

임상도 특성에 따른 임목축적 및 탄소저장량 추정: 강원도를 중심으로

김소원 · 손영모* · 김은숙 · 박 현
국립산림과학원 기후변화연구센터

Estimation of Growing Stock and Carbon Stock based on Components of Forest Type Map: The case of Kangwon Province

So Won Kim, Yeong Mo Son*, Eun Sook Kim and Hyun Park

Center for Forest & Climate Change, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요 약: 본 연구는 임상도 상의 특성인 영급, 경급 및 수관밀도를 이용하여 임목의 축적 및 탄소저장량을 추정하는 기법을 개발하고자 하였다. 먼저 국가산림조사(강원도 중심)를 바탕으로 한 임목축적 자료를 임상도 제작 당시의 축적으로 전환하였으며, 이 자료와 임상도 특성과의 관계를 수량화방법을 통하여 임목축적 추정 모형을 개발하였다. 임상도 특성이 임목축적 추정에 기여하는 바를 알 수 있는 제곱 편상관계수의 크기를 비교해 본 결과, 영급이 가장 큰 기여를 하고 있었으며, 다음이 수관밀도, 임상, 경급의 순이었다. 임목축적 추정치 중 최소치는 활엽수림의 영급 II, 경급 '소', 수관밀도 '소'인 분류기준에서 ha당 20.0 m³이고, 최대치는 침엽수림의 영급 VI, 경급 '대', 수관밀도 '밀'인 분류기준에서 ha당 305.0이었다. 임상별로 침엽수림은 ha당 30.5~305.0 m³, 활엽수림은 ha당 20.0~200.4 m³, 혼효림은 ha당 23.8~238.1 m³로 추정되었다. 임상별 탄소저장량을 비교해 보면, 임상에 무관하게 경급 '대', 수관밀도 '밀'인 분류기준에서 임목축적에 따른 영급별 탄소저장량이 최대인 것으로 나타났다. 본 임상도 특성을 이용한 임목축적 추정은 산지 전용 또는 산지 재해에 의한 임목축적의 감소 및 탄소저장량 변화를 충분히 추정할 수 있을 것이며, 일선 산림관계자 또는 정책입안자의 산림경영 의사결정에도 유효한 도움을 줄 수 있을 것이라 판단된다.

Abstract: This research aimed to provide a method to estimate growing stock and carbon stock using the characteristics of forest type map such as the age-class, DBH class and crown density class. We transformed the growing stock data of national forest inventory (mainly Kangwon-do province) onto those of time when the forest type map was established. We developed a simulation model for the growing stock using the transformed data and the characteristics of forest type map by the quantification method I. By comparing partial correlation coefficient, we found that quantification of growing stock was largely affected by age-class followed by crown density class, forest type and DBH class. The growing stock, was estimated as minimum in the broadleaved forest with age-class II, DBH class 'Small', and crown density class 'Low' as 20.0 m³/ha, whereas showed maximum value in the coniferous forest with age-class VI, DBH class 'Large', and crown density class 'High' as 305.0 m³/ha. The growing stock for coniferous, broadleaved, and mixed forest were estimated as 30.5~305.0 m³/ha, 20.0~200.4 m³/ha, and 23.8~238.1 m³/ha, respectively. When we compared the carbon stock by forest type, the carbon stock by age class based on growing stock was maximum when DBH class was 'Large' and crown density class was 'High' regardless of forest type. This estimation of growing stock by using characteristic of forest type can be used to estimate the changes in growing stock and carbon stock resulting from deforestation or natural disaster. In addition, we hope it provide a useful advice when forest officials and policy makers have to make decisions in regard to forest management.

Key words: carbon stock, forest type map, growing stock, quantification method

서 론

임상도는 항공사진을 수종, 수령, 임상, 생육상태 등이 비슷하고, 인접 산림과 구별되는 한 단지의 산림 즉, 임분

별로 판독하여 작성된 도면이며, 지역별, 주기별로 제작 갱신되어 왔다. 이러한 임상도는 시간이 흐름에 따라 임분 단위별로 수종, 수령, 생육상태 등이 변할 수 있으며, 특히, 수령은 임분 내에서 각기 다른 수령을 보일 수 있으므로 10년 단위의 영급으로 표기하며, 일정기간 또는 산림의 변화에 따라 영급 산정이 달라질 수도 있다.

*Corresponding author
E-mail: treelove@forest.go.kr

2006년부터 새롭게 시작된 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)는 국가 산림에 대한 보다 정확한 정보를 제공하고 있으며, 이에 따라 임상도도 이전의 1/25,000 도면에서 1/5,000 대축적으로 바꾸는 사업이 수행되고 있다. 임상도는 산림의 가장 기본적인 정보인 임종, 영급, 경급, 수관밀도 등의 정보를 제공하고 있으며, 이들 정보를 이용하여 일선 산림 행정가들은 조림, 간벌, 수확 시기의 결정 뿐만 아니라 미래 산림을 육성하기 위한 가장 기본적인 정보를 획득하고 있다(Korea Forest Service, 2013).

그러나 임상도에는 산림의 현재 특성만을 제공하고 있기 때문에 임목의 축적에 대한 정보는 전혀 알 수가 없다는 단점이 있다. 물론 영급이나 경급 등을 고려하여 개략적인 유추는 가능하겠으나, 어디까지나 추측일 뿐이다.

임상도 상 특성을 고려하여 임목축적을 산정하는 연구는 아직 제대로 이루어진 바 없으며, 여러 가지 방법이 나올 수 있을 것이다. 본 연구에서는 임상도 상 특성이 질적인 변량이고, 우리가 필요로 하는 임목축적은 양적인 변량인 관계로 일본 학계에서 제시한 바 있는 수량화 이론(Quantification theory)을 적용하고자 하였다.

일본의 수량화 이론의 개발과 적용은 1940년대 후반에서 1950년대 초반에 걸쳐 林知己夫(Chikio Hayashi) 박사가 개발하였다. 수량화 방법은 수량화 I, II, III, IV로 분류되어 적용되었으며, I 방법은 연속형 외적기준(종속변량)인 경우, II 방법은 범주형 외적기준인 경우, III & IV 방법은 다변량 자료가 외적기준을 포함하지 않는 경우 적용할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 본 연구에 적용하게 될 수량화I방법은 1948년경 시작한 일본인의 읽기, 쓰기 능력조사를 분석하는데 적용한 것이 시초라 알려져 있으며, 실제 이 분석은 일반적 통계모형에서는 선형모형(linear model)과 일치한다고 볼 수 있다(Huh, 1998; 2006; Noh, 1990; 2007; Kim and Kang, 2008).

본 연구에서는 임상도 상 영급, 경급, 수관밀도의 특성으로 분류되어 있는 정보를 제5차 국가산림자원조사 시 도출된 임목축적 정보를 연계시켜 임상도 정보만으로도

임목축적을 산정하고, 또 이를 발전시켜 탄소저장량 또는 흡수량까지 산정할 수 있는 추정식을 개발하는데 있다.

재료 및 방법

1. 공시 재료

1) 제5차 국가산림자원조사 자료

산림청에서 수행한 5차 국가산림자원조사(2006-2012년) 자료 중 표본점별 임목축적 정보를 제공받아 이용하였으며(Korea Forest Service, 2013), 이 자료의 표본점과 임상도의 표본점을 일치시켜 분석에 이용하였다.

2) 1/5,000 임상도 특성 수치화 자료

1/5,000 수치임상도의 정보를 제공받아 활용하였으며(Korea Forest Research Institute, 2013), 상기의 NFI 표본점과의 정보를 일치시켜 분석에 이용하였다. 본 연구에서는 임상별 면적 및 축적이 높은 강원도 지역의 약 800개 표본점을 중심으로 각 표본점의 첫 번째 부표본점을 선정하고, 분석과정에 따라 최종 부표본점 657개를 이용하여 분석하였다.

3) 산림생장을 자료

국가산림자원조사 시의 임목축적을 임상도 제작 당시의 축적으로 전환하기 위해서 전국적인 임목생장을 자료를 적용하여(Table 1), 임상도 제작 당시의 축적량으로 계산하였다(Korea Forest Service, 2012).

4) 탄소저장량 추정 계수

특정 지역에 있어 임상별로 추정된 임목축적을 탄소저장량 및 흡수량으로 전환하기 위하여 이용한 계수는 Table 2와 같다(Korea Forest Research Institute, 2012).

2. 분석 방법

1) 임목축적의 전환식

제5차 국가산림자원조사에 따른 임목축적과 수치임상

Table 1. Forest growth rate by provinces.

Provinces	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk
Forest growth rate (%)	3.9	3.7	4.0	4.2	3.7
Provinces	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju	Total
Forest growth rate (%)	4.4	4.1	4.2	4.6	4.0

Table 2. Carbon emission factors by forest type.

Forest type	Emission factors	Basic wood density	Biomass expansion factor	Root-shoot ratio	Carbon fraction factor
Coniferous forest		0.49	1.30	0.32	
Broadleaved forest		0.58	1.40	0.26	0.50
Mixed forest		0.54	1.35	0.29	

도 특성을 연계시키는 과정에 있어 시차가 존재하는 경우가 발생하였는데 즉, 국가산림자원조사 시기와 수치임상도 제작 시기가 서로 맞지 않아 동일한 장소에서의 동일한 시기의 임목축적 추정치이 곤란하므로 이를 재적생장율을 이용하여 국가산림자원조사 임목축적 정보를 다음과 같은 수치임상도 제작 당시의 축적으로 전환하였다.

$$V = v \left(\frac{P}{100} + 1 \right)^{n_2 - n_1} \quad (1)$$

여기서, V는 수치임상도 제작당시 축적, v는 NFI 조사당시 축적, n₁는 NFI 조사년도, n₂는 수치임상도 제작년도, P는 임목생장율을 나타낸다(Kim, 1994).

2) 수량화 I방법 적용

수량화 I방법 적용의 목적은 질적인 설명변수와 양적인 종속변수와의 가장 큰 상관을 갖는 선형 결합을 찾는 일이다. 그러나 설명변수가 범주형인 경우 원래 값을 그대로 이용할 수 없기 때문에 특정속성을 가지고 있을 경우 1, 없으면 0의 값만을 부여하는 변수, 즉 가변수(dummy variable:D)로 변환하여 선형 결합하여야 한다(Huh, 1998; Kim and Kang, 2008). 개별 가변수는 한 개의 질적 독립 변수의 한 가지 범주를 대표하고, k개의 범주를 갖는 질적 변수의 가변수는 k-1개로 대표된다(Cha et al., 2012).

본 분석에서는 질적 설명변수인 임상(침엽수림, 활엽수림, 혼효림), 영급(II-VI), 경급(소, 중, 대), 수관밀도(소, 중, 밀)의 각 범주를 가변수로 변환한 선형결합을 통해 종속 변수인 임목축적(Y)을 추정하고자 하였다.

Table 3에 따라 모든 설명 가변수들의 선형결합으로

$$Y = \alpha + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2 + \beta_3 D_3 + \dots + \beta_{10} D_{10} + \varepsilon \quad (2)$$

이다. 여기서, Y는 임목축적, α는 상수항, D_i는 각 설명변

수 범주의 가변수이며, β_i는 D_i 각각의 parameter, ε은 오차항이다.

수량화 목적인 종속변수와 종속변수 추정치의 상관계수를 최대화하기 위하여 전통적인 선형모형론 틀에 맞추어 보면 수량화I방법의 해는 최소제곱법(least squares method)을 적용하여 얻을 수 있다. 이는 통계분석 프로그램의 General Linear Model solution을 통해 가변수로 변환하지 않고 parameter의 최소제곱추정치 쉽게 도출할 수 있다(Huh, 1998). 이로써 수량화I방법에 의한 1차 분석이 완료되었다고 볼 수 있으며, 이후는 다른 변수의 간섭을 배제한 1개 변수 자체의 설명력인 편상관(partial correlation)을 분석할 필요가 있다.

수량화I방법은 전통적인 선형모형과 외형상 일치하는 것은 틀림없다. 그러나 설명변수의 수량화에 관심을 두는 점에서 다양한 가설의 유의성 검정에 주안점을 두는 전통적인 선형모형과는 관점의 차이가 있다. 수량화I방법은 예측의 용도에 있어서 오차항의 분포성을 가정하지 않으면 예측의 정밀도에 대해 추론할 수가 없어, 오차항의 정규성 가정이 불가피하게 된다(Huh, 1998).

따라서 본 연구에서는 잔차도와 Kolmogorov-Smirnov 값을 이용하여 오차항의 이분산성(heteroscedasticity)과 정규성(normality)을 검정하고, 이상치 제거를 통해 예측의 정도를 높이고자 하였다.

결과 및 고찰

1. 임상도 제작 시기와 NFI 조사 시기의 임목축적 일치

식 1에 의해 국가산림자원조사 시의 임목축적을 다음과 같이 임상도 제작 당시의 축적으로 전환하였다(Table 4). 임상도 특성과의 일치되는 임목축적을 연계시키는 과정 상 전국적인 생장율 정보를 이용하기 때문에 지역에 따라

Table 3. Dummy variable coding by components of forest type map.

Forest type	Age class				DBH class				Crown density class				
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉	D ₁₀			
Coniferous forest	0	0	II	1	0	0	0	S(small)	1	0	L(Low)	1	0
Broadleaved forest	1	0	III	0	1	0	0	M(Medium)	0	1	M(Medium)	0	1
Mixed forest	0	1	IV	0	0	1	0	L(Large)	0	0	H(High)	0	0
-	-	-	V	0	0	0	1	-	-	-	-	-	-
-	-	-	VI	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-

Table 4. Growing stock converted into forest type map production period.

Site point	Forest type	Growing stock (NFI survey)	Converted growing stock	Remark
2764841	Coniferous forest	242.4	233.7	2010 → 2009
3284601	Broadleaved forest	152.0	163.4	2010 → 2012
3284161	Mixed forest	58.1	69.7	2007 → 2012
.....

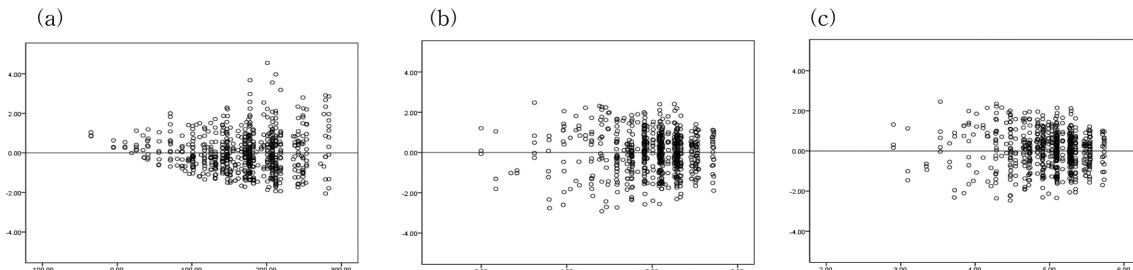


Figure 1. Residual plot of estimation model for growing stock.

또는 국소지형에 따라 결과의 불확실성이 존재할 수 있다. 또한 임상을 구분하지 않은 생장율이므로 오차를 감안하여야 할 것이다. 추후 임상별로 지역별 임목축적 생장율 정보 도출이 요구된다.

2. 임상도 특성별 임목축적 수량화 분석

1) 임상도 특성에 따른 임목추정식 도출

Figure 1(a)의 잔차도를 보면 오차항의 이분산성이 존재하고 있음을 나타내고 있다. 본 연구에서는 이러한 오차항의 이분산성을 제거하기 위해 일반적인 변수변환(variable transformation)을 이용하였다. 변수변환에 있어 설명변수, 종속변수 모두에 변환이 가능하다(Kwon, 2008). 본 연구에서는 설명변수가 질적 변수라는 특성상 종속변수의 변수변환 방법을 선택하고, 임상별 특성과 기존 임목축적 자료들의 특성을 고려하여 종속변수인 임목축적에 로그를 취한 변수변환(lnY)을 시도하였다. Figure 1(b)는 이분산성이 어느 정도 제거되었음을 보여 주고 있다.

이상치 진단여부는 일반적으로 표준화 잔차(standardized residual) ± 2 이상에서 판단되어진다(Kim and Kang, 2008; Kwon, 2008). 그러나 관찰된 잔차를 일괄적인 오차제곱평균의 제곱근으로 나누는 표준화 잔차에 비해, 각각의 관찰치 잔차의 실제 분산을 계산해 각 잔차를 표준화시킨 스튜던트화 잔차(studentized residual)를 이상치 판정에 유용하게 사용하고 있다(Kim and Kang, 2008). 따라서 본 연구에서는 스튜던트화 잔차를 이상치 진단여부의 판단 기준으로 삼고, 자료의 정규성과 선형성 가정을 만족시키고자 ± 2.5 이상으로 기준을 높여 모형을 유추하였다. Figure 1(c)는 이상치를 제거한 잔차도를 나타낸다. 설명력 크기에 큰 변화는 없으나, 본 연구의 예측 정도를 높이기 위해 이상치를 제거한 자료를 최종으로 하였다. 이에 최종 자료에 대해 Kolmogorov-Smirnov 검정을 실시한 결과 통계량 0.034(P-value 0.074 > 0.05)으로 오차항이 정규성을 따르고 있다. 수량화법에서 최대화하려 했던 상관계수는 결정계수(모형의 설명력)로 계산하였다. 최소화 대상인 오차항의 크기는 RMSE(Root Mean Square error)로 설명하였다(Huh, 1998). 모형의 설명력에 있어서도 변수

Table 5. Coefficient and root mean square error of model.

model	R ²	RMSE
Y	0.448	65.67
lnY	0.566	0.437
lnY (outlier elimination)	0.575	0.397

Table 6. Analysis of variance for model.

Source	DF	Mean square	F value	Pr>F
Model	10	13.766	87.459	.000
Intercept	1	6429.139	40845.519	.000
Forest type	2	8.782	55.796	.000
Age class	4	10.675	67.819	.000
DBH class	2	1.458	9.261	.000
Crown density class	2	19.608	124.573	.000

변환 전보다 변수변환 후의 설명력이 향상되었음을 알 수 있다. 변수변환 전후 값은 각각 44.8%, 57.5%로 설명력이 향상되었음을 나타내고 있으며, 오차항의 크기 또한 최종 모형에서 어느 정도 최소화되었다(Table 5). 변수변환 후 설명력은 향상되었으나, 그 설명력이 크게 높지 않은 이유는 임상도 특성과의 일치되는 임목축적을 연계시키는 과정 상 전국적인 생장율 정보를 이용하기 때문에 지역 또는 국소지형에 따라 결과의 불확실성이 존재할 수 있다. 또한 임상을 구분하지 않은 생장율을 적용함으로써 나타나는 오차가 있을 수 있으며, 특성의 분류를 통해 많은 정보력을 잃는 질적 변수의 한계로도 볼 수 있다. 모형의 설명력이 낮다 하더라도 가변수를 이용한 선형결합에 있어 모형의 적합도는 F 통계량으로 검증할 수 있으며, 설명변수의 선택에 있어 부분 F 통계량의 유의성을 보지만, 수량화법과 같은 탐색적 자료분석에서는 F의 절대적인 기준(1)으로 한다(Huh, 1998). Table 6에 따르면 선형 모형은 통계적으로 유의(p-value = 0.000 < 0.05)한 것으로 나타났으며, 설명변수들의 부분 F 통계량 값이 모두 유의하고, 절대적 기준인 1보다 모두 크므로, 설명변수들 모두 모형에 포함시켰다.

식 2를 이용한 임상도 특성별 최종 자료의 lnY모형은

Table 7. Parameter estimates by components of forest type map.

Model	Parameter	Estimate	Standard Error	t	pr>|t|	95%Confidence Interval		
						LL	UL	
lnY	Intercept	5.720	0.055	103.268	0.000	5.612	5.829	
	Forest type							
	Coniferous forest	0	.	.	.	.	.
	Broadleaved forest	-0.420	0.040	-10.535	0.000	-0.499	-0.342	
	Mixed forest	-0.248	0.043	-5.705	0.000	-0.333	-0.163	
	Age class							
	II	-1.318	0.096	-13.781	0.000	-1.506	-1.130	
	III	-0.529	0.060	-8.875	0.000	-0.646	-0.412	
	IV	-0.207	0.052	-3.956	0.000	-0.309	-0.104	
	V	-0.011	0.055	-0.198	0.843	-0.119	0.097	
	VI	0	.	.	.	.	.
	DBH class							
	S	-0.183	0.045	-4.037	0.000	-0.272	-0.094	
	M	-0.006	0.038	-0.160	0.873	-0.080	0.068	
	L	0	.	.	.	.	.
	Crown density class							
	L	-0.802	0.051	-15.777	0.000	-0.901	-0.702	
	M	-0.178	0.033	-5.355	0.000	-0.243	-0.112	
	H	0	.	.	.	.	.

Table 8. Partial correlation for components of forest type map.

Components	Forest type	Age class	DBH class	Crown density class
Partial correlation	0.093(=0.305 ²)	0.339(=0.582 ²)	0.043(=0.207 ²)	0.304(=0.552 ²)

비표준화계수(estimate)를 통해 선형적, 수량적인 의미를 나타낼 수 있다. 임목축적에 영향을 미치는 활엽수림은 침엽수림에 비해 0.420만큼 작고, 영급 II는 영급 VI에 비해 1.318만큼 작으며, 경급 ‘소’는 경급 ‘대’에 비해 0.183만큼 작고, 수관밀도 ‘소’는 수관밀도 ‘밀’보다 0.802만큼 작은 것으로 해석할 수 있다(Table 7).

$$\ln Y = 5.720 - 0.420D_1 - 0.248D_2 - 1.318D_3 - 0.529D_4 - 0.207D_5 - 0.011D_6 - 0.183D_7 - 0.006D_8 - 0.802D_9 - 0.178D_{10} \quad (3)$$

2) 임상도 특성별 편상관 분석

각 설명변수의 중요도를 비교 평가하는 지표로서 수량화 변수간 편상관도가 쓰인다(Huh, 1998). 편상관계수는 다른 설명변수의 효과를 제거한 후 한 설명변수와 종속변수의 상관관계를 나타낸 것이기 때문이다. 제곱 편상관계수의 크기를 비교해 보면 영급이 임목축적 수량화에 가장 크게 기여하는 것으로 나타났으며, 다음은 수관밀도, 임상, 경급의 순으로 임목축적 수량화에 기여하는 것으로 나타났다(Table 8).

3) 임상도 특성별 임목축적 추정표

임상도 특성별 임목축적의 추정 모형에 따라 추후 탄소 저장량을 측정하기 위해 임목축적을 환산한 결과 최소치는 활엽수림의 영급 II, 경급 ‘소’, 수관밀도 ‘소’인 분류기준에서 ha당 20.0 m³이고, 최대치는 침엽수림의 영급 VI, 경급 ‘대’, 수관밀도 ‘밀’인 분류기준에서 ha당 305.0 m³이며, 임상별로 침엽수림은 ha당 30.5~305.0 m³, 활엽수림은 ha당 23.8~238.1 m³, 혼효림은 ha당 20.0~200.4 m³로 추정되었다(Table 9). 식 3를 통해 임상별로 선형결합을 표현할 수 있다.

$$\ln \hat{Y}_{\text{Coniferous forest}} = 5.720 - 1.318D_3 - 0.529D_4 - 0.207D_5 - 0.011D_6 - 0.183D_7 - 0.006D_8 - 0.802D_9 - 0.178D_{10} \quad (4)$$

$$\ln \hat{Y}_{\text{Broadleaved forest}} = 5.300 - 1.318D_3 - 0.529D_4 - 0.207D_5 - 0.011D_6 - 0.183D_7 - 0.006D_8 - 0.802D_9 - 0.178D_{10} \quad (5)$$

$$\ln \hat{Y}_{\text{Mixed forest}} = 5.472 - 1.318D_3 - 0.529D_4 - 0.207D_5 - 0.011D_6 - 0.183D_7 - 0.006D_8 - 0.802D_9 - 0.178D_{10} \quad (6)$$

Table 9. Growing stock estimation by components of forest type map.
(unit : m³/ha)

Forest type	Age class	DBH class	Crown density class			
			L	M	H	
Coniferous forest	II	S	30.5	56.9	68.0	
		M	36.2	67.9	81.2	
		L	36.6	68.3	81.6	
	III	S	67.1	125.3	149.6	
		M	80.1	149.6	178.6	
		L	80.6	150.7	179.7	
	IV	S	92.6	173.0	206.6	
		M	110.6	206.6	246.6	
		L	111.3	207.7	248.1	
	V	S	112.6	210.2	251.2	
		M	134.5	251.1	300.0	
		L	135.4	252.6	301.7	
	VI	S	113.9	135.9	253.9	
		M	135.9	253.7	303.2	
		L	136.8	255.4	305.0	
	Broadleaved forest	II	S	20.0	37.4	44.7
			M	23.9	44.6	53.3
			L	24.1	44.9	53.6
III		S	44.1	82.3	98.3	
		M	52.6	98.2	117.3	
		L	52.9	98.9	118.0	
IV		S	60.9	113.6	135.7	
		M	72.7	135.6	162.0	
		L	73.1	136.4	163.0	
V		S	74.0	138.2	165.0	
		M	88.4	164.9	197.0	
		L	88.9	165.9	198.0	
VI		S	74.8	139.7	166.8	
		M	89.3	166.7	199.1	
		L	89.9	167.8	200.4	
Mixed forest		II	S	23.8	44.4	53.0
			M	28.4	53.0	63.4
			L	28.6	53.3	63.7
	III	S	52.4	97.8	116.8	
		M	62.5	116.7	139.4	
		L	62.9	117.4	140.2	
	IV	S	72.2	135.0	161.2	
		M	86.3	161.1	192.5	
		L	86.9	162.1	193.6	
	V	S	87.9	164.2	196.0	
		M	104.9	195.8	234.1	
		L	105.6	197.2	235.5	
	VI	S	88.9	165.3	198.1	
		M	106.1	198.1	236.5	
		L	106.8	199.3	238.1	

임목축적 수량화의 예로, 침엽수림이면서 영급 II, 경급 '대', 수관밀도 '중'인 특성의 경우 임목축적은 식 4를 적용하여,

Table 10. Carbon stock estimation by components of forest type map.
(unit : ton/ha)

Components	DBH class L, Crown density class H				
	II	III	IV	V	VI
Coniferous forest	34.3	75.5	104.3	126.8	128.2
Broadleaved forest	27.4	60.4	83.4	93.1	102.5
Mixed forest	30.0	65.9	91.0	110.7	112.0

$$\begin{aligned} \ln \hat{Y}_{\text{Coniferous forest}} &= 5.720 - 1.318(1) - 0.529(0) - 0.207(0) - 0.011(0) \\ &\quad - 0.183(0) - 0.006(0) \\ &\quad - 0.802(0) - 0.178(1) \\ &= 4.224 \\ \hat{Y}_{\text{Coniferous forest}} &= e^{4.224} = 68.3 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

활엽수림이면서 영급 V, 경급 '소', 수관밀도 '소'인 특성의 경우 임목축적은 식 5를 적용하여,

$$\begin{aligned} \ln \hat{Y}_{\text{Broadleaved forest}} &= 5.300 - 1.318(0) - 0.529(0) - 0.207(0) - 0.011(1) \\ &\quad - 0.183(1) - 0.006(0) \\ &\quad - 0.802(1) - 0.178(0) \\ \hat{Y}_{\text{Broadleaved forest}} &= 4.304 \\ &= e^{4.304} = 74.0 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

혼효림이면서 영급 VI, 경급 '중', 수관밀도 '밀'인 특성의 경우 임목축적은 식 6을 적용하여,

$$\begin{aligned} \ln \hat{Y}_{\text{Mixed forest}} &= 5.472 - 1.318(0) - 0.529(0) - 0.207(0) - 0.011(0) \\ &\quad - 0.183(0) - 0.006(1) \\ &\quad - 0.802(0) - 0.178(0) \\ \hat{Y}_{\text{Mixed forest}} &= 5.466 \\ &= e^{5.466} = 236.5 \text{ m}^3 \text{로 추정할 수 있다.} \end{aligned}$$

3. 임상도 특성별 탄소저장량 추정

1) 현장 적용성 검토

식 4-6의 선형결합을 적용한 특성별 임목축적을 추정된 결과와 Table 2의 탄소배출계수를 적용해 특정 현장의 탄소저장량을 추정하였다. 탄소저장량은 다음 식 7과 같이 구할 수 있다.

$$\text{탄소저장량} = V \times \text{BEF} \times \text{WD} \times (1+R) \times 0.5 \quad (7)$$

여기서, V는 재적(m³/ha), BEF는 바이오매스 확장계수, WD는 목재기본밀도, R은 뿌리함량비, 0.5는 탄소 전환인자를 나타낸다(IPCC, 2003).

임상별 탄소저장량은 임목축적의 임상별, 영급별 변화와 같은 경향을 보여 주었다(Table 10).

결 론

본 연구는 임상도 상의 특성별 임상, 영급, 경급 및 수관밀도를 이용하여 임목의 축적 및 탄소저장량을 추정하

고자 하였다. 이에 국가산림조사 시의 임목측적 자료를 임상도 제작 당시의 측적으로 전환하였으며, 이 자료와 질적 자료인 임상도 특성과의 관계를 수량화 I방법을 통하여 임목측적을 추정하였다. 임상도 특성을 이용하여 임목측적을 추정하는 최종 모형에서 결정계수 R^2 은 0.575이며, RMSE는 0.397이다. 임목측적 추정치 중 최소치는 활엽수림의 영급 II, 경급 '소', 수관밀도 '소'인 분류기준에서 ha당 20.0 m³이고, 최대치는 침엽수림의 영급 VI, 경급 '대', 수관밀도 '밀'인 분류기준에서 ha당 305.0 m³이었다. 편상관계수를 통한 임목측적에 영향을 미치는 특성으로 영급이 임목측적 수량화에 가장 크게 기여하며, 다음은 수관밀도, 임상, 경급의 순으로 기여도를 나타냈다. 그리고 추정된 특성별 임목측적 결과와 탄소배출계수를 적용해 해당 지역의 탄소저장량을 추정하였다.

현재 이용하고 있는 임상도는 해당 지역의 수확 가능한 임목 잔존량이 어느 정도 되는지, 기후변화를 완화할 수 있는 탄소흡수 및 저장량이 어느 정도 되는지 알 수가 없다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 본 분석 결과의 제공은 일선 산림경영자 및 행정가에게 산림경영 의사결정을 지원하는데 있어 다양한 측면에서의 도움을 줄 수 있을 것이다. 추후 항공사진 또는 위성영상을 이용하여 임상도의 한계를 극복하는 해결책을 찾는 방법이 강구될 수도 있을 것이다. 이러한 신기술의 적용도 신뢰성을 극대화하는 방향으로 기술 개발이 필요하며, 이용자들이 쉽게 접근할 수 있도록 방안을 모색하여야 할 것이다. 발전하는 디지털 기술의 고도화 방법과 아날로그가 절묘하게 조화되는 기술 개발을 기대해 본다.

References

- Cha, S.B., Kim, H.B., Oh, H.C., Yun, J.H., and Kim, W.K. 2012. Multivariate analysis. Baeksan Publishing. Seoul. pp. 470.
- Huh, M.H. 1998. Quantification methods I, II, III and IV – A Path to the Multivariate analysis of qualitative data. Freedom Academy. Seoul. pp. 111.
- Huh, M.H. 2006. Quantification methods for multivariate data. Freedom Academy. Seoul. pp. 124.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Kim, D.S. and Kang, N.J. 2008. Regression analysis. Nanam. Seoul. pp. 17-304.
- Kim, K.D. 1994. Forest measurement. Hyangmun. Seoul. pp. 76-85.
- Korea Forest Research Institute. 2012. Standard carbon removal of major forest species. Korea Forest Research Institute, briefing memo. pp. 18.
- Korea Forest Research Institute. 2013. Distribution of major species based on digital forest type map (1:5,000) in Korea.
- Korea Forest Service. 2012. Application standards for the average growth rate of stand volume by cities and provinces. Notification No. 2012-85.
- Korea Forest Service. 2013. The 5th National forest inventory.
- Kwon, S.H. 2008. Review of statistical softwares on regression analysis – SAS-SPSS. Freedom Academy. Seoul. pp. 50-88.
- Noh, H.J. 1990. Multivariate analysis - Quantification of qualitative data. Seok Jeong Press. Seoul. pp. 321.
- Noh, H.J. 2007. Categorical data analysis with SPSS. Hyosan. Seoul. pp. 11-117.

(2014년 4월 14일 접수; 2014년 7월 25일 채택)