

국가산림자원조사 자료와 임상도를 활용한 리기다소나무림의 탄소 저장량에 대한 공간분포도 작성: 무주군의 사례로

서연옥¹ · 정성철² · 이영진^{3*}

¹국립산림과학원 난대·아열대산림연구소, ²산림청 산림정책과, ³공주대학교 산림자원학과

Mapping of Spatial Distribution for Carbon Storage in *Pinus rigida* Stands Using the National Forest Inventory and Forest Type Map: Case Study for Muju Gun

Yeonok Seo¹, Sungcheol Jung² and Youngjin Lee^{3*}

¹Warm-Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science,
Jeju 63582, Korea

²Forest Policy Division, Korea Forest Service, Daejeon 35208, Korea

³Department of Forest Resources, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

요약 본 연구의 목적은 국가산림자원조사 자료와 수치임상도를 활용하여 무주군 지역 리기다소나무림의 추정된 탄소 저장량에 대한 공간분포도를 작성하고자 하였다. 국가산림자원조사 자료를 이용하여 바이오매스 추정식을 개발하기 위해서 수고, 임령, 흉고직경, 수관밀도와외의 상관관계를 분석한 결과, 수관밀도(0.74)인자가 가장 높은 양(+)의 상관성을 보였고, 다음으로는 수고(0.61)인자에서 높은 상관관계가 나타났다. 상관분석 결과를 기반으로 탄소 저장량 추정식을 도출한 후 수치임상도를 활용하여 추정된 탄소 저장량 공간지도를 작성하였다. 수관밀도와 수고를 적용하여 추정된 탄소 저장량을 산출한 결과, 평균 58.2 ton C/ha로 나타났으며 전북 무주지역 리기다소나무림의 지상부 총 탄소저장량은 430,963 C ton으로 추정되었다.

Abstract: This study was conducted to develop a carbon storage distribution map of *Pinus rigida* stands in Muju-gun by using of the National Forest Inventory data and digital forest map. The relationships between the stand variables such as height, age, diameter at breast height (DBH), crown density and aboveground biomass of *Pinus rigida* were analyzed. The results showed that the crown density had the highest positive correlation with a value of 0.74 followed by the height variable with value of 0.61. The aboveground biomass regression models were developed to estimate biomass and carbon storage map. The results of this study showed that the average carbon storage was 58.2 ton C/ha while the total carbon stock of rigida pine forests in Muju area was estimated to be 430,963 C ton.

Key words: biomass, carbon storage, national forest inventory, forest type map

서론

1992년 리우환경회의에서 논의된 기후변화에 대한 논제는 21세기 가장 중요한 현안이자 풀어나가야 할 과제로 부각되고 있다. 특히, 산업화, 도시화에 따른 산업 활동의 증가로 인해 기후변화 현상이 나타나고 있으며 이에 따라 가뭄과 홍수, 폭염, 혹한 등이 발생하고 있다. 따

라서 이러한 기후변화에 대응하기 위해서는 국가온실가스 통계를 제출함은 물론이고 교토의정서에 따른 추가적인 정보를 제공하여야 한다. 이에 산림분야에서는 탄소 변화에 중점을 두고 있으며 이에 따른 다방면에 연구가 진행되고 있다. 특히 현지 조사에 따른 전통적인 방법에 대한 바이오매스 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 현지조사는 실제 임목을 벌채하여 많은 시간과 비용이 소모되며 일정 부분을 임의적 추출법을 이용하여 임분을 설정함으로써 광범위한 지역을 뒷받침해 주지 못하는 한계점이 발생할 수 있다.

* Corresponding author
E-mail: leeyj@kongju.ac.kr

최근에는 지구 통계학적 분석기술이 향상되고 있으며 위성영상 자료의 활용 가능성이 증대되어 산림정보를 공간적으로 구축하고 활용하는 것이 가능해졌다(Nelson et al., 2000). 따라서 온실가스 통계 자료 제출 및 신뢰도를 높이기 위해서는 지상부 바이오매스가 시도 단위 행정구역에 주요 수종별로 얼마만큼 분포하고 있는지 명확하게 제시할 필요성이 높아지고 있다. 따라서 우리나라는 정밀하게 측정된 국가산림자원조사 자료를 활용하고 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시하는 Tier 3 수준에 적합한 방법을 산출하여 공간규모를 확장시킬 수 있는 연구 방안들이 활발하게 이루어져야 한다. 국가산림자원조사는 1972년부터 10년 주기의 산림조사를 실시하였고 제5차 국가산림자원조사는 5년 주기로 실시하며 전국 고정표본점의 20%를 매년 조사하여 산림통계를 작성하는 매년 조사체제로 전환되었다. 또한 전국산림을 계통적 집락추출법에 의해 고정표본점을 4×4 km 간격으로 배치하여 조사를 하고 있다. 따라서 이 자료를 활용하면 전국 규모의 산림 바이오매스와 탄소 저장량을 산출할 수 있다.

또한 수치임상도는 국가산림자원조사와 더불어 산림정책에 중요한 기초 자료이며 1972년부터 숙련된 산림조사 전문가들이 임상도(1/25,000)를 제작하여 활용하고 있다(You et al., 2011). 즉, 제5차 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)와 제4차 임상도(Forest Type Map)는 산림에 대한 국가적인 통계정보를 제공할 뿐만 아니라 산림정보를 공간적으로 표현할 수 있는 양질의 자료라고 할 수 있다(Kim, 2011). 국외에서는 공간규모 확장과 관련된 연구들이 활발하게 이루어지고 있으며 주로 국가산림자원조사와 위성영상 자료 결합, k-NN (k-nearest neighbors) 기법 등의 연구가 수행되었다(Reese et al., 2002; Tomppo et al., 2002; Gjertsen et al., 2007; McRoberts et al., 2007; Blackard et al., 2008; Rahman et al., 2008; Fuchs et al., 2009; Magnussen et al., 2009; Breidenbach et al., 2012; Jung et al., 2013; Lumbres and Lee, 2014). 국내의 경우 공간통계자료와 GIS를 이용한 연구(Lee et al., 2006), 위성영상을 이용한 방법이 가장 활발하게 진행되고 있다(Chun et al., 2007; Chung et al., 2009; Yim et al., 2009; Jeong et al., 2010; Kim et al., 2011b; Shin, 2012).

그러나 국내에서 국가산림자원조사 자료와 임상도를 적용한 연구 사례는 부족한 실정이며 국가산림자원조사 자료와 임상도를 적용한 경우는 임분 재적을 추정한 연구(Kim et al., 2010), 산림 탄소 저장량 추정에 관한 연구(Park et al., 2012), 지상부 바이오매스 탄소 저장량 공간분포 추정기법에 관한 연구(Kim et al., 2011a) 등이 있다. 특히, 우리나라 임상도는 수종, 영급, 경급, 소밀도 등 많

은 세부적인 산림정보들을 포함하고 있으며 전국 단위로 모든 산림에 대해 제작되고 있어 다른 나라보다도 전국산림공간정보로서의 활용 가능성이 높다고 평가할 수 있다(KFRI, 2010). 국외는 캐나다의 경우 산림자원조사와 임상도를 이용하여 바이오매스 지도 제작을 실행하고 있다. 캐나다는 주정부에서 수종, 영급, 수고, 수관윙페도 등 가장 풍부한 산림 속성정보를 포함한 임상도를 제작하고 있어 산림지도를 이용한 바이오매스 공간분포 추정 연구를 수행하였다(Fournier et al., 2003). 또한 기준 지도(baseline map)를 활용하여 바이오매스 공간분포를 위한 네 가지 방법 DRR (Direct Radiometric Relationships), k-NN, LCC (Land Cover Classification), BioCLUST (Biomass from Cluster Labeling Using Structure and Type)의 결과를 비교 분석한 연구 등도 수행되었다(Labrecque et al., 2006).

그러나 우리나라는 바이오매스 공간분포 예측에 대한 연구가 초기 단계에 있으며 바이오매스 지도제작에 있어서 임상도가 실질적으로 많이 활용되지 못하고 있다. 따라서 우리나라와 같이 복잡한 임상 구조를 가진 산림 지형에서는 국가산림자원조사 자료와 임상도를 활용한 탄소 저장량 연구가 매우 필요한 시점이다. 따라서 본 연구는 무주지역의 리기다소나무림에 대한 바이오매스 및 탄소 저장량 지도 제작을 하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

연구 대상지는 1:25,000 임상도가 구축되어 있는 전라북도 무주군을 대상으로 하였으며 연구 대상지 전체 면적은 63,187 ha이었다. 이 중 산림면적은 51,643 ha를 차지하는 것으로 나타났으며(Muju, 2013) 임상도 기준으로는 59,302 ha가 산림으로 이루어진 것으로 나타났다. 수종의 분포는 혼효림, 일본잎갈나무림, 리기다소나무림이 무주군 산림의 약 56% 이상을 차지하고 있으며 전체 산림면적의 약 98%가 임목지로 이루어져 있고 약 2%가 무림목지로 이루어져 있다. 리기다소나무림의 임상도 기준 면적은 7,403 ha를 차지하고 있다.

2. 연구자료

리기다소나무림의 지상부 바이오매스를 추정하기 위해 국가산림자원조사 자료(2006~2010)를 이용하였다. 지상부 바이오매스의 정확도 높은 모델을 개발하고 평가하기 위해 무주군을 포함하고 있는 전라남도 지역을 대상으로 분석하였다. 국가산림자원조사 자료를 통해 표본점에 대한 임상정보(임상, 경급, 영급, 임분밀도)와 표본점 내 임목

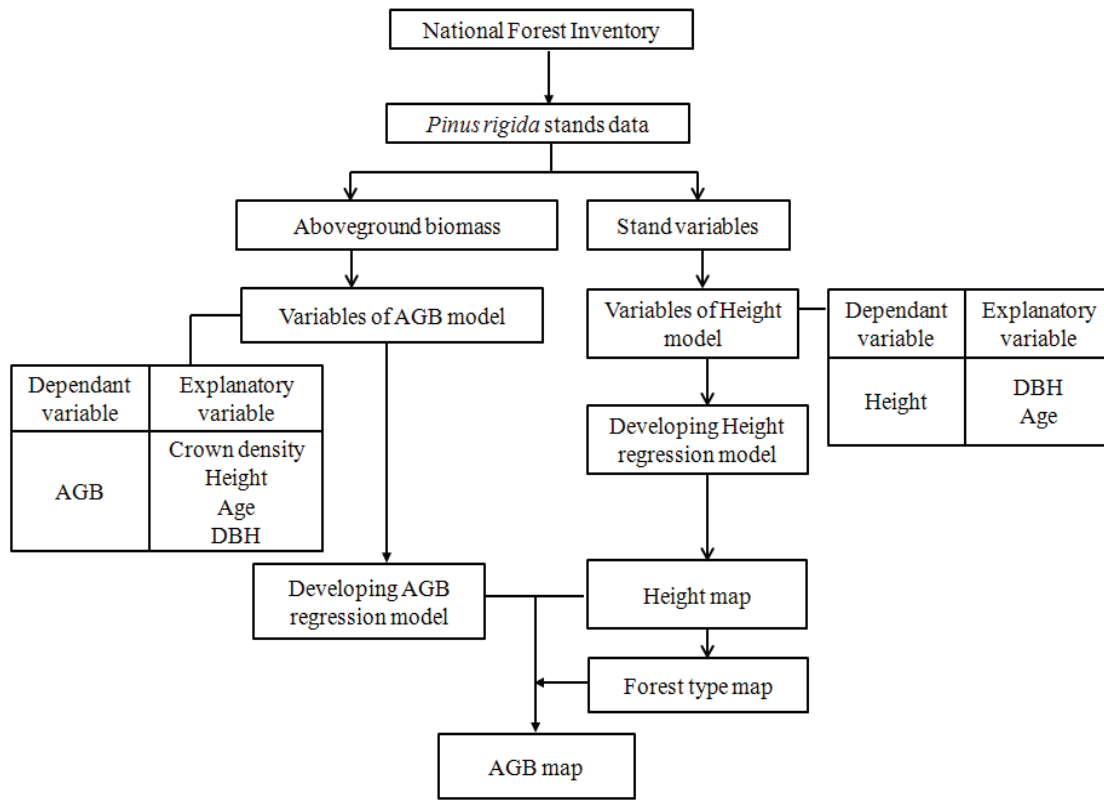


Figure 1. Study scheme in the aboveground biomass mapping with Crown density-total height of *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

의 수종, 흉고직경, 우세목 수고 등의 자료들이 조사되어 있다(Shim et al., 2008). 또한 지상부 바이오매스를 산출하기 위해 1:25,000 무주군 임상도가 이용되었다. 본 연구에서 사용된 임상도는 제4차 임상도로 1996~2005년까지 750매로 제작되었으며 리기다소나무의 분포, 임령, 수관밀도에 대한 정보를 산출하여 지도화 하는데 사용하였다. 국가산림자원조사 자료와 임상도를 결합하여 지상부 바이오매스를 추정하였다(Figure 1). 따라서 국가산림자원조사 자료에서 임상도와 호환 가능한 임분 변수들을 생성하고 리기다소나무의 지상부 바이오매스 회귀모형을 개발하고자 하였으며 적합성이 가장 높은 모델을 선정하여 임상도의 속성정보를 바탕으로 지상부 바이오매스 지도를 제작하고자 하였다.

3. 분석방법

1) 국가산림자원조사의 임분 변수 산출

국가산림자원조사 자료에서 흉고단면적이 75% 이상인 리기다소나무 임분을 선정하여 임분에 대한 자료들을 추출하였다. 추출된 리기다소나무에서 흉고직경을 대상으로 국립산림과학원에서 제작한 임목자원평가 프로그램(KFS, 2009)을 이용하여 개체목 재적을 산출하였다. 개

체목별 재적을 산출한 후 무주지역 실제 조사된 자료를 바탕으로 산출된 줄기밀도와 바이오매스 확장계수를 적용하여 임목의 바이오매스량을 산출하였고(Table 1), 개체목별 바이오매스는 표준지별로 환산하여 적용하였다. 또한, 국가산림자원조사 자료를 활용하여 바이오매스를 추정하는 주요 변수는 수종, 흉고직경, 수고 등의 인자를 사용하였다(Kim et al., 1985). 국가산림자원조사에서 작성된 임분의 경급은 임분 내 전체 임목을 대상으로 작성되었으므로 임상도에서 경급을 호환하는데 어려움이 있다. 따라서 임목조사 자료를 대상으로 평균 흉고직경을 산출하여 계산하였다. 영급과 수관밀도는 임분 내 우세목에 대한 정보를 담고 있기 때문에 임상도 자료와 호환이 가능하다(Shim et al., 2008). 임목의 수고는 임상도에서 제공하지 않기 때문에 국가산림자원조사 자료에서 우세목의 수고를 이용하여 추정 수고를 산출하였다.

Table 1. Stem density and biomass expansion factor for *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

Stem density	BEF
0.488±0.02	1.336±0.03

Note : Value are ranges with mean ± S.E.

Table 2. Possible regression models for the estimation of aboveground biomass.

Type	Regression model
Model 1	$AGB=aX_2^b$
Model 2	$AGB=a+bX_1+cX_2$
Model 3	$AGB=a+bX_1+cX_2+dX_1^2+eX_2^2$
Model 4	$AGB=a+bX_1+cX_2+dX_1^2+eX_2^2+fX_1*X_2$
Model 5	$LnAGB=a+bLn(X_2)$
Model 6	$Ln(AGB)=a+bLn(X_1)+cLn(X_2)$
Model 7	$Ln(AGB)=a+bLn(X_1)+cLn(X_2)+dLn(X_1)^2+eLn(X_2)^2$
Model 8	$Ln(AGB)=a+bLn(X_1)+cLn(X_2)+dLn(X_1)^2+eLn(X_2)^2+fLn(X_1)Ln(X_2)$

Note: AGB=Aboveground biomass, Ln=Natural logarithm, X_1 =Explanatory variables 1, X_2 =Explanatory variables 2, a, b, c, d, e, f=Regression coefficient

2) 바이오매스 추정

무주지역 리기다소나무림의 지상부 바이오매스 추정 모델을 산출하기 위해 67개의 국가산림자원조사 자료(2006~2009)를 사용하였다. 지상부 바이오매스 추정을 위해 평가된 설명변수는 흉고직경, 수고, 영급, 수관밀도이며, 선정된 설명변수를 이용하여 지상부 바이오매스 회귀모델을 대상으로 설명력을 평가하였다. 회귀모델 유형은 선행되어진 연구들을 기초로 8개 식(Table 2)을 적용하여 산출하였다(Fournier et al., 2003; Chung et al., 2009; Kim et al., 2011a). 적용된 8개식을 이용하여 적합도 검정을 실시하였으며, 검정통계량은 결정계수(R^2), 추정치의 오차인 평균 제곱근 오차(RMSE), 평균편의(MD) 등을 이용하였다.

3) 수고 추정

국가산림자원조사 자료에는 수고가 포함되어 있으나 임분에 대한 수고가 아닌 우세목에 대한 수고 자료를 포함하고 있다. 따라서 개체목의 수고를 추정하는 수고-흉고직경 모델을 임분수고 추정에 적용하고자 하였다. 그리고 수고 추정 시 가장 중요한 설명변수로 흉고직경과 임령에 대하여 검토하였고 거둬제급 유형을 적용하여 적합도 검정을 실시하였다.

또한, 국가산림자원조사 자료를 이용하여 수고 추정 시 흉고직경을 적용하면 임상도에서 수고지도 제작 시 경급에 자료를 활용할 수 있다(Table 3). 그러나 임상도의 경급은 치수, 소경목, 중경목, 대경목으로 범주형 등급의 개수가 작아 오차 범위가 넓을 수 있다는 한계점을 포함하고 있다(Kim et al., 2011b). 임상도의 경우 영급의 범위가 경급의 범위 보다 넓게 분포해 있으며 실제로 무주지역

Table 3. Mean DBH of the four DBH classes of the *Pinus rigida* stands in Muju-gun

DBH class	Seedling (< 6 cm)	Small (6~16 cm)	Medium (18~28 cm)	Large (> 30 cm)
Mean DBH (cm)	3	11	23	35

의 임령도 VI영급까지 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 수고지도 제작 시 임령으로부터 흉고직경을 추정할 수 있는 모델을 별도로 개발하였다.

4) 지상부 바이오매스 추정 및 평가

지상부 바이오매스 추정은 수고를 적용하여 임상도 속 성장정보와 결합하여 수관밀도와 수고를 이용하여 최종적인 지도를 작성하였다. 지상부 바이오매스를 지도화 하는데 사용한 프로그램은 ArcGIS 10.1 버전을 이용하여 작성하였다. 또한 본 연구 방법의 정확도를 평가하기 위해 모델 개발에 이용한 국가산림자원조사 자료(2006~2009)와 타당성 검정을 위해 국가산림자원조사 자료(2010)을 이용하여 수고와 바이오매스 추정에 정확도 평가를 하였으며 통계 분석은 SAS 프로그램을 활용하였다(SAS Institute Inc., 2004). 검정통계량은 결정계수(R^2), 추정치의 오차인 평균 제곱근 오차(RMSE), 평균편의(MD) 등을 이용하였다.

5) 지상부 탄소 저장량 추정

탄소계수는 건조된 목질부 내 함유하고 있는 탄소량을 나타내는 계수로써 IPCC에서 제시한 0.5값을 지상부 바이오매스에 적용하여 지상부 탄소저장량을 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 지상부 바이오매스 추정 모델

리기다소나무림의 지상부 바이오매스와 설명변수들 간에 상관관계를 분석한 결과, 모두 양의 상관관계가 나타났으며 수관밀도가 0.74로 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다. 다음으로 수고가 0.61로 높게 나타났으며 흉고직경이 0.49로 가장 낮은 상관관계를 보였다(Table 4). Kim et al.(2011a)의 연구에서도 리기다소나무의 흉고직경의 상관관계가 0.46으로 나타났으며 다른 변수에 비해 상관성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 흉고직경은 지상부 바이오매스와 상관관계가 상대적으로 낮았지만, 수고와의 상관관계는 가장 높은 것으로 나타났다. 임령은 기존 연구에서 수고와의 상관성이 높은 변수로 임령에 대한 자료도 활용하고자 하였다(O'Brien et al., 1995; Kim et al., 2011a). 따라서 수고, 수관밀도, 임령의 자료를 활

Table 4. Summary of correlation coefficients of different stand variables for *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

Variable	Biomass	Height	Crown density	DBH	Age
Biomass	1.00 (0.0000)				
Height	0.61 (0.0001)	1.00 (0.0000)			
Crown density	0.74 (0.0001)	0.43 (0.0004)	1.00 (0.0000)		
DBH	0.49 (0.0001)	0.52 (0.0001)	0.22 (0.0793)	1.00 (0.0000)	
Age	0.57 (0.0001)	0.43 (0.0007)	0.61 (0.0001)	0.43 (0.0003)	1.00 (0.0000)

Table 5. Aboveground biomass regression models using Crown density-total height for *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

a	b	c	R ²	n ₁	RMSE	MD	n ₂
-4.767	1.111	1.586	0.85	67	29.53	-3.61	13

Note: n₁=NFI plots of 2005~2009, n₂=NFI plots of 2010

용하여 지상부 바이오매스 모델을 개발하는데 사용하였다. 수관밀도, 수고, 임령을 적용하여 모델 8개 유형에 대한 회귀모델을 산출하였으며 수관밀도와 수고가 수관밀도와 임령의 독립변수보다 적합성이 더 높은 것으로 나타났다. 수관밀도와 수고를 설명변수로 할 경우 거듭제곱식(2, 3, 4) 보다 로그함수식(6, 7, 8)이 더 적합성이 높은 것으로 나타났다. 또한 모델식 중 결정계수가 가장 높게 나타난 식은 모델 (8)로 87%의 설명력을 보였다. 그러나 이 모델은 임상도의 수관밀도와 수고를 적용하여 바이오매스를 산출할 경우 다른 모델식보다 매우 큰 값이 추정되는 것으로 나타나 바이오매스를 추정함에 어려움이 있다고 판단하였다. 따라서 최종적으로 모델 (6)의 $\ln(AGB) = a + b\ln(H) + c\ln(CD)$ 식에 의해 지상부 바이오매스를 추정하였다. 여기에서 H는 우세/준우세목의 임분수고(m), CD는 수관밀도, AGB는 지상부 바이오매스 (ton/ha), a, b, c는 추정된 회귀계수이다.

선정된 식을 적용하여 산출한 결과는 다음과 같으며 (Table 5), 모델 적합도 검증 결과, 리기다소나무의 결정계수는 85%로 나타났고 평균 제공근 오차는 29.53 ton/ha으로 나타났다. 기존 국내 연구 결과에서 임상별 모델 개발에 따른 평균 제공근 오차는 45.3~61.8 ton/ha로 나타났다 (Chung et al., 2009). 국외 연구 결과, 수종별 바이오매스 모델에서 평균 제공근 오차는 38~47 ton/ha (Newfoundland), 21~41 ton/ha (Quebec)로 나타났으며(Fournier et al., 2003) 본 연구에서 적합성이 더 높은 것으로 나타났다. 평균편의는 -3.6 ton/ha로 과소 추정되는 것으로 나타났다. 기존의 단양지역을 대상으로 지상부 바이오매스를 추정한 결

과, -20.28 ton/ha로 과소 추정을 보였으나 본 연구에서 추정치의 오차가 더 적은 것으로 나타났다(Kim et al., 2011a). 이는 지역적인 차이와 표본 개수에 따른 차이로 판단된다.

2. 수고 추정

1) 수고추정 모델

임분수고에 따른 임령과 흉고직경의 상관관계를 분석한 결과, 수고와 흉고직경의 상관계수는 0.76으로 나타났으며, 수고와 임령과의 상관계수는 0.56으로 나타났다. 수고와 임령의 관계보다는 수고와 흉고직경의 상관성이 더 높은 것으로 나타났다. 또한, 리기다소나무는 수고와 흉고직경의 경우 지수함수에 의한 회귀모델이 설명력이 높은 것으로 나타나 흉고직경을 이용한 임분수고 회귀모델을 다음과 같이 개발하였다(Table 6). 리기다소나무의 결정계수는 0.58로 나타났고 국가산림자원조사 자료를 이용하여 적합도 검증을 한 결과, 평균 제공근 오차는 1.46 m로 나타났으며 평균편의는 0.06 m로 나타났다. Kim et al.(2011a)의 연구에서 리기다소나무의 결정계수는 0.50, 평균 제공근 오차는 3.17 m, 평균 편의는 1.20 m으로 본 연구에서 적합성이 더 좋은 것으로 나타났다. 또한, Lee (1996)의 연구에서 평균 제공근 오차가 1.4~1.8 m로 본 연구와 매우 유사한 수치를 보였다. Kwak et al.(2005)이 잣나무림의 임분수고를 추정한 결정계수 0.68과 비교하면 다소 떨어지는 수치를 보였다. 따라서 임분 수고의 정확도를 향상시켜 적용한다면 더 높은 정확성을 기대해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6. Height regression models for *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

Regression model	R ²	n ₁	RMSE	MD	n ₂
H=1.519*DBH ^{0.722}	0.58	67	1.46	0.06	13

Note: n₁ is NFI plots of 2005~2009, n₂ is NFI plots of 20

Table 7. Conversion table of average DBH (cm) age class for *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

Data type	Age class				
	I	II	III	IV	V
NFI	-	12.7	15.9	20.2	22.9
Model	7.0	12.5	16.5	19.8	22.8

Note: Regression model: DBH=2.693×Age^{0.560}(R²=0.99)

2) 평균 흉고직경과 수고의 추정

평균 임령으로부터 평균 흉고직경을 산출하기 위해 국가산림자원조사 자료를 이용해 리기다소나무의 영급별 평균 흉고직경 대표값을 산출하였다. 이 대표값을 이용해 임령과 흉고직경 변환 모델을 작성하여 영급에 따른 모델 추정의 평균 흉고직경과 평균 수고 추정 시 입력값으로 이용하였다(Table 7). 최종적으로 우세/준우세목 임분수고 회귀모델을 임상도의 임상 정보를 활용하여 임분수고 지도를 제작하였다. 그 결과 리기다소나무의 평균 수고는 11.1 m로 나타났으며 최저 수고 6.2 m, 최대 수고 15.7 m로 나타났다. 이는 단양지역 임목지 기준 평균 11.1 m와 동일한 결과로 나타났고 최대값은 본 연구에서 다소 낮은 것으로 나타났다. 또한 리기다소나무의 영급별 수고 추정치를 분석한 결과, I 영급 6.2 m, II 영급 9.4 m, III 영급 11.5 m, IV 영급 13.1 m, V 영급 14.5 m, VI 영급 15.7 m로 나타났다(Figure 2).

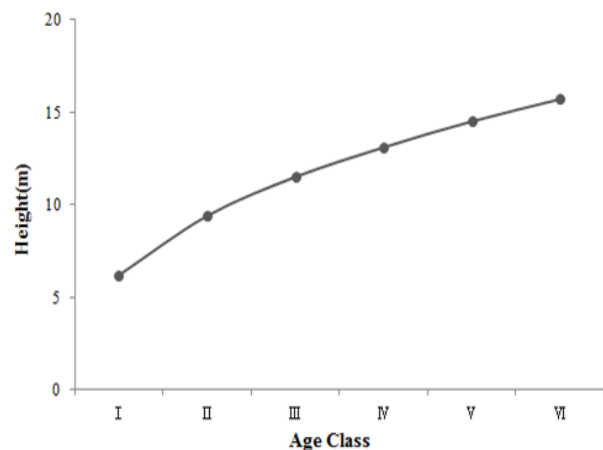


Figure 2. Height prediction in different age classes of *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

Table 8. Comparison of estimated aboveground biomass of this study against the NFI data using Crown density-total height model for *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

Biomass	Estimated (AGB)	AGB from NFI
(Total, ton)	858,492	854,371
(Mean, ton/ha)	(116.0)	(115.4)

3. 지상부 바이오매스 및 탄소 저장량

추정된 지상부 바이오매스 평균값은 116 ton/ha로 나타났으며 최소값은 10.6 ton/ha, 최대값은 209.9 ton/ha로 나타났다. 지상부 바이오매스 총량은 858,492 ton으로 추정되었다. 임상도에 추정된 값과 국가산림자원조사 자료에서 추정된 값을 비교한 결과, 지상부 바이오매스 총량에서 4,121 ton의 차이가 발생하는 것으로 나타났다(Table 8). 임상도 자료를 이용하여 추정된 값이 국가산림자원조사 자료에서 추정된 값보다 0.6% 높게 추정되었으나 두 자료 간에는 5% 유의수준에서 통계적인 차이는 없으므로 나타났다. 이러한 결과는 Kim et al.(2011a)의 침엽수림이 9.7% 과대 추정되었으나 통계적인 차이가 없는 것으로 나타난 것과 유사한 결과를 보였다. 무주지역 리기다소나무림에서 추정된 지상부 탄소 저장량은 평균 58.2 ton C/ha로 나타났고 최소 5.3 ton C/ha, 최대 105.3 ton C/ha로 나타났으며 추정된 지상부 총 탄소 저장량은 430,963 C ton으로 나타났다(Figure 3).

결론

본 연구는 국가산림자원조사 자료를 바탕으로 리기다소나무림의 탄소 저장량을 추정할 수 있는 모델을 개발하고 이를 임상도에 적용하여 지도를 제작하였다. 그 결과, 추정된 탄소 저장량은 평균 58.2 ton C/ha로 나타났

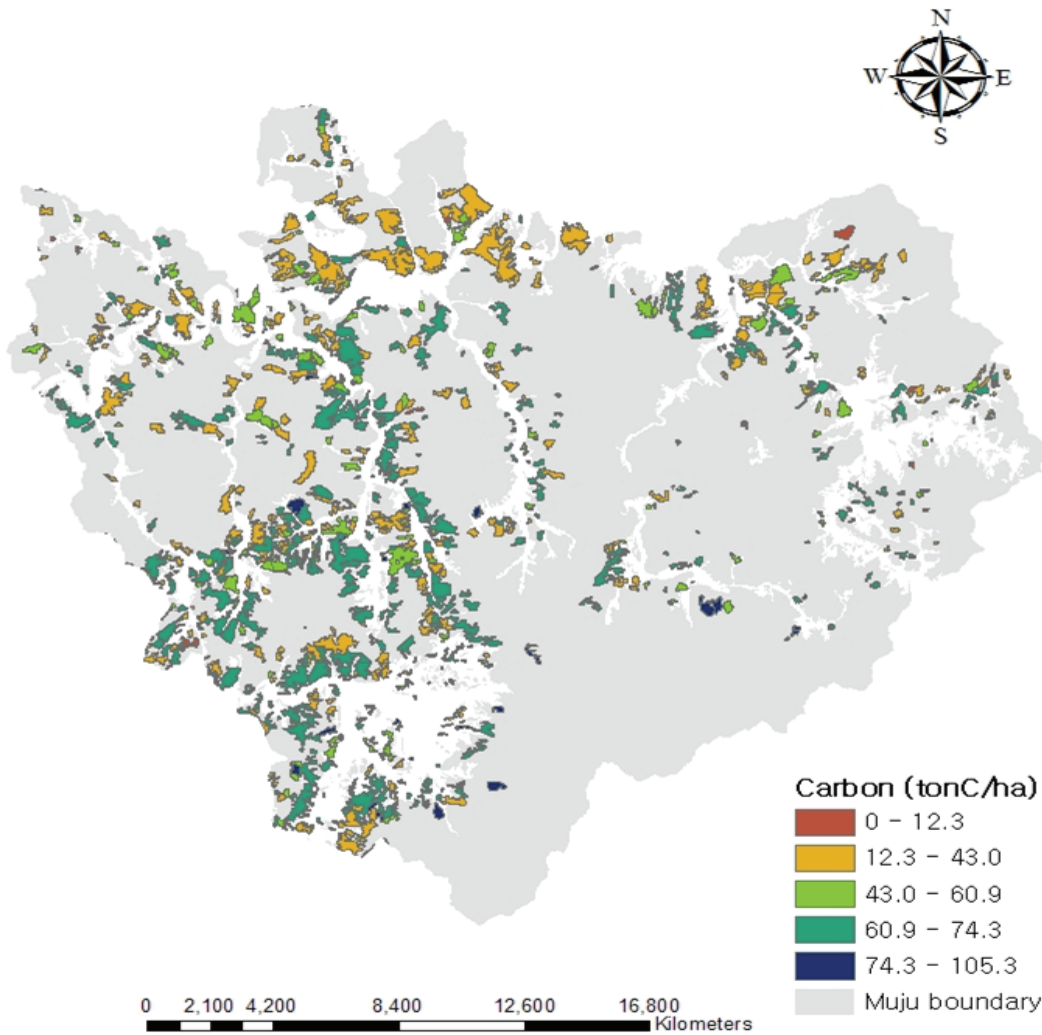


Figure 3. Aboveground carbon storage map of *Pinus rigida* stands in Muju-gun.

며 무주지역 리기다소나무림의 지상부 총 탄소 저장량은 430,963 C ton으로 추정되었다. 이러한 조사 자료는 수십년간 임업 전문가들에 의해서 측정된 자료와 항공사진 판독에 의해 구축된 자료로 향후 산림 탄소 저장량을 산출하는데 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 현장조사 자료에서 추정된 모델식을 적용하여 공간규모를 확장하였다는데 큰 의의가 있으며 지역별, 주요 수종별 전통방법이 확실히 구축된 상태에서 현장조사의 접근이 어려운 지역에 적용한다면 오차범위를 줄여줄 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 국가산림자원조사 자료에 탄소계수를 적용하고 이에 따라 임상도에 공간 규모를 확장하여 추정할 수 있기 때문에 추후 탄소계정 수준 3에 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 국가산림자원조사 자료의 정확성과 부족한 표준지 개수를 보완하여 1:5,000 임상도와 적용시킨다면

우리나라와 같이 복잡한 임상에 적용성이 더 높아질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 산림청의 지원으로 이루어진 ‘차세대 산림시업기술개발 연구 사업단(과제번호: S211316L020130)’과 ‘임업기술개발사업(과제번호: S211416L010140)’의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

References

- Blackard, J.A., Finco, M.V., Helmer, E.H., Holden, G.R., Hoppus, M.L., Jacobs, D.M., Lister, A.J., Moisen, G.G., Nelson, M.D., Riemann, R., Ruefenacht, B., Salajanu, D.,

- Weyermann, D.L., Winterberger, K.C., Brandeis, T.J., Czaplowski, R.L., McRoberts, R.E., Patterson, P.L. and Tymcio, P.P. 2008. Mapping U.S. forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information. *Remote Sensing of Environment* 112(4): 1658-1677.
- Breidenbach, J., Naeset, E. and Gobakken, T. 2012. Improving k-nearest neighbor predictions in forest inventories by combining high and low density airborne laser scanning data. *Remote sensing of environment* 117: 358-365.
- Chun J.H., Lim, J.H. and Lee, D.K. 2007. Biomass estimation of Gwangneung catchment area with Landsat ETM+ image. *Journal of Korean Forestry Society* 96(5): 591-601.
- Chung, S.Y., Yim, J.S., Cho, H.K., Jeong, J.H., Kim, S.H. and Shin, M.Y. 2009. Estimation of forest biomass for Muju county using biomass conversion table and remote sensing data. *Journal of Korean Forest Society* 98(4): 409-416.
- Fournier, R.A., Luther, J.E., Guindon, L., Lambert, M.C., Piercey, D., Hall, R.J. and Wulder, M.A. 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.
- Fuchs, H., Magdon, C., Kleim, C. and Flessa, H. 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.
- Jung, J.H., Heo, J., Yoo, S.H., Kim, K.M. and Lee, J.B. 2010. Estimation of aboveground biomass carbon stock in Danyang area using kNN algorithm and landsat TM seasonal satellite images. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science* 18(4): 119-129.
- Jung, J.H., Kim, S.P., Hong, S.C., Kim, K.M., Kim, E.S., Im, J.H. and Heo, J. 2013. Effects of national forest inventory plot location error on forest carbon stock estimation using k-nearest neighbor algorithm. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82: 82-92.
- Kim, E.S., Kim, K.M., Kim, C.C., Lee, S.H. and Kim, S.H. 2010. Estimating the spatial distribution of forest stand volume in Gyeonggi Province using national forest inventory data and forest type map. *Journal of Korean Forest Society* 99(6): 827-835.
- Kim, E.S., Kim, K.M., Lee, J.B., Lee, S.H. and Kim, C.C. 2011a. Spatial upscaling of aboveground biomass estimation using national forest inventory data and forest type map. *Journal of Korean Forest Society* 100(3): 455-465.
- Kim, K.D., Park, J.W., Park, I.H., Kim, C.M. and Cheong, S.H. 1985. Growth and dry matter production of *Pinus Rigida* Mill and *Robinia Pseudoacacia* L. *Journal of Korea Forestry Energy Research Society* 5(1): 1-9.
- Kim, K.M., Lee, J.B., Kim, E.S., Park, H.J., Roh, Y.H., Lee, S.H., Park, K.H. and Shin, H.S. 2011b. Overview of research trends in estimation of forest carbon stocks based on remote sensing and GIS. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3): 236-256.
- Kim, S.Y. 2011. Assessment of crown fire hazard based on the fuel characteristics in *Pinus densiflora* stands. Department of Forest Resource Graduate School of Kongju National University PP. 84.
- Korea Forest Research Institute. 2010. Main tree species carbon emission factors for forest greenhouse inventory pp. 89.
- Korea Forest Service. 2009. Table of tree harvest and weight and volume. pp. 21.
- Kwak, D.A., Lee, W.K. and Son, M.H. 2005. Application of LiDAR for measuring individual trees and forest stands. *Journal of Korean Forest Society* 94(6): 431-440.
- Labrecque, S., Fournier, R.A., Luther, J.E. and Piercey, D. 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.
- Lee, C.S., Lee, W.K., Yoon, J.H. and Song, C.C. 2006. Distribution pattern of *Pinus densiflora* and *Quercus* Spp. stand in Korea using spatial statistics and GIS. *Journal of Korean Forest Society* 95(6): 663-671.
- Lee, W.K. 1996. Stand and general Height-DBH curve models for *Pinus densiflora* in Kangwon Province. *Journal of Korean Forest Economics Society* 4(2): 66-78.
- Lumbres, R.I. and Lee, Y.J. 2014. Aboveground biomass mapping of La Trinidad forests in Benguet, Philippines, using Landsat thematic mapper data and k-nearest neighbor method. *Forest Science and Technology* 10(2): 104-111.
- Magnussen, S., McRoberts, R.E. and Tomppo, E.O. 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): 478-488.
- McRoberts, R.E., Tomppo, E.O., Finley, A.O. and Heikkinen, J. 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.
- Nelson, R., Jimenez-Ramon, J.A., Schnell, C.E., Hartshorn, G.S., Gregoire, T.G., and Oderwald, R. 2000. Canopy height models and airborne lasers to estimate forest biomass: two problems. *International Journal of Remote Sensing* 21(11): 2153-2162.

- O'Brien, S.T., Hubbell, S.P., Spiro, P. and Condit, R. 1995. Diameter, height, crown, and age relationships in eight neotropical tree species. *Ecology* 76(6): 1926-1939.
- Park, H.J., Shin, H.S., Roh, Y.H., Kim, K.M. and Park, K.H. 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.
- Rahman, M.M., Csaplovics, E., and Koch, B. 2008. Satellite estimation of forest carbon using regression models. *International Journal of Remote Sensing* 29(23): 6917-6936.
- Reese, H., Nilsson, M., Sandstrom, P., and Olson, H. 2002. Application using estimates of forest of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. *Computers and Electronics in Agriculture* 37: 37-55.
- SAS Institute, Inc., 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute, Inc. Cary. NC.
- Shim, W.B., Jeong, J.H., Kim, S.H., Kim, J.S., Ryu, J.H., Kim, J.C., Seo, S.A. and You, B.O. 2008. 5th Korea national forest inventory-field survey manual-Korea Forest Research Institute. pp. 54.
- Shin, J.H. 2012. Estimation of forest biomass and carbon dioxide absorption using geographic information system (GIS) and remote sensing. Department of environmental health graduate school of Public Health, Seoul National University pp. 52.
- Statistical Yearbook of Muju. 2013. pp. 34-49.
- Tomppo, E., Nilsson, M., Rosengren, M., Aalto, P. and Kennedy, P. 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.
- Yim, J.S., Han, W.S., Hwang, J.H., Chung, S.Y., Cho, H.K. and Shin, M.Y. 2009. Estimation of forest biomass based upon satellite data and national forest inventory data. *Journal of Korean Remote Sensing* 25(4):311-320.
- You, B.O., Kim, C.C. and Kim, S.H. 2011. Development of FAPIS (Forest Aerial Photograph Interpretation System) for digital forest cover type mapping (Version 1.0). *Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies* 14(2): 128-137.

(Received: March 15, 2017; Accepted: April 12, 2017)