방법을 선정하고자 한다.

연구 지역 및 자료

1. 연구 지역

본 연구의 대상지역은 충청남도 및 대전광역시이다(그림 1). 충청남도는 지형이 저평하며 평균 고도가 100 m로 전국에서 가장 낮은 지형을 이루고 있다. 충청남도의 총면적은 2011년 기준, 863,024 ha 중 약 50.73%에 해당하는 437,851ha를 산림이 차지하고 있다. 임상별 분포는 침엽수 40.9%, 활엽수 29.5%, 혼효림 25.4% 및 무림목지 4.2%를 각각 차지하고 있다. 산림의 울창한 정도를 나타내는 1ha (100m×100m)당 평균임목축적은 109.73m³/ha로 전국 평균 125.6m³/ha에 비해 낮은 편이

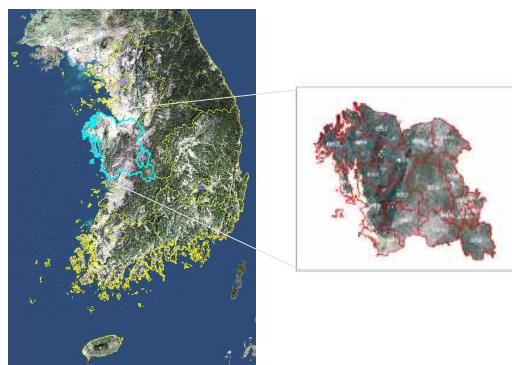


FIGURE 1. Study area

다. 대전광역시의 총면적은 53,989ha이며 30,175ha가 산림으로 55.89%의 산림율을 보이고 있다. 임상분포는 침엽수 50.7%, 활엽수 28.7%, 혼효림 19.0% 및 무림목지 1.6%를 각각 차지하고 있다. 평균입목축적은 123.95m³/ha로 충남 평균 109.73m³/ha에 비해 높다 (Korea Forest Service, 2011).

2. NFI DB

NFI는 계통추출법(systematic sampling design)에 의해 설치된 약 4,000개의 고정표본점을 조사대상으로 한다. 전국을 4km×4km 격자로 나눈 후 그 교차점에 1개의 중앙표본점과 3개의 부표본점으로 구성된 집락형태의 고정표본점이 배치되어 있다. NFI 조사 주기는 5년이며 전국 고정표본점에 대해 지형, 임상 정보를 포함하는 임분 조사와 표본점 내 입목의 수종, 흉고직경¹⁾(모든 입목), 수고²⁾ 및 수령³⁾(표준목) 등 50여 개 이상의 항목들이 조사된다 (Korea Forest Research Institute, 2009).

본 연구에서는 충청남도 및 대전광역시에 배치된 NFI 자료(2006~2009년, 1,664개)를 산림탄소저장량 공간분포 추정에 사용하고, 2010년 NFI 자료(186개)를 검증용으로 활용하였다 (그림 2).

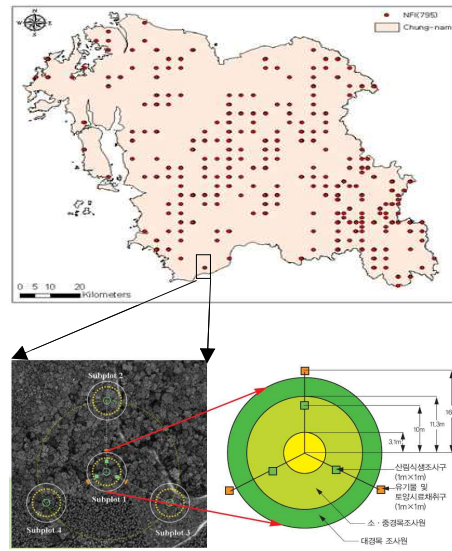


FIGURE 2. NFI plot structure

3. 1:5,000 수치임상도

표본점 단위로 추정된 산림탄소저장량을 표면 모델링하기 위한 공간자료로 임상도를 이용하였다. 국토통합공간정보시스템 구축의 일환으로 제작된 1:5,000 임상도는 임분의 임상, 주요 수종, 경급, 영급, 소밀도 등의 정보를 지도화한 것으로 항공사진 판독과 현지 임상 조사 및 표본점 조사를 기초로 하여 제작되었다(그림 3).

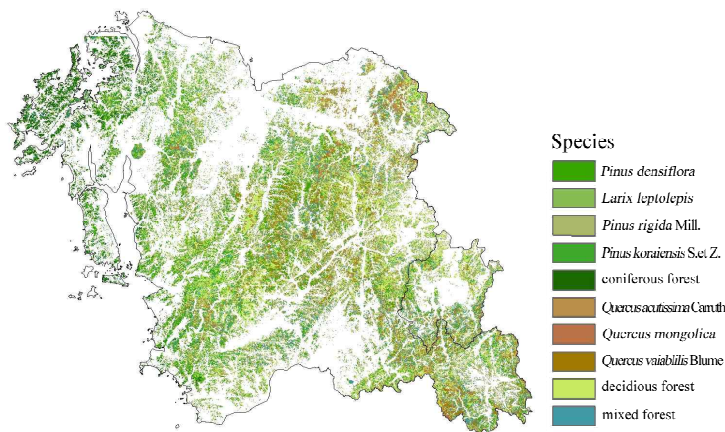


FIGURE 3. 1:5,000 forest type map(species layer)

세 가지 산림탄소저장량 공간분포 추정 방법

NFI DB와 임상도를 이용한 산림탄소저장량 공간분포 추정의 기본 개념은 NFI 표본점별 지상부 바이오매스(Above Ground Biomass, AGB)를 산림탄소저장량으로 변환 후, 표본점별 산림탄소저장량을 1:5,000 임상도를 이용하여 대면적으로 업스케일링함으로써 AGB 탄소 지도를 제작하는 것이다.

세 가지 업스케일링 방법을 이용하였는데 NFI 자료(2006~2009)로부터 얻어진 AGB 회귀모델을 임상도에 결합하는 지도대수(방법 1), 회귀크리깅을 이용한 공간내삽(방법 2), 마지막으로 국지적 내삽법인 지리가중회귀(방법 3)를 각각 적용하였다.

방법별 산림탄소지도의 정확도 평가를 위해 세 종류의 비교가 이루어졌다. 첫째, 독립검증 자료(2010년 NFI)를 활용한 평균편의(Mean Difference, MD)와 평균 제곱근 오차(Root

Mean Square Error, RMSE) 둘째, 검증지점별 실측치 및 추정치의 평균이 차이가 있는지를 보기 위한 대응표본 t-test 마지막으로, 실측치 및 추정치간의 잔차에 대한 공간자기상관성을 Moran's I를 통해 평가를 수행하였다. 연구방법에 대한 상세한 내용은 다음 장에 기술하였다.

1. 탄소저장고

탄소를 저장할 수 있는 탄소저장고(carbon pool)에는 지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 고사목, 낙엽층, 토양유기물이 있다(표 1). 지하부 바이오매스는 지상부 바이오매스에 뿌리함량비율을 곱하면 쉽게 구할 수 있으므로 본 연구에서는 AGB의 분포 추정을 중점적으로 수행하였다.

2. 표본점별 AGB 탄소저장량

표본점별 AGB 탄소저장량 산출을 위해 국가산림자원정보시스템(National Forest Information

TABLE 1. Definitions for terrestrial carbon pools

Pool		Description
Living biomass	Above-ground biomass	All living biomass 3 above the soil including stem, stump, branches, bark, seeds, and foliage.
	Below-ground biomass	All living biomass of live roots. Fine roots of less than (suggested) 2mm diameter are often excluded because these often cannot be distinguished empirically from soil organic matter or litter.
Dead organic matter	Dead wood	Includes all non-living woody biomass not contained in the litter, either standing, lying on the ground, or in the soil. Dead wood includes wood lying on the surface, dead roots, and stumps larger than or equal to 10 cm in diameter or any other diameter used by the country.
	Litter	Includes all non-living biomass with a diameter less than a minimum diameter chosen by the country (for example 10 cm), lying dead, in various states of decomposition above the mineral or organic soil. This includes the litter, fomic, and humic layers. Live fine roots (of less than the suggested diameter limit for below-ground biomass) are included in litter where they cannot be distinguished from it empirically.
Soils	Soil organic matter	Includes organic carbon in mineral and organic soils (including peat) to a specified depth chosen by the country and applied consistently through the time series. Live fine roots (of less than the suggested diameter limit for below-ground biomass) are included with soil organic matter where they cannot be distinguished from it empirically.

(Source: IPCC, 2003)

TABLE 2. Wood density and biomass expansion factor by species

Species	Wood density(WD)	AGB biomass expansion factor(BEF)
<i>Quercus variabilis</i> Blume	0.721	1.331
<i>Larix leptolepis</i>	0.453	1.317
<i>Pinus rigida</i> Mill.	0.508	1.387
<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	0.695	1.427
<i>Quercus mongolica</i>	0.663	1.502
<i>Pinus koraiensis</i> S. et Z.	0.411	1.848
<i>Pinus densiflora</i>	0.472	1.403
the other coniferous forest	0.455	1.424
the other deciduous forest	0.686	1.435

(Source: Korea Forest Research Institute, 2010)

System, NFIS)에서 취득한 수간재적에 수종별 목재밀도를 곱하여 줄기의 건중량인 수간바이오매스를 구하고 수종별 바이오매스 확장계수를 곱하여 줄기뿐만 아니라 가지, 잎 등을 모두 포함한 개체목별 AGB를 구한 뒤 이를 표본점별로 합산하여 표본점별 AGB를 구하였다. 본 연구에서 사용된 수종별 목재기본밀도 및 바이오매스 확장계수는 표 2와 같다. 마지막으로 표본점별 AGB에 탄소전환계수(0.5)를 곱하여 표본점별 AGB 탄소저장량을 구하였다(그림 4).

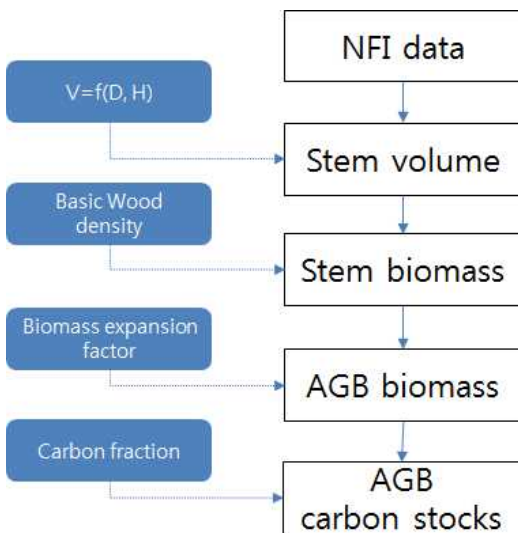


FIGURE 4. Flow chart of AGB carbon stocks based plot unit

3. 공간규모 확장을 위한 세가지 업스케일링 방법

공간규모 확장을 위해 회귀모델 지도대수(방법 1), 회귀크리깅(방법 2), 지리가중회귀(방법 3) 등 세 가지의 업스케일링 방법을 각각 적용하여 표본점 단위의 산림탄소저장량을 경관 단위로 확장하였다(그림 5).

본 연구에서는 공간자기상관성을 고려하지 않은 AGB 회귀모델 기반의 지도대수(map algebra)로 업스케일링을 수행한 경우(방법 1)와 AGB 회귀모델을 사용하되 공간자기상관성을 고려하여 업스케일링을 수행한 경우(방법 2와 3)로 나누어 산림탄소저장량의 업스케일링 시 공간자기상관성을 함께 검토하였다. 식생은 공간적으로 인접한 지역에 유사하게 분포하면서 군집을 이루기 때문에 공간자기상관성을 내포할 가능성이 크며(Anselin and Bera, 1998) 이러한 분포 특성은 산림탄소저장량 역시 공간자기상관성을 내포할 수 있음을 암시한다. AGB 회귀모델 잔차가 공간자기상관성을 가지는지를 베리오그램 분석을 통해 사전 확인한 결과, 공간자기상관성을 포함하고 있었으므로(그림 6) 방법 2와 3에서 공간자기상관성을 고려할 경우 회귀모델의 결과를 개선시킬 수 있는지를 살펴보았다. 여기에서 베리오그램 분석에 적용한 모형은 12개의 lag를 갖는 구형 모형으로 Park *et al.*(2012)의 연구 결과를 참조하였다. 업스케일링 방법별 상세 내용은 다음 장에 기술하였다.

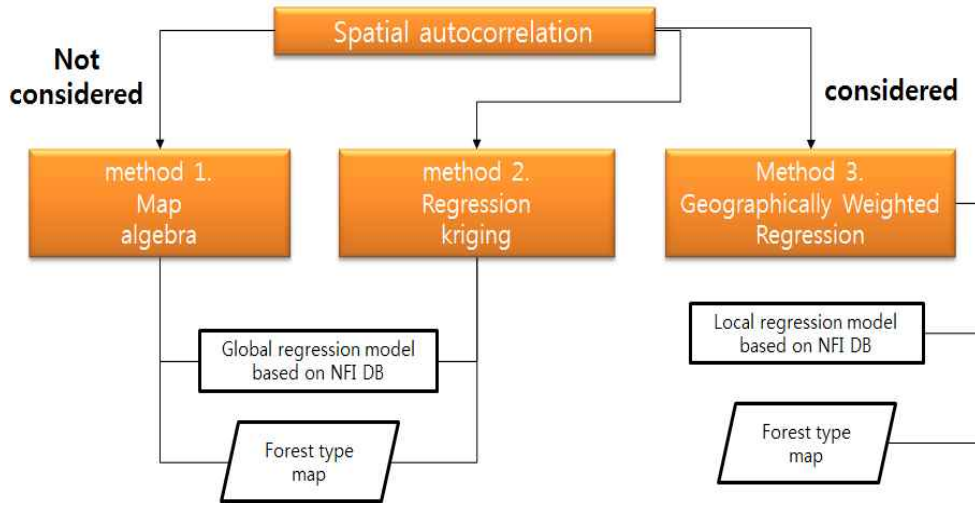


FIGURE 5. Three kinds of upscaling method for forest carbon stocks

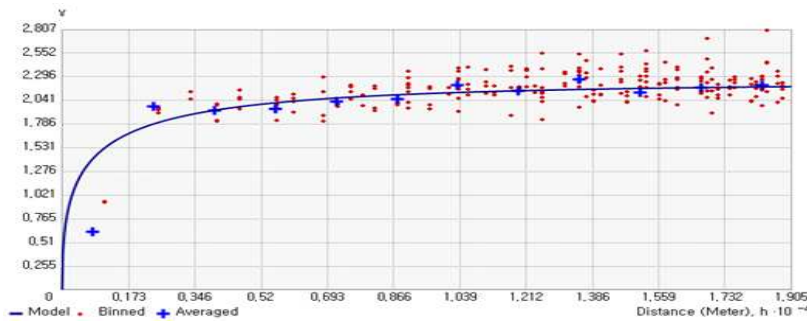


FIGURE 6. Variogram of residuals of AGB regression model

1) 회귀모델 지도대수(방법 1)

방법 1은 임상도와 호환 가능한 NFI 임분 변수 즉, 수고 및 수관밀도를 설명변수로 하는 AGB 회귀모델을 구하고, 이 회귀모델을 이용하여 임상도의 수관밀도 레이어와 임상도의 영급 기반 수고레이어를 지도대수 처리하여 표본 절별 산림탄소저장량을 공간적으로 확장하는 방법이다. 지도화 프로그램 제작에는 ArcGIS 10과 Pythonwin 2.6.5가 이용되었다.

본 연구에 활용된 회귀모델은 Kim *et al.*(2011)이 제시한 수종별 AGB 회귀 모델(식 1) 및 수고모델(식2, 3)로 충청도 지역을 대상으로 소나무(*Pinus densiflora*, PD), 일본잎갈나무 (*Larix leptolepis*, LL), 리기다소나무(*Pinus*

rigida Mill., PR), 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z., PK), 기타 침엽수(coniferous forest, EC), 상수리나무(*Quercus acutissima* Carruth., QA), 신갈나무(*Quercus mongolica*, QM), 굴참나무(*Quercus variabilis* Blume, QV), 기타 활엽수(deciduous forest, EB), 혼효림(mixed forest, MM) 등 총 10개 수종에 대해 개발되었다.

수고모델의 경우 임상도에서는 수고의 설명 변수인 DBH(Diameter at Breast Height)가 4개의 영급별 대표값으로만 구해질 수 있어 식 (4)와 같이 10개의 영급별 대표 임령으로부터 평균DBH를 추정할 수 있도록 임령-평균DBH의 관계를 도출하여 수고 추정에 이용하였다

(Kim *et al.*, 2011).

$$\ln(AGB) = a + b \times \ln(H) + c \times \ln(CD) + d \times \ln^2(H) + e \times \ln^2(CD) \quad (1)$$

여기서, AGB: 지상부바이오매스(ton/ha)
 H: 우세목수고(m)
 CD: 수관밀도(%)

$$H = a + b \times \ln(D) \quad (2)$$

$$H = a \times D^b \quad (3)$$

$$D = a \times AGE^b \quad (4)$$

여기서, AGE: 임령
 D: 우세목평균DBH(cm)

AGB 회귀모델 산출과 관련된 보다 상세한 내용은 Kim *et al.*(2011)에 수록되어 있다.

2) 회귀크리깅(방법 2)

회귀 크리깅(Regression Kriging, RK)은 회

귀 모델에 크리깅 기법을 결합한 형태로, 설명 가능한 변이를 회귀 기법으로 적합한 후 잔차(residual), 즉 설명되지 않은 변이에 대해 기대값이 0인 단순 크리깅을 이용하여 내삽하는 방법이다(Hengl *et al.*, 2004).

$$\begin{aligned} \hat{z}(s_0) &= \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0) \\ &= \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(s_i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\hat{m}(s_0)$ 은 적합된 추이(drift)를 나타내며, $\hat{e}(s_0)$ 은 내삽된 잔차이다. $q_k(s_0)$ 는 대상 위치에서의 보조 변수값, $\hat{\beta}_k$ 는 추정된 추이 모형의 계수($\hat{\beta}_k$ 는 추정된 절편), p 는 예측 변수 또는 보조 변수의 개수를 나타낸다(지리적인 좌표값과 혼동을 피하기 위하여 예측 변수를 x 대신 q 로 표기). λ_i 는 잔차의 공간적 의존 구조를 반영한 크리깅 가중치, $e(s_i)$ 는 샘플링 위치 s_i 에서의 잔차를 나타낸다.

TABLE 3. Height and AGB regression model(source: Kim *et al.*, 2011)

Species	Height model	R ²	Regression coefficient of AGB model					R ²
			a	b	c	d	e	
PD	H = -7,843 + 6.126 × Ln(D*)	0.59	-7.175	3.699	2.254	-0.492	-0.203	0.72
LL	H = -25.655 + 14.130 × Ln(D)	0.69	-29.183	18.173	2.444	-2.962	-0.217	0.86
PR	H = -7.843 + 6.880 × Ln(D)	0.50	-26.850	13.668	5.811	-2.407	-0.668	0.77
PK	H = 2.482 × D ^{0.514}	0.36	-26.199	-0.852	13.107	0.421	-1.392	0.86
EC	H = -7.429 + 6.548 × Ln(D)	0.49	-5.535	2.363	2.335	-0.298	-0.203	0.80
QA	H = -3.188 + 5.181 × Ln(D)	0.70	-16.883	10.516	2.074	-1.723	-0.158	0.93
QM	H = 3.220 × D ^{0.440}	0.58	-7.525	1.042	3.755	0.049	-0.356	0.90
QV	H = 3.963 × D ^{0.375}	0.36	-5.459	2.450	2.154	-0.214	-0.188	0.72
EB	H = -3.969 + 5.245 × Ln(D)	0.43	-7.103	3.154	2.019	-0.278	-0.159	0.72
MM	H = 1.834 × D ^{0.638}	0.49	-4.844	3.488	1.254	-0.481	-0.080	0.62

H: Dominant/co-dominant height(m), D: Dominant/co-dominant average DBH(cm), AGB: Aboveground biomass(tonC/ha), CD: Crown density(%)

* DBH regression model:

(Conifer) DBH = 3.490 × Age^{0.460} (R² = 0.97)

(Broad) DBH = 4.458 × Age^{0.363} (R² = 0.96)

(Mixed) DBH = 2.789 × Age^{0.504} (R² = 0.98)

3) 지리가중회귀(방법 3)

방법 3은 지리가중회귀(Geographically Weighted Regression, GWR)를 이용한 업스케일링방법이다. 지리적으로 가중된 포인트 데이터에 대한 국지적 통계량을 도출하기 위한 기법으로(Fortheringham *et al.*, 2002) 분석 지역 전체에 대해 하나의 회귀선을 구하여 추정량을 구하는 것이 아니라 각 회귀 지점에서 회귀선을 구하고 추정량을 산출하여 이를 공간적으로 확장한다. 지리가중회귀기법은 GWR 수행 시 표본점 구조에 따른 불필요한 가중을 완화하기 위해 30개의 이웃을 갖는 Adaptive kernel을 사용하여 밀도가 높은 지역에서는 커널을 작게 하고 밀도가 낮은 지역에서는 커널을 크게 하였다.

방법 2와 방법 3에서는 앞선 방법 1에서 사용한 Kim *et al.*(2011)의 AGB 회귀모델을 변형하여 사용하였다. 그 이유는 Kim *et al.*(2011)의 AGB 회귀모델의 설명변수인 수고

변수를 산출할 때, 또 다른 설명변수인 DBH를 사용하며 DBH는 다시 영급에서 산출하는 구조이므로 수고 변수를 취득하는 과정에서 시스템적 오차의 크기가 확대될 수 있기 때문에 본 연구에서는 여러 단계의 설명변수 모델을 통합하여 아래와 같이 보다 간결한 회귀식을 구성하여 회귀크리깅 및 지리가중회귀를 수행하였다(식 6).

$$\ln(AGB) = a + b \times \ln(AGE) + c \times \ln(CD) \quad (6)$$

여기서, AGB: 지상부 바이오매스(ton/ha)
 AGE: 영급별 대표 임령(year)
 CD: 수관밀도(%)

공간자기상관성을 고려한 방법 2와 방법 3의 전체적인 연구흐름도는 그림 7과 같다.

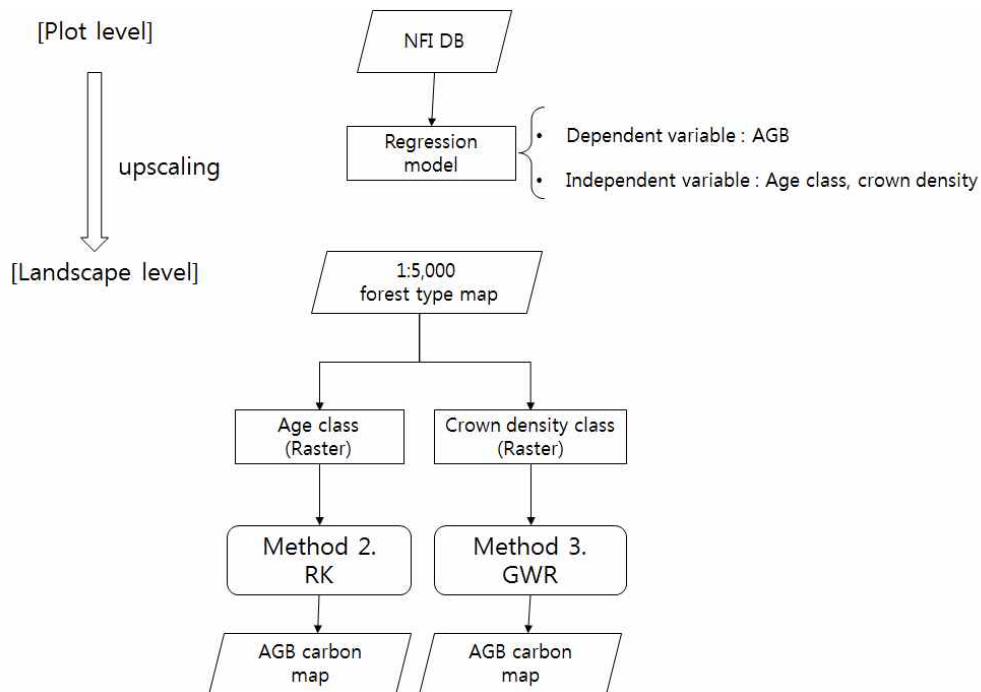


FIGURE 7. Upscaling methods for forest carbon stocks considering spatial autocorrelation(method 2 & method 3)

4. 업스케일링 방법 비교

1) 업스케일링 방법 별 산림탄소저장량 분포 패턴 및 기술통계 비교

세가지 업스케일링 방법별로 제작된 AGB 탄소지도의 산림탄소저장량 분포 패턴을 비교하고 산림탄소지도 및 기존 국가임업통계 산출방법인 표본점 기반 산출기법(NFI sample based method)을 통한 산림탄소저장량에 대해 최대, 최소, 평균 등의 기술통계량을 비교하였다.

2) 독립검증자료를 이용한 정확도 비교

업스케일링 방법별 산림탄소지도의 정확도를 평가하기 위해 세 가지 평가가 이루어졌다. 첫째, 최종 결과로 제작된 세 가지 산림탄소지도의 검증 지점별 평균 산림탄소저장량과 기존 국가임업통계 산출방법인 표본점 기반(NFI sample based method) 평균 산림탄소저장량의 차이가 존재하는지를 알아보기 위해 대응표본 t-검정(paired t-test)을 수행하였다. 이는 기존의 통계방식에 의한 평균 산림탄소저장량과 유사한 통계량을 산출하면서 공간패턴을 보여줄 수 있는 업스케일링 방법이 무엇인지를 검토하기 위함이다. 여기서는, 기존의 통계방식에 의한 검증지점별 산림탄소저장량을 실측치로 가정하였다. 186개소의 동일한 검증 지점에 대해 실측치와 업스케일 방법에 따른 추정치 등, 두 가지의 모집단을 구할 수 있는데 이 모집단 표본은 다른 조건이나 상황은 비슷하기 때문에 독립적이지 않다. 즉, 각 검증 지점에서 실측치와 추정치를 쌍으로 묶게 되면 실측치와 추정치 차이에 대한 대응표본 t-test가 가능하다. 이렇게 쌍으로 주어진 자료(x, y)를 비교하는 대응비교에서는 두 추정치의 차이

$$d_i = X_i - Y_i, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

을 구한 후 한 집단(D)에서의 평균이 0인가를 검정하는 경우와 동일해진다.

검정하고자 하는 귀무가설과 대립가설은 각각 다음과 같고

귀무가설 $H_0: \mu_D = 0$

(방법1과 방법2의 추정에 의한 평균에는 차이가 없다).

대립가설 $H_1: \mu_D \neq 0$

(방법1과 방법2의 추정에 의한 평균에는 차이가 있다).

검정통계량은 아래 식과 같다.

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad (8)$$

위 통계량의 분포가 자유도 $n-1$ 인 t 분포이므로 기각역은 다음과 같이 결정된다.

$$|T| > t(\text{유의수준}/2; n-1) \quad (9)$$

이면 H_0 을 기각한다(Kim and Kim, 2007).

검정에 활용된 통계 소프트웨어는 SPSS version 9.13이며 95% 유의수준에서 수행하였다.

둘째, 모델 개발에 이용된 NFI 자료(2006~2009)와 독립적인 186개의 NFI 자료(2010)를 이용하여 MD와 RMSE를 분석하였다. MD는 실측치와 추정치 차이의 평균으로 0에 가까울수록 편향되지 않음을 뜻하며 RMSE는 추정치가 실측치에 얼마나 가깝게 예측되었는가를 알려주는데 이 값이 작을수록 모델의 정확도는 높다.

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - o_i)}{n} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - o_i)^2}{n}} \quad (11)$$

여기서 e_i 와 o_i 는 각각 표본점 i 에서의 추정치와 실측치, 그리고 n 은 표본수이다.

마지막으로, 검증자료와 추정자료간 잔차 분포 패턴을 탐색하고 방법별 잔차의 공간자기상관성 유무에 대해 Moran's I 분석을 수행하여 세 가지 업스케일링 방법의 예측 능력을 비교하였다. Moran's I(Moran, 1948)는 지리적 자료의 공간효과를 파악하기 위해서 사용되는 지수로 상관계수와 유사하게 -1에서 1사이의 값을 가진다. 일반적으로 1과 가까운 값일수록 자료의 분포가 군집성을 지닌다고 해석할 수 있다. 최종적으로 이 값을 표준화한 값을 평균과 비교하여 유의 수준에 따라 공간적 자기상관성을 검증하게 된다.

연구 결과 및 고찰

1. 업스케일링 방법별 산림탄소저장량 분포

패턴 및 기술통계 비교

그림 8의 세 가지 AGB 탄소 지도는 산림탄소저장량의 고밀 지역과 저밀 지역 등 산림탄소저장량의 공간적인 분포 패턴을 잘 보여주고 있다. 세 가지 방법에 의해 산출된 지도 모두 충청남도 중부 지역에서 높은 산림 탄소저장량이 관찰되는데, 이는 충청남도 중부 지역을 관통하는 차령산맥의 분포와 일치하는 것으로 수관밀도가 높고 중, 대경급의 울창한 산림의 영향으로 고밀의 산림탄소저장량이 분포하는 것으로 해석된다. 한편, 충청남도 북부의 천안 및 남부의 논산, 대전, 금산 등 시가지 지역은 낮은 산림 탄소저장량이 분포하는 것으로 나타났다. 산림탄소저장량의 전체적인 분포 패턴은 세 가지 방법에서 비슷하게 탐색되었지만 산림탄소저장량의 최대, 최소 범위에서는 차이가 존재하였다. 방법 1에 의한 산림탄소지도에서는 산림탄소저장량의 최대값이 93.37tonC/ha인 반

면(그림 8(a)), 나머지 방법 2와 3에 의한 산림탄소지도에서는 100 tonC/ha 이상의 최대치가 나타났다(그림 8(b, c)).

AGB 산림탄소지도 기반의 추정치와 NFI 표본 기반 추정치(sample based estimator)의 기술통계를 비교한 결과 이러한 차이를 보다 명확히 확인할 수 있었는데, 방법 2(1.39~138.80tonC/ha)와 방법 3(1.28~149.98 tonC/ha)이 방법 1(0.00~93.37tonC/ha)에 비해 NFI 표본 기반의 추정치 범위(1.56~156.40 tonC/ha)와 유사한 범위로 산림탄소저장량의 분포 범위를 추정하였다. 따라서 방법 2와 방법 3이 방법 1에 비해 산림탄소저장량 분포의 공간이질성을 잘 반영하는 것으로 해석할 수 있다(표 4). 그러나, 평균 산림탄소저장량에서는 세 가지의 업스케일링 방법 모두, 기존 방법에 비해 과대 추정 결과를 보였으며 방법 3에서 과대 추정 경향이 가장 크게 나타났다.

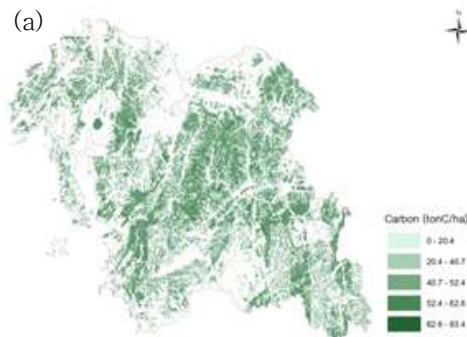


FIGURE 8. AGB forest carbon map using three kinds of upscaling method (a) map algebra based on AGB regression model, (b) regression kriging, and (c) geographically weighted regression

TABLE 4. Comparison of AGB carbon stocks for 3 kinds of method (unit: tonC/ha)

AGB Carbon stocks	NFI sample based method	Method 1 (map algebra)	Method 2 (regression kriging)	Method 3 (GWR)
Min.	1.56	0.00	1.39	1.28
Max.	156.40	93.37	138.80	149.98
Mean	48.78	52.96	52.35	54.19
Total(tonC)	21,136,911	22,948,151	22,683,831	23,481,123

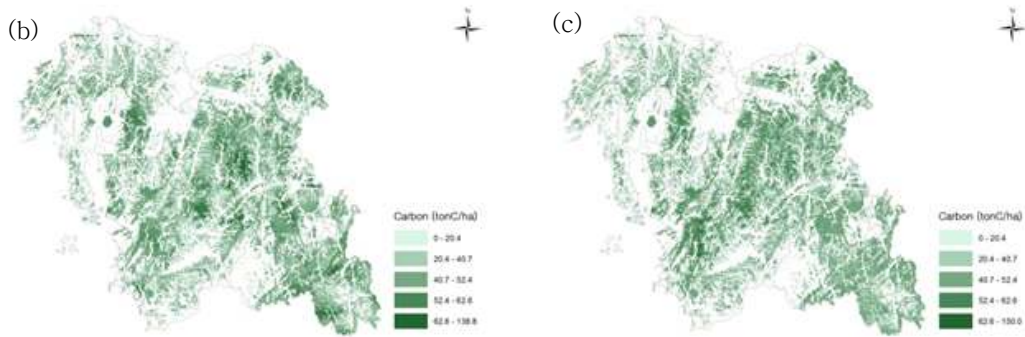


FIGURE 8. Continued

2. 독립검증자료를 이용한 정확도 비교

산림탄소지도 제작에 사용되지 않은 독립검증자료인 2010년 NFI 고정표본점 186개소의 평균 산림탄소저장량과 동일 지점의 산림탄소지도 기반 평균 산림탄소저장량을 구한 결과, 검증자료의 평균 탄소저장량은 51.26tonC/ha이며, 방법 1에서는 56.18tonC/ha, 방법 2에서는 54.03tonC/ha, 방법 3에서는 56.92tonC/ha로 나타났다(표 5). 아울러, 자료의 산포 정도를 나타내는 표준편차를 고려해볼 때 방법 2가 NFI 자료의 산포 정도와 유사하므로 세 가지 방법 중 산림탄소저장량의 공간이질성을 가장 잘 추정하는 것으로 해석할 수 있다.

이러한 독립검증자료와 추정치 간 평균의 차이가 통계적으로 유의한지를 평가하기 위해 대응표본 t-검정을 수행한 결과, 방법 2와 NFI 기반 통계와의 평균 탄소저장량은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($p > .05$) (표 6).

MD의 경우, 방법 1에서는 9.42tonC/ha, 방법 2에서는 7.27tonC/ha, 방법 3에서는 10.17tonC/ha로 모두 과대 추정을 하는 것으로 나타났으며 RMSE의 경우 방법 2가 27.94tonC/ha로 가장 작았으며 방법 1은 28.13tonC/ha, 방법 3은 29.02tonC/ha로 방법 3의 RMSE가 가장 큰 것으로 분석되었다

(표 7). 방법 3의 예측력이 가장 낮게 평가된 이유는 각 지역별로 최적의 회귀계수를 추정하는 기법상의 특성으로 인해 발생할 수 있는 over fitting 현상 때문인 것으로 해석된다.

마지막으로 업스케일링 방법별로 잔차의 전역적인 공간자기상관성을 정량적으로 평가하기 위해 Moran's I를 분석한 결과, 방법 1 잔차의 Moran's I 값은 0.74, z-score는 11.78로 회귀모델을 통해 추정된 잔차는 공간적으로 군집을 이루어 공간자기상관성이 높은 것으로 나타난 반면, 방법 2와 3의 경우 잔차의 공간자기상관성이 방법 1에 비해 낮게 나왔다(방법 2: Moran's I=0.08, z-score=1.30, 방법 3: Moran's I=0.07, z-score=1.18). 이러한 결과는 산림탄소저장량의 공간자기상관성을 고려한 방법 2와 3이 회귀모델 기반의 방법 1에 비해 잔차의 공간자기상관이 해소되어 보다 안정된 방법임을 보여준다(표 8).

이상의 결과를 종합적으로 해석해볼 때, 회귀크리깅(방법 2)이 RMSE가 가장 작으며 기존의 산림탄소저장량 추정 방식인 NFI 표본 기반 추정 방법의 결과와 평균 산림탄소저장량에 있어서 통계적으로 유의한 차이가 없이 추정하면서 실제 산림탄소저장량의 공간 이질성을 나타내는데 적합한 방법인 것으로 평가할 수 있다.

TABLE 5. Comparison of statistics for 3 kinds of method using independent data(n=186)
(unit: tonC/ha)

statistics	NFI sample based method	Method 1 (map algebra)	Method 2 (regression kriging)	Method 3 (GWR)
Mean±S.E	51.26	56.18	54.03	56.92
S.D	27.70	12.86	28.12	14.30

TABLE 6. Result of paired t-test for differences between methods(n=186)

Pair	Paired difference (Mean±S.E)	t	p-value (two tailed)
NFI sample based method -method 1	-4.92 ± 2.17	2.26	0.025*
NFI sample based method -method 2	-2.77 ± 2.01	1.38	0.168
NFI sample based method -method 3	-5.66 ± 1.98	2.86	0.005**

*p<.05, **p<.01

TABLE 7. Comparison of RMSE for three kinds of method using independent data(n=186)
(unit: tonC/ha)

Statistics	Method 1 (map algebra)	Method 2 (regression kriging)	Method 3 (GWR)
MD	4.92	2.77	5.67
RMSE	28.13	27.94	29.02

TABLE 8. Comparison of Moran's Index for residuals

Residual of method	Moran's I	Z score	p-value	Residual pattern
method 1	0.74	11.78	0.00	Clustered
method 2	0.08	1.30	0.19	Random
method 3	0.07	1.18	0.23	Random

결론

본 연구에서는 우리나라 산림에 적합한 탄소 저장량 추정을 위해 방법 1(지도대수), 방법 2(회귀크리깅), 방법 3(지리가중회귀) 등의 세 가지 방법을 제시하였다. 공통적으로 NFI 자료와 1:5,000 임상도를 활용하는 반면 NFI 표본점 단위 AGB 탄소저장량을 대면적으로 업스케일링하는 방법에서 차이가 있다.

방법별 정확도 평가 결과, 회귀크리깅이 비공간통계인 NFI 자료 중심의 기존 통계방법과 평

균에 있어 통계적으로 유의한 차이가 없으며 (p>0.05) 가장 낮은 RMSE를 보였다. 우리나라 산림과 같이 지형과 임분 구조가 복잡한 경우 공간적 이질성도 함께 반영할 수 있는 방법의 선택이 필요하다. 이러한 측면에서 볼 때, 회귀크리깅이 기존 통계 방법과 가장 유사한 평균 탄소저장량을 산출하면서 탄소저장량의 국지적 변이를 나타내기에 유용할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 면적 기반 탄소저장량 추정법은 NFI 자료, 1:5,000 임상도 등을 적극 활용하는 방법으로 막대한 예산이 투입된 기구

측 자료의 활용성을 높일 수 있다는 측면에서 또 다른 의의가 있다. 특히, NFI 자료와 임상도 기반의 회귀크리깅을 이용한 탄소지도 제작 방법은 산림탄소저장량의 기준 시점 지도를 생산하는데 유용할 것으로 사료된다. 하지만 임상도 제작 주기가 5년으로 그 사이 기간에서의 변화 탐색이나 신속한 대면적 매핑이 요구될 경우 중저해상도의 위성영상의 활용을 고려할 필요가 있다. 아울러, 고해상도 위성 영상 및 항공 사진을 활용하여 산림탄소저장량 추정에 대한 검증 체계를 갖추기 위한 기반 연구가 필요할 것으로 사료된다. **KAGIS**

주

- 1) 胸高直徑(diameter of breast height). 가슴 높이에서 측정된 나무의 직경. 우리나라는 지상으로부터 1.2m 높이에서 측정하고 서구에서는 보통 1.3m 높이를 기준으로 하고 있다(Korea Forest Service, 2001). 국가산림자원조사에서는 표본점 내 흉고직경 6cm이상의 모든 입목에 대해 흉고직경을 조사한다(Korea Forest Research Institute, 2009).
- 2) 樹高(tree height). 나무높이(Korea Forest Service, 2001). 국가산림자원조사에서는 표본점 내 표준목 10본에 대해 수고를 조사한다(Korea Forest Research Institute, 2009).
- 3) 樹齡(tree age). 각 입목의 연령(Korea Forest Service, 2001). 국가산림자원조사에서는 표본점 내 표준목 5본에 대해 수령을 조사한다(Korea Forest Research Institute, 2009).

REFERENCES

- Anselin, L. and A.K. Bera. 1998. Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. In: A. Ullah and D. Giles (ed). Handbook of Applied Economic Statistics. CRC Press, New York, pp.237-289.
- Blackyard, 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. Czaplewski, 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, 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.
- 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 Research 33(10):1846-1863.
- Fotheringham, A.S., C. Brunson and M. Charlton. 2002. Geographically Weighted Regression. Wiley, 284pp.
- Freeman, E. and G. Moisen. 2006. Evaluating kriging as a tool to improve moderate resolution maps of forest biomass. Environmental Monitoring and Assessment 128(1-3):395-410.

Anselin, L. and A.K. Bera. 1998. Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial

- Gjertsen, A.K. 2007. Accuracy of forest mapping based on Landsat TM data and a k-NN based method. *Remote Sensing of Environment* 110:420-430.
- Hengl, T., G. Heuvelink and A. Stein. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 122(1-2): 75-93.
- 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* 49:54-62.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, Kanagawa, Institute for Global Environment Strategies(IGES). 576pp.
- Jung, J.H., J. Heo, S.H. Yoo, K.M. Kim and J.B. Lee. 2010. Estimation of aboveground biomass carbon stock in Danyang area using kNN algorithm and landsat TM seasonal satellite images. *Korean Society for Geospatial Information System* 18(4):119-129 (정재훈, 허준, 유수홍, 김경민, 이정빈. 2010. kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정. *한국지형공간정보학회지* 18(4): 119-129).
- Kim, E.S., K.M. Kim, J.B. Lee, S.H. Lee and J.C. Kim. 2011. Spatial upscaling of aboveground biomass estimation using national forest inventory data and forest type map. *Journal of Korean Forest Society* 100(3):505-515 (김은숙, 김경민, 이정빈, 이승호, 김종찬. 2011. 국가산림자원조사 자료와 임상도를 이용한 지상부 바이오매스의 공간규모 확장. *한국임학회지* 100(3):505-515).
- Kim, Y.J. and H.K. Kim. 2007. *Environmental Statistics*. Dong Hwa, 256pp (김영주, 김희갑. 2007. *환경통계학*. 동화기술, 256쪽)
- Korea Forest Research Institute. 2009. 5th National Forest Inventory Manual Ver. 1.3. 54pp (국립산림과학원. 2009. 제 5차 국가산림자원조사 요령 ver 1.3. 54쪽).
- Korea Forest Research Institute. 2010. Study on the basis of forest carbon accounting in Korea. Korea Forest service. 436pp (국립산림과학원. 2010. 교토의정서 대응 산림탄소계정 기반 구축 연구. 산림청. 436쪽).
- Korea Forest Service. 2001. *Forestry Dictionary*. 1341pp (산림청. 2001. 임업 및 임학 사전. 1341쪽).
- Korea Forest Service. 2009. *Climate Change and Forest*. 244pp (산림청. 2009. 기후변화와 산림. 244쪽).
- Korea Forest Service. 2011. *Statistical yearbook of forestry*. 484pp (산림청. 2011. 임업통계연보. 484쪽).
- Köhl, M., S.S. Magnussen and M. Marchetti. 2006. *Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory*. Springer. 373pp.
- 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.

- Lufafa, A., I. Diédhiou, S. Samba, M. Séné, M. Khouma, F. Kizito, R. Dick, E. Dossa and J. Noller. 2008. Carbon stocks and patterns in native shrub communities of Senegal's Peanut basin. *Geoderma* 146 (1-2):75-82.
- Magnussen, S., R.E. McRoberts and E.O. 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* 113:476-488.
- McRoberts, R.E. and E.O. Tomppo, E. 2007. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 110:412-419.
- 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* 64:27-36.
- Moran, P. 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of Royal Statistical Society* 10:243-251.
- Nijland, W., E.A. Addink, S.M. De Jong and F.D. Van der Meer. 2009. Optimizing spatial image support for quantitative mapping of natural vegetation. *Remote Sensing of Environment* 113: 771-780.
- Park, H.J., H.S. Shin, Y.H. Roh, K.M. Kim and K.H. Park. 2012. Estimating forest carbon stocks in Danyang using kriging methods for aboveground biomass. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1): 16-33 (박현주, 신휴석, 노영희, 김경민, 박기호. 2012. 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림탄소저장량 추정 -지상부 바이오매스를 대상으로-. *한국지리정보학회지* 15(1):16-33).
- 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. Sandstro 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.
- Sales, M., C. Souza Jr, P. Kyriakidis, D. Roberts and E. Vidal. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondônia, Brazil. *Ecological Modelling* 205(1-2):221-230.
- 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* 112:1982-1999.
- 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.
- 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.
- Yim, J.S., W.S. Han, J.H. Hwang, S.Y. Chung, H.K. Cho and M.Y. Shin. 2009. Estimation of forest biomass based upon satellite data and national forest inventory data. *Korean Journal of Remote Sensing* 25(4):311-320 (임종수, 한원성, 황주호, 정상영, 조현국, 신만용. 2009. 위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정. *대한원격탐사학회지* 25(4):311-320).
- 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.

KAGIS