

Landsat TM 영상과 현장조사를 이용한 잣나무림 재적 추정

박진우¹ · 이정수^{1*}

Stand Volume Estimation of Pinus Koraiensis Using Landsat TM and Forest Inventory

Jin-Woo PARK¹ · Jung-Soo LEE^{1*}

요 약

본 연구는 강원대학교 학술림을 대상으로 조사한 42개 표본점의 재적정보와 Landsat TM 영상으로 추출한 Remote Sensing(RS) 정보를 이용하여 잣나무임분의 재적을 추정하는 것을 목표로 한다. 실험 대상 학술림 잣나무림의 ha당 평균재적은 307.7m³/ha, 표준편차는 168.4m³/ha이며 산출된 잣나무림 재적을 등급화하였다. TM 영상에 3 by 3 majority filtering을 수행하기 전과 후에 각각 11개의 지수를 추출하였으며, 지수별 평균 화소 값을 이용하여 선형 회귀식 도출에 필요한 독립변수를 선정하였다. 11개의 지수는 6개의 DN(밴드값, 열감지밴드인 Band6을 제외), NDVI(정규식생지수), Band Ratio(BR1:Band4/Band3, BR2:Band5/Band4, BR3:Band7/Band4), Tasseled Cap-Greenness(TC G) 1개로 구성하였다. 그 결과, 필터링 전과 후 모두 NDVI와 TC G가 회귀식에 가장 적합한 지수로 선정되었으며, R²는 필터링 전과 후가 각각 0.736, 0.753로 모두 높았다. 또한, 정확도 비교를 위하여 오차검증을 실시한 결과, RMSE는 필터링 전과 후가 각각 약 69.1m³/ha, 약 67.5m³/ha으로 필터링 후가 낮았으며, bias는 각각 약 -12.8m³/ha, 약 9.7m³/ha으로 필터링 후의 편차가 적어 필터링을 실시한 회귀식이 적합한 모형으로 선정되었다. 필터링 후의 회귀식을 적용하여 추정된 임반별 재적은 총 재적이 약 160,947m³이며, 평균 재적은 약 315m³/ha로 실제 잣나무림의 재적보다 약 1.2배 높게 추정되었다.

주요어 : Landsat TM, 잣나무, 재적추정, 회귀식, 정규식생지수, 밴드비, Tasseled Cap

ABSTRACT

The objective of this research is to estimate the stand volume of Pinus koraiensis, by using the investigated volume and the information of remote sensing(RS), in the research forest of Kangwon National University. The average volume of the research

2013년 8월 25일 접수 Received on August 25, 2013 / 2014년 2월 3일 수정 Revised on February 3, 2014 / 2014년 3월 12일 심사완료 Accepted on March 12, 2014

¹ 강원대학교 산림경영학과 Department of Forest Management, Kangwon National University

* Corresponding Author E-mail : jslee72@kangwon.ac.kr

forest per hectare was 307.7m³/ha and standard deviation was 168.4m³/ha. Before and after carrying out 3 by 3 majority filtering on TM image, eleven indices were extracted each time. Independent variables needed for linear regression equation were selected using mean pixel values by indices. The number of indices were eleven: six Bands(except for thermal Band), NDVI, Band Ratio(BR1:Band4/Band3, BR2:Band5/Band4, BR3:Band7/Band4), Tasseled Cap-Greenness. As a result, NDVI and TC G were chosen as the most suitable indices for regression before and after filtering, and R-squared was high: 0.736 before filtering, 0.753 after filtering. As a result of error verification for an exact comparison, RMSE before and after filtering was about 69.1m³/ha, 67.5m³/ha, respectively, and bias was -12.8m³/ha, 9.7m³/ha, respectively. Therefore, the regression conducted with filtering was selected as an appropriate model because of low RMSE and bias. The estimated stand volume applying the regression was 160,758m³, and the average volume was 314m³/ha. This estimation was 1.2 times higher than the actual stand volume of Pinus koraiensis.

KEYWORDS : Landsat TM, Pinus Koraiensis, Volume Estimation, Regression Equation, NDVI, Band Ratio, Tasseled Cap

서론

산림경영의 목적은 경제원칙에 따라 양질의 목재를 지속적으로 생산하여 산림의 경제적·공익적 기능을 발휘 시키는 것이다(Park *et al.*, 1990). 산림경영의 목적 달성과 효율적인 산림계획 수립을 위해서는 현재 산림축적과 관련된 통계정보의 구축이 필요하다(Jeon, 2008). 우리나라는 전체 산림의 약 40.5%가 침엽수림으로 구성되어 있으며, 특히 잣나무는 녹화사업의 주요조림수종으로 우리나라 침엽수 조림면적의 약 18%를 차지한다(Korea Forest Service, 2013). 또한, 30년생의 잣나무 한 그루는 연간 약 12.2kg의 이산화탄소를 흡수하여 침엽수 중 두 번째로 높게 평가됨에 따라, 잣나무는 기후변화 대응 온실가스 통계구축을 위하여 지속적인 모니터링이 필요한 수종이다(Korea Forest Research Institute, 2013). 그러나 산림의 축적을 파악하기 위하여 매년 모든 산림을 조사하는 것은 경제적·시간적으로 매우 어려운 일이며, 통계정보와 현장조사

만으로 산림을 평가하는 것은 한계가 있다(Son *et al.*, 2007). 따라서 현장 조사를 통해 제공 받지 못한 정보는 다양한 추정 기법을 통하여 얻는 것이 일반적이며, 최근 원격탐사 기술의 발달로 인하여 위성영상을 이용한 산림과 같은 대면적과 접근이 용이하지 않은 지역에 대한 정보를 얻는 방법이 널리 이용되고 있다(Chung *et al.*, 2009).

위성영상을 활용한 산림의 통계량을 추정하는 다양한 방법이 연구되고 있으며, 산림재적을 추정하는 방법은 회귀식이나 최근린기법 등이 이용되고 있다(Yim *et al.*, 2009; Powell *et al.*, 2010; kim *et al.*, 2011). Oza *et al.*(1996)은 밴드와 밴드비 지수를 통해 다중 회귀모형을 제작하여 열대림 재적을 추정하였으며, Trotter *et al.*(1997)과 Yim *et al.*(2007)은 최근린기법과 회귀모형을 적용하여 산림의 자원량을 추정하는 연구를 진행하였다. 또한, Park *et al.*(2012)은 크리깅 기법을 이용하여 단양군의 산림자원량을 추정하였다. 그러나 국가와 행정구역 단위의 대면적을 대상으로 산림의 자원량을 추정하는 연구와 기법은

다양하게 이루어지는 반면, 위성영상을 활용한 산림경영기본 단위인 임반단위의 소면적에 대한 산림 자원량을 추정하는 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 위성영상에서 다양한 식생지수와 밴드비 지수, 분광값을 추출하고 현장조사 자료를 활용한 학술림 잣나무지역의 회귀모형을 도출하고 재적추정을 목적으로 한다.

연구자료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 강원도 홍천군과 춘천시에 위치한 강원대학교 학술림을 대상으로 하였다(그림 1). 면적은 약 3,147ha로 총 33개 임반과 158개 소반, 1,419개 보조소반으로 이루어져 있으며, 경위도는 북위 37°46' ~ 37°51', 동경 127°48' ~ 127°52' 사이에 위치한다. 임황은 침엽수와 활엽수의 비율이 각각 26%와 73%로 대부분이 활엽수이며, 그중 잣나무 인공림은 약 511ha로 전체면적의 약 17%를 차지하고 있다. 한편 ha당 재적은 211m³으로 전국 평균의 약 2배에 해당되며, 잣나무림의 ha당 재적은 261 m³이다. 영급별 분포는 VI영급 지역이 전체 면적의 약 37%를 구성하고 있으며, V영급이상 임상이 전체 면적의 약 86%로 노령림을 이루고 있다. 특히 낙엽송, 소나무, 잣나무 임상의 경우, VIII영급 임상이 약 360.7ha로 높게 분포하고 있다. 지황은 대룡산을 정점으로 남쪽으로는 응봉, 연엽산, 구절산으로 이어져 있으며, 임지의 평균경사는 약 20°~ 25°, 평균표고는 약 500m이다. 기후는 온대대륙성 기후로서 여름에는 고온다습하고 겨울에는 저온 건조하다. 평균기온은 여름이 21℃ 겨울이 -4℃, 연평균기온은 약 10℃이며, 연평균 강수량은 약 1,300 mm이다(The Research Forest at Kangwon National University, 2010).

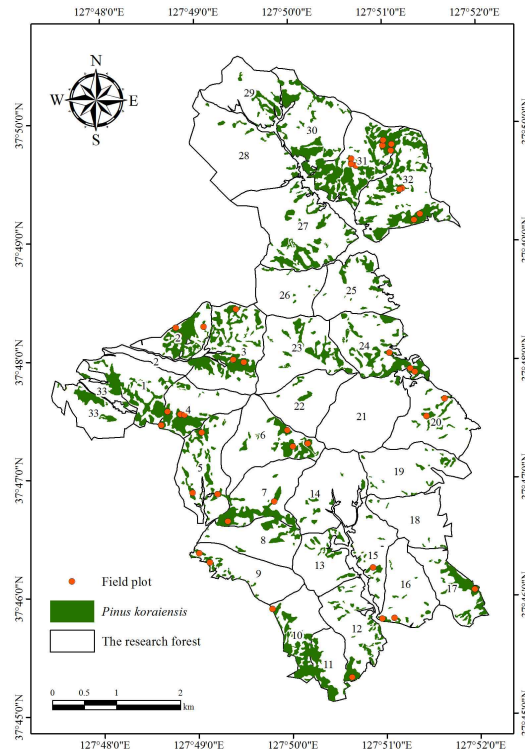


FIGURE 1. Location of study area

2. 연구자료

본 연구에 사용된 GIS 자료는 학술림 임상도와 임소반도, 임도망도를 사용하였으며, 위성영상은 2009년 5월 25일 촬영된 Landsat TM(row 115/path 34)을 사용하였다. Landsat TM 영상은 1984년 3월 발사된 중해상도 위성으로 탐지면적 185km, 촬영주기 16일, 7개의 밴드로 구성된다. 본 연구에 사용된 밴드값은 6번 열적외선 밴드를 제외한 6개 밴드의 화소값 DN(Digital Number)을 이용하였다(Jensen, 2005).

현장조사는 강원대학교 학술림 잣나무림에 대한 현장답사를 통해 66개의 후보지중 최종 42개의 표본점을 조사하였으며, 조사 시기는 2012년 4월 27일~5월 20일이다. 20m×20m 크기의 사각형 표본점내 흉고직경 6cm이상 모든 잣나무 임목을 대상으로 수종, 흉고직경, 수

고, 본수를 기록하였다. 흉고직경은 윤척, 수고는 Vertex 3.0을 사용하여 측정하였다. 또한, 위치정보는 GPS장비를 이용하여 표본점 중심의 경위도 정보를 취득하였다.

3. 연구방법

본 연구는 총 4단계로 구성되었다. 첫째, 42개의 현장조사 표본점에 대한 재적 데이터를 등간격으로 계층화하였다. 둘째, 위성영상에 전처리 과정과 공간 필터링을 실시하여 영상변환지수를 산출하였다. 셋째, 현장조사 자료와 영상변환지수를 이용하여 선형회귀식을 하였으며, RMSE와 bias의 오차검증을 통하여 최적의 재적 추정식을 도출하였다. 마지막으로 임상도의 잣나무 임분을 추출하여 임분별 평균 영상 변환지수를 산출하고, 선정된 재적 추정식에 적용하여 학술림 잣나무 임분의 재적을 임반단위로

추정하였다(그림 2).

1) 현장조사를 이용한 재적산출

임목재적은 현장조사를 통하여 취득한 흉고 직경과 수고 정보를 잣나무 수간재적표(Korea Foret Service, 2009)에 적용하여 산출하였고, ArcGIS 9.3을 이용해서 GIS DB로 구축하였다. Fransson *et al.*(2004)의 연구에서 표본점 수를 기준으로 3단계 계층화하였는데, 본 연구는 재적 산출 후 재적증량표 및 임분수확표의 ha당 간재적량을 기준으로 100m²미만 범위부터 500m² 초과의 범위까지 50m²의 단위로 등급화 하였다.

2) 위성영상 전처리

위성영상 취득 시 지구와 위성의 상대적 운동, 센서 특성 등 다양한 원인으로 인해 영상의 공간적 왜곡이 발생하여 영상이 지표의 실제

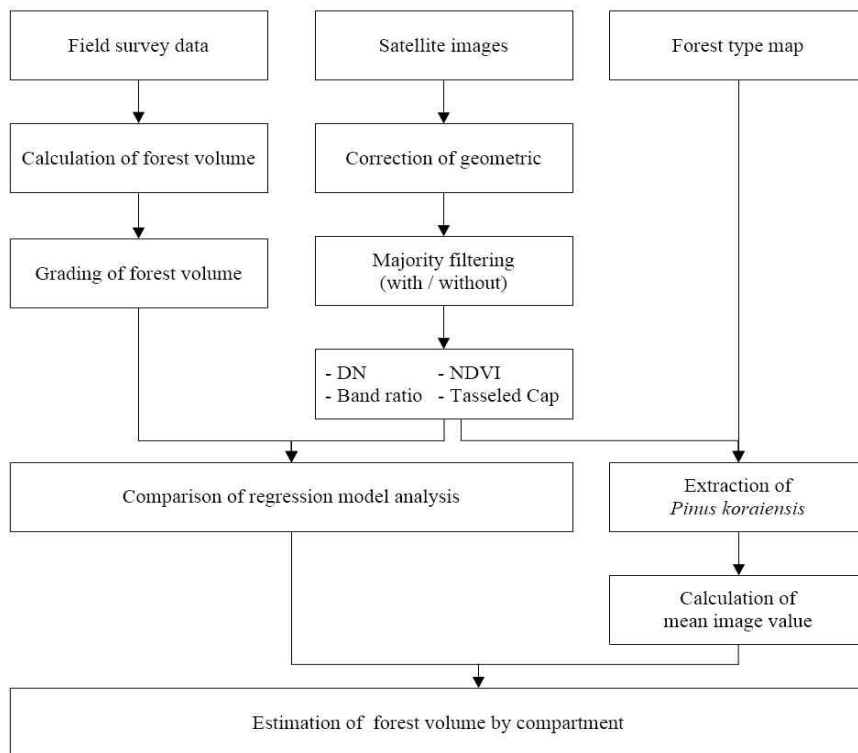


FIGURE 2. Schematic methodology for estimating forest volume by compartment

공간 분포와 일치하지 않는 기하학적 오차 보정이 필요하다(Lillesand *et al.*, 1994). 본 연구에서는 수치지형도, 도로망도를 이용하여 지상기준점(Ground Control Point, GCP)을 선정하였으며, Nearest-Neighbor(NN)법으로 동경 127°, Traverse Mercator(TM)로 보정하였다. 또한, Landsat TM영상은 공간해상도가 30m로 혼합화소(mixel)에 의한 오차의 가능성이 높기 때문에 filtering을 실시하였다. filtering은 격자형태의 커널을 이용해 중앙에 위치한 픽셀의 값을 주변 화소 값의 평균값이나 중앙값으로 변화시키는 방법이다. 그러나 단순한 filtering은 원 화소 값이 변형되어 상이한 결과가 발생한다(Park, 1996). 본 연구에서 filtering은 주변 화소 값 중 가장 높은 빈도를 차지하는 값을 중앙값으로 대처하는 3 by 3 Majority filtering을 실시하였다.

3) 위성영상을 이용한 지수변환

전처리 과정과 공간 필터링을 실시한 위성영상은 11개(TM Band 1-5, 7, BandRatio 1-3, NDVI, TC G)의 영상변환지수를 사용하여, 결정계수가 가장 높은 지수를 선정하였다. NDVI는 Rouse *et al.*(1974)에 의하여 개발된 지수로서 식생의 성장과 식생상태에 대한 계절적 변화나 연간 변화를 모니터링 할 수 있다. 또한, Tasseled Cap은 Crist and Cicone(1984)에 의하여 개발된 지수로 도시지역 식별에 유리한 토양명도(brightness)와 생물량이 클 수록 더 밝은 색을 띠는 녹색식생(greenness), 수분함량이 많을수록 밝은 색을 띠는 습윤지수(wetness) 3가지로 변환되는 방법으로 본 연구에서는 식생지역식별에 용이한 녹색식생지수를 사용하였다. 한편, 밴드비는 원격탐사자료의 비율변환으로서 환경조건들의 효과를 줄여줄 뿐만 아니라 산림의 성장모니터링, 습지식생도, 식물의 생산량 및 생육현상 진단 등 식생의 지표로 많이 활용되고 있다(Kwon *et al.*, 2003). 따라서 Yim *et al.*(2009)이 임상에 따른 재적 추정에 사용했던 3가지의 밴드를 사용하였다.

4) 현장조사와 위성영상을 이용한 회귀식 산출 및 검증

회귀모형 기법은 독립변수를 위성영상의 분광 값과 그 밖의 지수로 선정한 뒤, 종속변수인 재적과의 회귀식을 도출한 후, 독립변수간의 유사성을 통해 미조사지점의 재적을 추정하는 방법이다. 각 등급의 재적을 종속변수로 설정하고, 영상변환으로 취득된 11개의 변수들을 독립변수로 하는 선형회귀분석을 실시하여 예측모형을 구축하였다. 선형회귀분석을 통하여 가장 좋은 영상변환지수를 선정하고, 필터링 전과 후 예측모형의 추정오차(RMSE)와 편차(Bias)를 식 (1), 식 (2)와 같이 산출하여 비교하였다(Franco-Lopez *et al.*, 2001; Yim *et al.*, 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$\text{편차(bias)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (2)$$

y_i = 표본점의 재적 측정치

\hat{y}_i = 회귀모델을 통한 재적 추정치

n = 표본점의 개수

결과 및 고찰

1. 현장조사를 이용한 표본점정보 분석

현장조사 표본점의 평균 흉고직경은 16.3cm~45.4cm의 분포로 평균 28.4cm이며, 평균수고는 8.2m~26.1m의 분포로 평균 15.7m로 분석되었다. 임분밀도는 평균 742본으로 국립산림과학원에서 발표한 잣나무 생산목표별 시업체계의 본수와 비교하여 약 1.8배 높았다(Korea Forest Research Institute, 2012). ha당 평균재적은 약 90m³/ha~970m³/ha의 분포로 평균 약 307.7m³/ha으로 전국의 잣나무림 축적보다 약 3.8배 높았다.

현장조사된 표본점의 정보를 상관분석한 결

TABLE 1. Correlation between the selected survey data

	Age class	Mean DBH	Mean height	Stand density	Volume (m ³ /ha)
Age class	1				
Mean DBH	0.85	1			
Mean height	0.75	0.80	1		
Stand density	-0.54	-0.70	-0.56	1	
Volume(m ³ /ha)	0.76	0.83	0.83	-0.32	1

과, 임분밀도를 제외한 모든 조사인자의 상관관계가 약 0.75이상으로 높았으며, 임령과 평균직경의 관계가 $R=0.85$ 로 가장 높았다. 또한, ha당 재적과의 상관관계는 평균수고와 평균직경이 약 $R=0.83$ 으로 Jang *et al.*(2004)이 강원대학교 학술림의 잣나무림을 대상으로 임령과 평균직경, 평균수고와 평균직경과의 상관관계가 각각 0.9, 0.8로 유사하였다(표 1).

2. 재적과 위성영상을 이용한 회귀식 산출

Landsat TM 영상을 이용한 11개 인자와 표본점의 재적을 활용하여 다중회귀분석을 실시하였으며, 다중 공선성과 유의성 검사, Durbin-Watson값에 의하여 이상치로 나타난 인자는 제외하였다. 다중회귀 분석을 통하여 필터링 전과 후 모두 NDVI와 TC G인자를 이용한 회귀식이 도출되었다. 인자간의 다중 공선성은 필터링 전과 후가 각각 4.77, 4.53으로 10이하로 낮게 나타났으며, 유의성 검증은 필터링 전과 후가 각각 0.002, 0.001로 모형이 적합한 것으로 나타났다. 또한, 잔차에 대한 상관관계를 나타내는 Durbin-Watson값은 필터링 전과 후가 각각 2.061, 2.179로 2에 가까워 잔차들간의 상관관계가 없어 회귀모형이 적합하다고 판단되었다.

회귀모형에 의한 재적과 인자간의 상관관계는 필터링 전과 후가 각각 0.814, 0.824로 모

두 높은 상관관계를 보였으며, 결정계수는 필터링 전과 후가 각각 $R^2=0.736$, $R^2=0.753$ 으로 필터링을 실시한 회귀모형이 약 0.017 높았다. 회귀모형은 필터링 후가 필터링 전보다 상관관계와 결정계수가 모두 높았다(표 2).

3. 측정치와 추정치를 이용한 오차검증

ha당 재적의 Field Survey(FS) 재적과 회귀모형에 의한 Remote Sensing(RS) 재적을 비교한 결과, 필터링 전은 320m³/ha로 과대 추정된 반면 필터링 후는 298m³/ha로 과소 추정되었다. RMSE는 필터링 전과 후가 각각 69.1m³/ha, 67.5m³/ha으로 필터링 후의 RS재적이 필터링 전보다 1.6m³/ha 낮았다. 또한, bias는 필터링 전과 후가 각각 -12.8m³/ha, 9.7m³/ha으로 필터링 후의 RS재적이 약 3m³/ha낮아 필터링 후의 회귀 모형이 적합한 것으로 선정되었다(표 3). 한편, Yim *et al.*(2009)은 위성영상을 이용한 산림바이오매스 추정연구에서 회귀모형에 의한 최적의 RMSE는 63.8ton/ha로 이를 재적으로 환산하면 97.8m³/ha로 본 연구가 30.2m³/ha 낮았다. 이것은 본 연구가 잣나무림만을 대상으로 평가하여 전체산림을 침엽수, 활엽수, 혼효림으로 평가한 기존의 연구보다 향상된 결과를 보인 것으로 판단된다.

FS재적과 RS재적을 구간별로 분석한 결과, 100m³/ha 이하의 구간을 제외한 모든 구간에서

TABLE 2. Comparison of regression models by varying filtering method

Filtering method	Regression model	R^2
No filtering	$V= 1752.254 - 590.640 \times NDVI - 27.042 \times TC G$	0.736
Filtering	$V= 759.147 + 2089.452 \times NDVI - 37.860 \times TC G$	0.753

TABLE 3. Comparison of RMSE and bias estimated from the two different filtering methods of regression models
Unit : (m³/ha)

		Forest volume	RMSE	Bias
Field survey data		307.7	—	—
Regression model	No filtering	320.5	69.1	-12.8
	Filtering	298.1	67.5	9.6

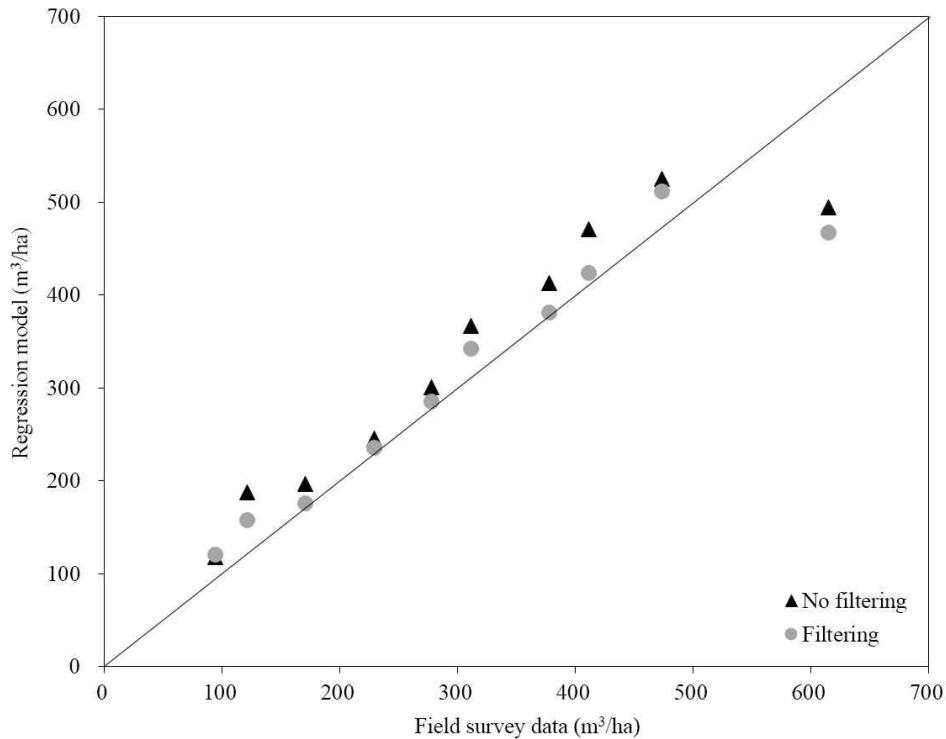


FIGURE 3. Relation between the two forest volume estimated method

필터링을 실시하지 않은 RS재적이 높았다. 또한, 200~250m³/ha구간은 FS재적과 RS재적의 차이가 필터링 전과 후에 따라 각각 16m³/ha, 6m³/ha으로 가장 낮았으며, 100~150m³/ha 구간은 FS와 RS의 재적차이가 필터링 전과 후에 따라 각각 66m³/ha, 37m³/ha으로 가장 높았다. 한편, 500m³/ha 이하의 구간에서는 RS재적이 과대추정 된 반면, 500m³/ha 이상의 구간은 FS 재적보다 RS재적이 약 20% 과소추정 되었다(그림 3). Flanklin(1986)에 의하면 수관 밀도가 매우 높은 지역은 영상의 분광값과 상관이

낮다고 보고되고 있으며, 본 연구도 이에 따라 500m³/ha이상의 재적에서 추정치의 오차가 발생된 것으로 판단된다.

4. 영상지수를 이용한 임반단위의 잣나무림 재적 추정

필터링을 실시한 회귀모형을 이용하여 학술림 잣나무림 지역에 대한 재적을 임반단위로 추정한 결과, 총 재적은 약 161천m³이며, ha당 평균 재적은 약 315m³/ha으로 실제 학술림의

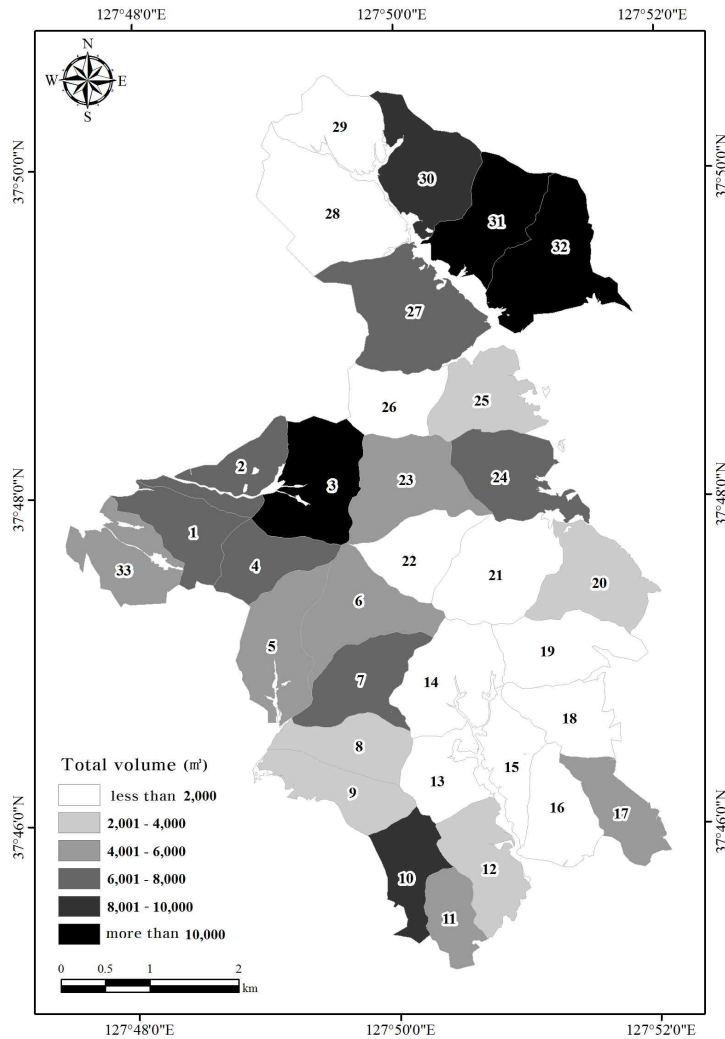


FIGURE 4. The distribution of *Pinus koraiensis* volume by compartment

잣나무림보다 약 1.2배 높게 과대추정 되었다. 이는 잣나무림의 분포가 활엽수림 내 작은 면적으로 분포하거나 밀집되지 않은 형태의 분포를 가지고 있어 영상의 주변 화소값에 의한 변형으로 인하여 재적값이 과대추정된 것으로 판단된다.

그림 4는 임반별 재적을 이용하여 지도로 구축한 것이다. 임반별 재적은 31임반이 약 19천 m³으로 ha당 재적은 약 382m³/ha으로 가장 높

았으며, 다음으로 32임반이 약 16천m³으로 높았다. 31, 32임반은 학술림 장재티 지역으로 8영급 이상의 잣나무가 다수 분포하고 있으며, 임분상태가 양호하고 현장조사 결과도 가장 높은 값을 나타낸 임반이다. 반면, 18임반과 26임반은 총 재적량이 약 30m³ 미만으로, ha당 재적도 매우 낮았다. 실제 두 임반은 현장조사 결과에서 영급이 3영급이하 였으며, 잣나무림의 면적이 가장 낮아 재적 추정치가 낮은 것으로

판단된다(그림 4).

결론

본 연구는 강원대학교 학술림을 대상으로 조사한 현장조사 자료와 Landsat TM 위성영상의 분광특성을 이용해 회귀모델 도출 후 최적의 회귀식을 통한 잣나무 임분의 재적을 추정하고 주제도 작성을 통한 산림의 통계량 산출을 하고자 하였다. 영상의 오차를 줄이기 위하여 Majority filtering을 실시하였으며, 현장조사에 의한 재적과 위성영상을 이용한 재적의 추정치를 비교하기 위하여 추정치의 오차(RMSE)와 편차(bias)를 이용하여 필터링 전과 후의 회귀모형을 비교하였다. 필터링을 실시한 회귀모형의 RMSE는 67.5m³/ha, bias는 9.7m³/ha로 필터링을 실시하지 않은 회귀모형보다 낮게 나타나 필터링 후의 회귀모형이 적합한 것으로 선정되었다. 필터링 후의 회귀모형을 이용하여 임반단위로 재적을 산출하고 주제도를 작성하였다. 임반단위의 총재적은 약 160,947 m³로 실제 학술림 잣나무림의 재적보다 약 1.2배 과대추정 되었다.

본 연구에서는 산림의 재적을 추정하는 방법으로 회귀모형을 이용한 방법을 제안하였으며, 정보의 취득이 용이한 Landsat TM영상을 이용한 임반단위의 소면적에 대한 산림 자원량 추정이 가능하였다. 특히, 경사가 급하고 지형이 복잡한 산림지역의 자원량 파악이 가능하였으며, 국가차원 뿐만 아니라, 지역별 소면적에 대한 추정을 통하여 산림경영 목적에 맞는 정확한 정보 제공이 가능할 것으로 생각된다.

KAGIS

REFERENCES

- Chung, S.Y., J.S. Yim, H.K. Cho, J.H. Jeong, S.H. Kim and M.Y. Shin. 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 (정상영, 임종수, 조현국, 정진현, 김성호, 신만용. 2009. 산림바이오매스 변환표와 위성영상을 이용한 무주군의 산림바이오매스 추정. *한국임학회지* 98(4):409-416).
- Crist, E.P. and R.C. Cicone. 1984. A physically-based transformation of thematic mapper data -the TM tasseled cap. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* GE-22(3):256-263.
- Franco-Lopez, H., A. R. Ek, and M. E. Bauer. 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77(3):251-274.
- Franklin, J. 1986. Thematic Mapper analysis of coniferous structure and composition. *International Journal of Remote Sensing* 7(10):1287-1301.
- Fransson, J.E., M. Magnusson and J. Holmgren. 2004. Estimation of forest stem volume using optical SPOT-5 satellite and laser data in combination. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol 4, pp.2318-2322.
- Jang, J.Y., H.J. Shin and J.C. Woo. 2004. A study on the stand structure analysis by the changing growth in Korean white pine stand. *Journal of Forest Science* 20(1):58-68 (장재영, 신현지, 우종춘. 2004. 잣나무 임분의 성장 변화에 따른 임분구조 해석에 관한 연구 - 강원대학교 학술림을 중심으로 -. *강원대학교 산림과학연구* 20(1):58-68).

- Jensen, R.J. 2005. Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective(3rd Edition). Sigma Press, Seoul, Korea. pp.338-352 (임정호, 박중화, 손홍규 옮김. 2005 원격탐사와 디지털영상처리(제3판). 시그마프레스. 338-352쪽).
- Jeon. E.J. 2008. A study on the estimation of growth rates and amounts of volume stocks by forest type and species in Korea. Master Thesis, Univ. of Kookmin, Seoul, Korea. pp.1-3 (전어진. 2008. 우리나라 산림의 임상별·수종별 재적생장량 및 재적성장률 추정에 관한 연구. 국민대학교 대학원 석사학위논문. 1-3쪽).
- Kim, K.M., J.B. Lee, E.S. Kim, H.J. Park, Y.H. Roh, S.H. Lee, K.H. Park and H.S. Shin. 2011. Overview of research trends in estimation of forest carbon stocks based on remote sensing and GIS. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 14(3):236-256 (김경민 이정빈, 김은숙, 박현주, 노영희, 이승호, 박기호, 신휴석. 2011. 원격탐사와 GIS 기반의 산림탄소저장량 추정에 관한 주요국 연구동향 개관. 한국지리정보학회지 14(3):236-256).
- Korea Forest Research Institute. 2012. Forestry Technology Handbook. pp.1480-1482 (국립산림과학원. 2012. 임업기술핸드북. 1480-1482쪽).
- Korea Forest Research Institute. 2013. Standard Carbon Uptake of Major Tree Species. pp.1-3 (국립산림과학원. 2013. 주요산림수종의 표준 탄소흡수량. 1-3쪽).
- Korea Forest Service. 2009. Table of Volume · Weight and Forest Stand Yield. pp.6-7 (산림청. 2009. 재적·중량표 및 임분수확표. 6-7쪽).
- Korea Forest Service. 2013. Statistical Yearbook of Forestry. pp.222-224 (산림청. 2013. 임업통계연보. 222-224쪽).
- Kwon, B.K., K. Yamada, T. Niren and M.H. Jo. 2003. A study on the landcover classification using band ratioing data of landsat-TM. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 6(2):80-91 (권봉겸 山田淳, 仁連孝紹, 조명희. 2003. Landsat-TM의 밴드비 연산데이터를 이용한 토지피복분류에 관한 연구. 한국지리정보학회지 6(2):80-91).
- Lillesand, T.M., R.W. Kiefer and J.W. Chipman. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley, N.Y. pp.368-375.
- Oza, M.P., V.K. Srivastave and P.K. Devaiah. 1996. Estimating tree volume in tropical dry deciduous forest from landsat TM data. Geocarto international 11(4):33-39.
- Park, B.U. 1996. Land cover classification techniques for large area using digital satellite data. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography 14(1):39-47 (박병욱. 1996. 수치위성자료를 이용한 광역의 토지피복분류 기법. 한국측량학회지 14(1):39-47).
- 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, 박

- 기호. 2012. 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림탄소저장량 추정-지상부 바이오매스를 대상으로-. 한국지리정보학회지 15(1):16-33).
- Park, T.S. 1990. Foresty. Hyangmun Press. Seoul. Korea. pp.46-47 (박태식. 1990. 임업경영학. 향문사. 46-47쪽).
- Powell, S.L., W.B. Cohen, S.P. Healey, R.E. Kennedy, G.G. Moisen, K.B. Pierce and J.L. Ohmann. 2010. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data : a comparison of empirical modeling approaches. Remote Sensing of Environment 114: 1053-1068.
- Rouse, J.W., R.H. Hass, J.A. Schell and D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. Proceedings of 3rd Earth Resource Technology Satellite Symposium. pp.48-62.
- Son, Y.M., K.H. Lee and R.H. Kim. 2007. Estimation of forest biomass in Korea. Journal of Korean Forest Society 96(4):477-482 (손영모, 이경학, 김래현. 2007. 우리나라 산림 바이오매스 추정. 한국임학회지 96(4):477-482).
- The Research Forest at Kangwon National University. 2010. The research forest at Kangwon National University 7th management plan report. Kangwon National University press. Chuncheon. Korea. pp.12-20 (강원대학교 산림환경과 학대학 부속 학술림. 2010. 강원대학교 산림 환경과학대학 부속 학술림 경영계획구 제7차기 경영계획서. 강원대학교 출판부. 12-20쪽).
- Yim, J.S., G.S. Kong, S.H. Kim and M.Y. Shin. 2007. Forest thematic maps and forest statistics using the k-nearest neighbor technique for Pyeongchang-gun, Gangwon-do. Journal of Korean Forest Society 96(3):259-268 (임종수, 공지수, 김성호, 신만용. 2007. k-NN기법을 이용한 강원도 평창군의 산림 주제도 작성과 산림통계량 추정. 한국임학회지 96(3): 259-268).
- 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 국가산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정. 대한원격탐사학회지 25(4):311-320). **KACIS**