

Landsat TM 영상을 이용한 교목연령 추정에 영향을 주는 영상 밴드 및 식생지수에 관한 연구

이정빈 · 허 준[†] · 손홍규

연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부

Study on Correlation Between Timber Age, Image Bands and Vegetation Indices for Timber Age Estimation Using Landsat TM Image

Jung-Bin Lee, Joon Heo[†], and Hong-Gyoo Sohn

School of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, Yonsei University

Abstract : This study presents a correlation between timber Age, image bands and vegetation indices for timber age estimation. Basically, this study used Landsat TM images of three difference years (1994, 1994, 1998) and difference between Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and National Elevation Dataset (NED). Bands of 4, 5 and 7, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Infrared Index (II), Vegetation Condition Index (VCI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) were obtained from Landsat TM images. Tasseled cap - greenness and wetness images were also made by Tasseled cap transformation. Finally, analysis of correlation between timber age, difference between Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and National Elevation Dataset (NED), individual TM bands (4, 5, 7), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Tasseled cap - Greenness, Wetness, Infrared Index (II), Vegetation Condition Index (VCI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) using regression model. In this study about 1,992 datasets were analyzed. The Tasseled cap - Wetness, Infrared Index (II) and Vegetation Condition Index (VCI) showed close correlation for timber age estimation.

Key Words : Landsat TM, SRTM, NED, Vegetation Index, Regression, Timber Age.

요약 : 본 논문은 Landsat TM 영상을 활용하여 교목연령 추정과 이와 관련이 있는 영상의 밴드값과 식생지수에 대한 상관관계 연구를 수행하였다. 기본적으로 본 연구에서는 취득시기가 다른 Landsat TM 영상(1990, 1994, 1998년)과 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)과 National Elevation Dataset (NED) 영상의 차분영상이 사용되었으며 밴드 4, 5, 7 영상, 태슬모자형 변환을 통한 녹색식생지수, 토양수분지수 영상, 정규식생지수 (NDVI), 적외선지수 (II), 식생상태지수 (VCI), 토양보정식생지수 (SAVI) 영상은 Landsat TM 영상에서 추출되었다. 각각의 영상에서 추출된 값인 총 1992개 자료를 회귀분석을 통하여 분석하였고 연구 결과 교목연령을 추정하는데 있어서 가장 높은 결정계수(R^2)값을 보이는 요소로는 태슬모자형 변환 토양수분지수, 적외선지수 (II), 식생상태지수 (VCI) 영상이며 이들 값이 교목연령을 추정하는데 가장 많은 영향이 있음을 알 수 있다.

1. 서론

최근에는 원격탐사를 활용한 식생에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 이는 많은 이점을 가지고 있다. 예를 들어 산림지역의 교목연령을 추정함에 있어서 원격탐사 자료를 활용함으로써 현장조사에 소비되는 인력과 시간 등을 절약할 수 있으며 그에 따른 많은 비용의 소모도 막을 수 있다.

본 논문에서는 원격탐사를 활용한 식생분석에 관한 연구 중 산림지역의 교목연령을 추정함에 있어서 가장 영향력 있는 식생지수를 회귀분석 모델을 통하여 결정하는 방법을 연구하였다. 유사한 연구사례들이 많이 발표되었으며 특히, SRTM과 NED의 차이를 이용한 산림자료 분석에 관한 연구(Heo *et al.*, 2006)에서 제시한 SRTM과 NED의 차이는 교목연령 추정에 영향력이 있는 요소이며 본 논문에서도 교목연령과 함께 가장 영향력 있는 요소로 판단하여 연구를 진행하였다. 또한 Landsat ETM+ 영상을 이용한 교목연령과 밀도 추정에 관한 연구(Sivanpillai *et al.*, 2006), 위성영상을 통한 교목연령 추정에 관한 연구(Heo *et al.*, 2006), 대상지역의 생물량 탐사를 위한 위성영상, 산림 조사 자료, 식생지수의 융합에 관한 연구(Zheng *et al.*, 2007) 등이 발표 되었다.

본 논문에서 사용된 영상 및 자료는 미국의 테네시 지역 Landsat TM 영상과 같은 지역의 SRTM 영상, NED 영상, 산림 조사 자료가 사용되었다. Landsat TM 영상은 시기가 다른 세장의 영상이 사용되었는데 각각 1990, 1994, 1998년의 영상이며 획득 시기는 9~10월의 영상이다. 식생지수 영상은 Landsat TM 영

상의 영상처리를 통하여 각각의 밴드를 추출하고 밴드 연산에 따른 여러 가지 식생지수를 나타내는 영상을 추출하였다. 이렇게 추출된 영상자료와 산림 조사 자료를 회귀분석을 통하여 결정계수(R²)값과 추정치의 표준오차(SEE)를 비교하였으며 교목연령을 추정하는데 가장 많은 영향을 주는 요소를 결정하였다.

2. 대상지역 및 연구절차

1) 대상지역

본 논문의 대상지역은 미국의 테네시 지역으로서 영상 취득시기가 다른 세 장의 1990년, 1994년, 1998년의 9~10월 Landsat TM 영상이 사용되었다. 테네시 지역의 산림 분포 특성을 보면 활엽수의 분포가 전체 산림지역의 74% 정도를 나타내며 소나무종은 4% 미만이 분포하고 있다. 이중에서 하나의 회사에 의해 균일하게 관리되어 온 산업화된 인공조림 지역(industrialized timber plantation)을 연구대상지역으로 선정하였다. 각 영상의 취득시기와 좌표계, 좌표정보는 다음의 Table 1과 같으며 Fig. 1은 대상지역 Landsat TM 영상이다.

Table 1. Details of satellite data used

영상 센서	촬영 일시	좌표계	좌표정보
Landsat TM	1990-09-16	UTM Zone16 WGS84	좌측상단 (521721,4097416.5) 우측하단 (744705,3884720.1)
	1994-09-11		
	1998-10-24		

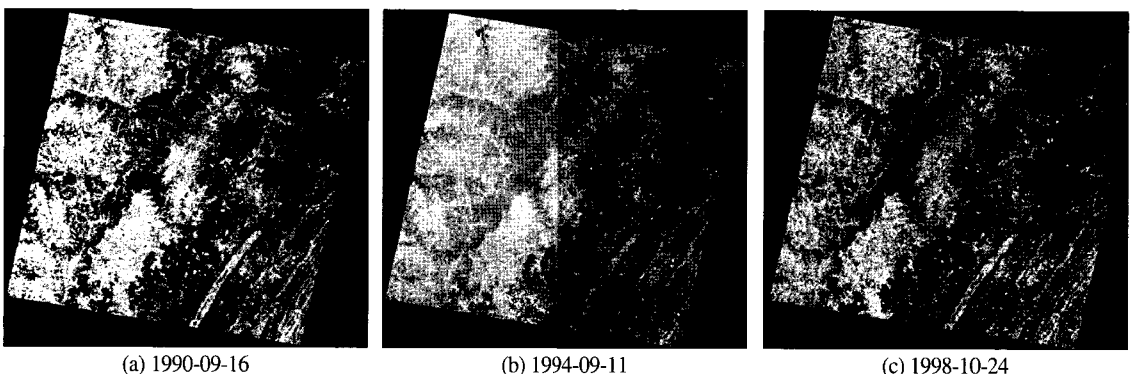


Fig. 1. Landsat TM image of Tennessee.

2) 연구절차

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 시기가 다른 세 장의 Landsat TM 영상에서 밴드 4, 5, 7 영상을 추출하고 정규식생지수(NDVI) 영상과 태슬모자형 변환을 통하여 얻은 녹색식생지수와 토양수분지수 영상, 적외선지수(II), 식생상태지수(VCI), 토양보정식생지수(SAVI) 영상을 생성하게 된다. Table 2는 이들 영상 생성을 위해 사용된 계산식을 나타낸다. 원영상과 생성된 식생지수 영상은 UTM Zone16 /WGS84 좌표계로 통일하였으며 산림 조사 자료도 좌표계를 통일시킴으로서 중첩을 통한 분석이 가능하게 하였다.

통계적인 분석을 위하여 대상지역의 산림 조사 자료

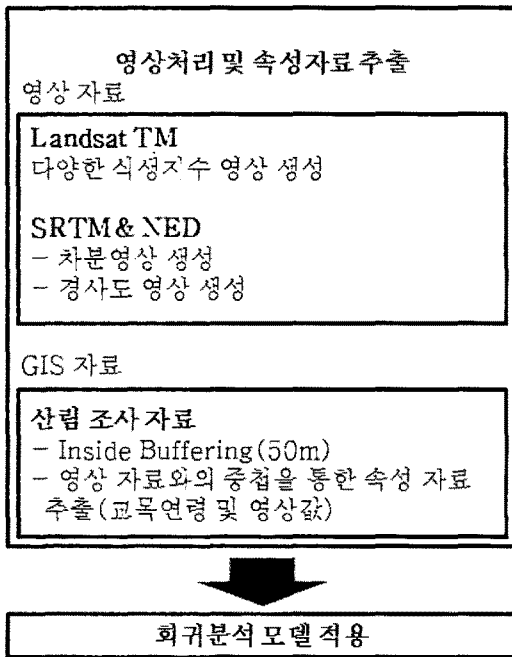


Fig. 2. Paradigm for satellite data processing and GIS analysis.

와 Landsat TM 영상에서 추출된 영상밴드, 식생지수 영상, SRTM과 NED 차분영상의 중첩을 통하여 영상의 통계적 평균값을 산림 조사 자료에 입력하게 된다. 이렇게 통합된 자료에서 분석에 필요한 교목연령, 및 생성된 영상값을 추출하게 된다(Fig. 2).

3. 영상처리

1) 밴드 4, 5, 7

Landsat TM 영상에서 밴드 4, 5, 7 영상을 각각 추출하였다. 다음의 Fig. 3은 Landsat TM 영상에서 추출

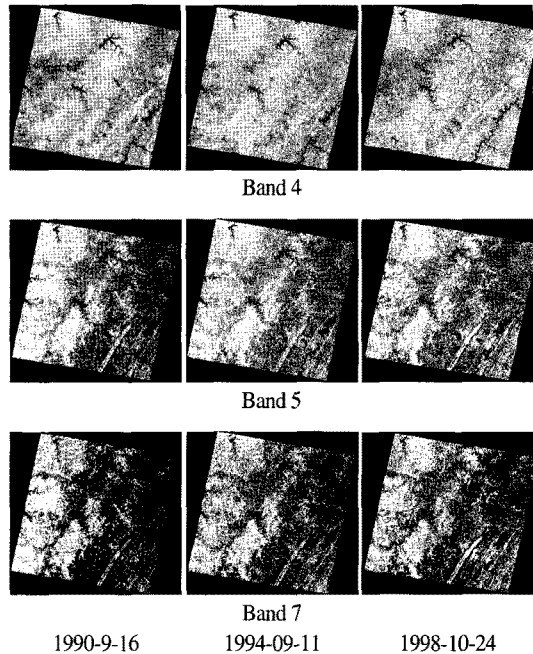


Fig. 3. Individual bands of 4, 5 and 7 of TM data for different periods.

Table 2. Various indices prepared in the study and their formulae

분 류	식
밴드4, 5, 7	TM4, TM5, TM7
태슬모자형 변환 녹색식생지수	$G = -0.2728TM1 - 0.2174TM2 - 0.5508TM3 + 0.7221TM4 + 0.0733TM5 - 0.1648TM7$
태슬모자형 변환 토양수분지수	$W = 0.1446TM1 + 0.1761TM2 + 0.3322TM3 + 0.3396TM4 - 0.6210TM5 - 0.4186TM7$
정규식생 지수	$(TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$
적외선 지수	$(TM4 - TM5) / (TM4 + TM5)$
식생상태 지수	$(TM4 - TM7) / (TM4 + TM7)$
토양보정 식생지수	$((1+L)(\rho_{nir} - \rho_{pred})) / (\rho_{nir} + \rho_{pred} + L)$

된 영상을 보여준다. 각각 다른 세 시기의 대상지역의 Landsat TM 영상에 대하여 차례로 추출된 밴드 4, 5, 7 영상을 나타낸다.

2) National Elevation Dataset (NED)

미국의 USGS에서 무료로 제공되며 연구에 사용된 영상은 미국의 테네시 지역이며 해상도는 30m×30m이다. 다음은 Fig. 4는 NED 영상과 NED 영상에서 변환된 경사도 영상을 보여준다. 원영상에서 Landsat TM 영상과 같은 좌표계인 UTM, Zone16/WGS 84로 변환하였고 본 연구에서는 NED 영상은 대상지역의 경사도를 추출하고 SRTM과 NED의 차분영상을 생성하는데 사용하였다.

3) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

NED와 마찬가지로 미국의 USGS에서 무료로 제공된다. 연구에 사용된 영상은 미국의 테네시 지역이며 해상도는 30m×30m이다. 다음은 Fig. 4에서 SRTM 영상과 생성된 SRTM과 NED의 차분영상을 보여준다. 원영상에서 Landsat TM 영상과 같은 좌표계인 UTM,

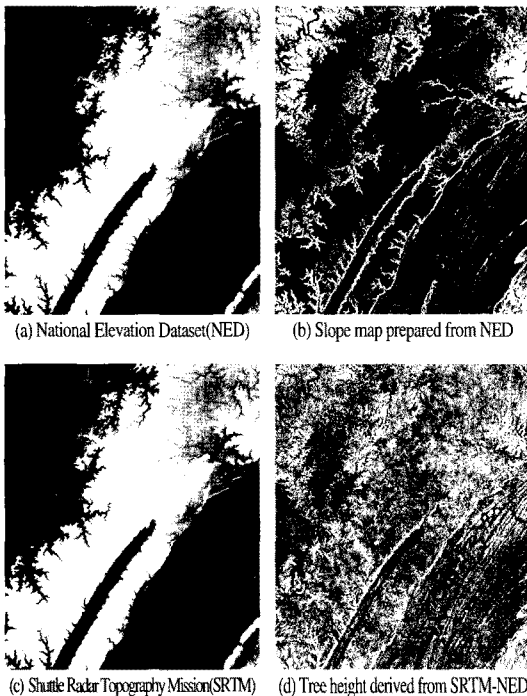


Fig. 4. Topography of Tennessee area.

Zone16/WGS 84로 변환하여 사용하였다.

4) 정규식생지수 (NDVI)

Table 2에 주어진 식을 이용하여 변환할 수 있으며 정규식생지수 (NDVI)를 통하여 식생의 성장과 식생상태에 대한 계절적 변화나 연간변화 등을 파악할 수 있다. 다음의 Fig. 5는 변환된 정규식생지수 (NDVI)영상을 보여준다.

5) 태슬모자형 변환

본 연구에서는 태슬모자형 변환 녹색식생지수와 토양수분지수 영상은 Table 2에 주어진 변환식을 사용하였다. 태슬모자형 변환 녹색식생지수 영상은 대상지역의 생물량이 클수록 더 밝은 화소 값을 나타내며 태슬모자형 변환 토양수분지수 영상은 수분의 함량이 많을수록 밝은 값을 나타낸다. 생성된 태슬모자형 변환 녹색식생지수와 토양수분지수 영상 다음의 Fig. 6과 같다.

6) 적외선 지수 (II)

적외선 지수 영상은 Table 2에 주어진 식을 이용하여

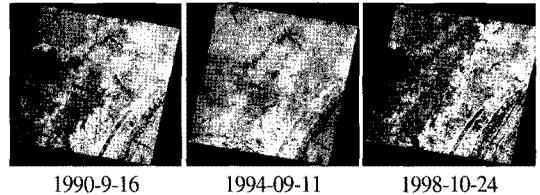


Fig. 5. Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) image of Tennessee area for three different periods.

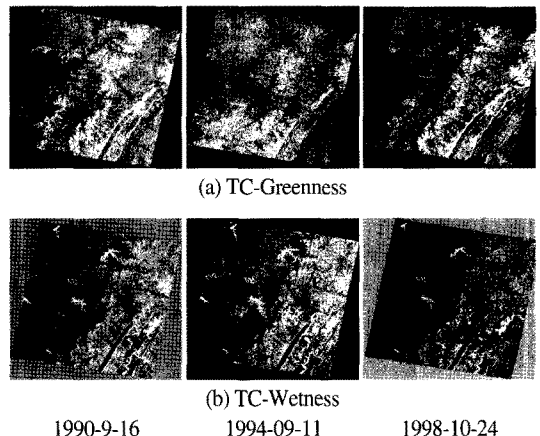


Fig. 6. Tasseled cap(TC) transformation.

변환할 수 있으며 정규식생지수 (NDVI)보다 식물의 생물량이나 수분스트레스의 변화에 더 민감한 것으로 알려져 있다(Hardisky *et al.*, 1983). 적외선지수 (II) 영상은 다음의 Fig. 7과 같다.

7) 식생상태지수 (VCI)

식생상태지수는 식생상태를 측정할 수 있다(Kogan, 1995). Table 2에 주어진 식을 이용하여 변환할 수 있으며 식생상태지수 (VCI) 영상은 다음의 Fig. 8과 같다.

8) 토양보정식생지수 (SAVI)

토양보정식생지수는 Table 2에 주어진 식을 이용하여 변환할 수 있으며 식에 주어진 L은 토양보정인자로 본 논문에서는 0.5를 사용하였다. L이 0.5일 때 토양명도 변화가 최소가 되고 다른 토양에 대한 추가적인 보정이 필요없다고 알려져 있다(Huete and Liu, 1994). 토양보정식생지수 (SAVI)영상은 다음의 Fig. 9와 같다.

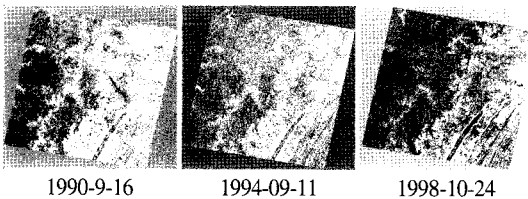


Fig. 7. Infrared Index(II) image of Tennessee area for three different periods.

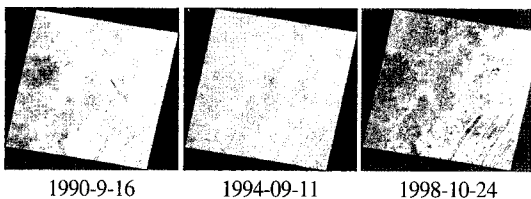


Fig. 8. Vegetation Condition Index(VCI) image of Tennessee area for three different periods.

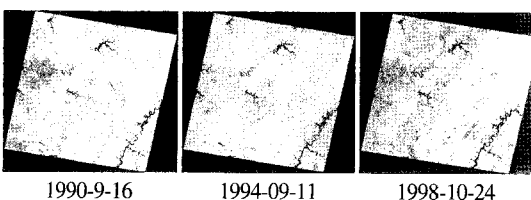


Fig. 9. Soil Adjusted Vegetation Index(SAVI) image of Tennessee area for three different periods.

4. 회귀분석

회귀분석은 관련된 변수들 간의 상호 관련성을 찾고 싶을 때 사용되며 이러한 변수들 간의 함수관계를 추구하고자 하는 통계적 방법이며 한 개의 독립 및 종속 변수간의 선형관계에 관한 분석을 말한다(박성현, 2003).

산림 조사 자료를 통하여 취득한 교목연령이 종속변수가 되며 밴드 4, 5, 7, 정규식생지수 (NDVI), 태슬모자형 변환 녹색식생지수와 토양수분지수, 적외선지수 (II), 식생상태지수 (VCI), 토양보정식생지수(SAVI), SRTM과 NED의 차분 영상이 독립변수가 된다. SRTM과 NED의 차분영상은 교목연령의 추정에서 가장 중요한 요소로 가정하고 밴드 4, 5, 7 및 식생지수영상과 함께 다중회귀분석을 적용하였을 때의 추정되는 교목연령과의 상관관계 값을 분석하기 위하여 독립변수로 설정하였다.

회귀분석을 통하여 계산된 결정계수(R^2)와 추정치의 표준오차(SEE)를 확인하여 SRTM과 NED 차분영상과 함께 밴드 4, 5, 7, 정규식생지수 (NDVI), 태슬모자형 변환 녹색식생지수와 토양수분지수, 적외선지수 (II), 식생상태지수 (VCI), 토양보정식생지수 (SAVI) 영상이 교



Fig. 10. Paradigm for regression model.

Table 3. Number of ground truth data and its proportion based on slope and acreage

No.	경사도	자료수	No.	면적구분 (Acre)	자료수
1	0~5	344 (17.3%)	1	0~5	417 (20.9%)
2	5~7	391 (19.6%)	2	5~15	541 (27.2%)
3	7~9	364 (18.3%)	3	15~30	347 (17.4%)
4	9~12	404 (20.3%)	4	30~60	319 (16.0%)
5	12~	489 (24.5%)	5	60~	368 (18.5%)
계		1992 (100%)	계		1992 (100%)

목연령 추정에 각각 어느 정도의 상관관계를 가지고 있는지를 계산하게 된다. Fig. 10은 본 연구의 회귀분석 모델을 나타낸다.

본 논문에서 회귀분석 모델을 적용하기 위하여 사용한 자료는 총 1992개이며 사용된 자료의 범위는 1980년부터 2001년까지의 자료이다.

경사도 범위가 달라짐에 따라 회귀분석의 결과 값의 차이를 확인하기 위하여 회귀분석을 시행하기 전 해당 지역의 1992개 자료를 자료 수에 기준하여 경사도 구분

을 두고 회귀분석을 시행하였다. 면적도 경사도와 마찬가지로 면적의 범위가 달라짐에 따라 회귀분석의 결과의 차이를 확인하기 위하여 자료 수에 기준하여 임의의 간격으로 구분하였다.

자료의 구분 기준은 각각의 경사도와 면적 구분마다 비슷한 수의 자료를 이용하여 분석을 실시할 수 있도록 구분하였다. 자료의 수는 전체 1992개 자료에 대한 비율로 볼 때 하나의 구분에 약 16%~27%까지의 비율을 보인다. 이렇게 구분한 경사도 및 면적의 범위는 다음의 Table 3과 같으며 경사도와 면적에 따라 회귀분석을 시행한 결과 값인 결정계수(R²)와 추정치의 표준오차(SEE)는 다음의 Table 4와 Table 5에 정리하였다.

예를 들어 Table 4의 첫 번째 경우 중 NDVI 결과를 보면 전체 자료에서 경사도 0~5도를 나타내는 지역의 344개 자료를 활용하여 종속변수는 교목연령이 되고 독립변수로 1990, 1994, 1998년의 정규식생지수 (NDVI) 영상값이 모두 사용되었고 SRTM과 NED의 차분영상 값도 독립변수로 사용되었다. 이와 같은 방법으로 경사도와 면적 범위 구분에 따른 각각의 식생지수 값이 교목연령과 어느 정도의 상관관계를 보이는지에 대한 회귀분석 결과를 도출할 수 있었다.

Table 4. Results of regression analysis between slope and other variables

테네시 NO.	경사도	NDVI		TC2		TC3		Band4		Band5		Band7		II		VCI		SAVI	
		R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE
1	0~5	0.719	2.822	0.644	3.175	0.825	2.228	0.430	4.017	0.822	2.242	0.780	2.499	0.827	2.216	0.803	2.362	0.718	2.824
2	5~7	0.696	3.023	0.635	3.315	0.786	2.538	0.505	3.861	0.766	2.655	0.736	2.816	0.791	2.508	0.766	2.656	0.696	3.024
3	7~9	0.741	2.965	0.672	3.338	0.828	2.420	0.556	3.888	0.824	2.444	0.794	2.646	0.829	2.408	0.804	2.584	0.741	2.968
4	9~12	0.739	3.145	0.658	3.600	0.837	2.489	0.523	4.255	0.820	2.612	0.796	2.783	0.842	2.448	0.824	2.583	0.739	3.147
5	12~	0.709	3.252	0.589	3.866	0.808	2.642	0.425	4.570	0.771	2.884	0.763	2.931	0.824	2.530	0.806	2.656	0.708	3.256

* 종속변수: 교목연령, 독립변수: 해당 경사도 범위에 따른 1990, 1994, 1998년의 영상밴드 및 식생지수 영상값, SRTM-NED 차분값

Table 5. Results of regression analysis between acre range and other variables

테네시 NO.	면적	NDVI		TC2		TC3		Band4		Band5		Band7		II		VCI		SAVI	
		R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE	R ²	SEE
1	0~5	0.587	3.742	0.488	4.166	0.716	3.099	0.319	4.805	0.713	3.119	0.667	3.358	0.720	3.079	0.691	3.234	0.586	3.745
2	5~15	0.711	3.087	0.617	3.554	0.817	2.457	0.428	4.343	0.786	2.657	0.754	2.849	0.827	2.387	0.804	2.544	0.710	3.090
3	15~30	0.765	3.022	0.696	3.437	0.831	2.558	0.544	4.208	0.808	2.728	0.794	2.829	0.844	2.463	0.830	2.568	0.764	3.024
4	30~60	0.789	2.672	0.713	3.120	0.862	2.163	0.587	3.744	0.849	2.263	0.835	2.365	0.867	2.121	0.850	2.259	0.789	2.675
5	60~	0.809	2.360	0.757	2.662	0.877	1.897	0.652	3.187	0.865	1.986	0.850	2.090	0.882	1.855	0.865	1.982	0.809	2.360

* 종속변수: 교목연령, 독립변수: 해당 면적 범위에 따른 1990, 1994, 1998년의 영상밴드 및 식생지수 영상값, SRTM-NED 차분값

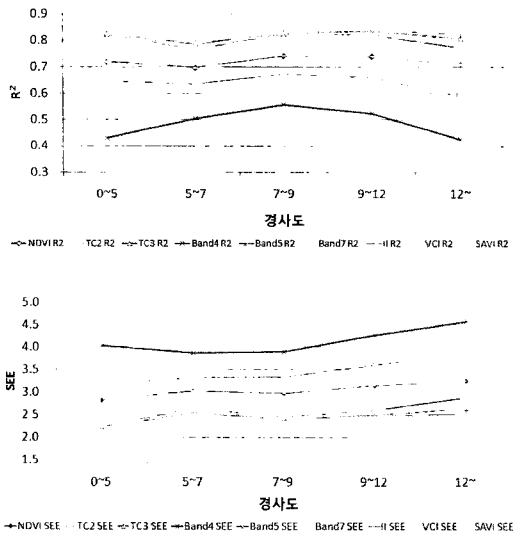


Fig. 11. Results of regression analysis between slope and other variables

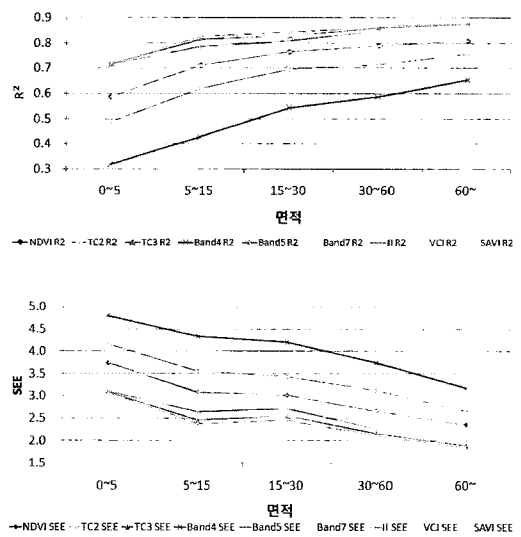


Fig. 12. Results of regression analysis between acre range and other variables

5. 결과분석

자료 수에 기준한 일정한 경사 구분에 대한 회귀분석 결과를 보면 가장 높은 결정계수(R^2)를 보이는 구간은 경사도 9~12도 구간이며 가장 높은 결정계수(R^2)값을 보이는 식생지수는 적외선지수(II)로 9~12도 구간에서 0.842를 나타내었다. 두 번째는 태슬모자형 변환 토양수분지수이며 0.836을 나타내었고 세 번째로 식생상태지수(VCI)가 0.824를 보였다. 이들 세 가지 변수들은 경사도의 변화에 따라 계산 값들의 많은 변동을 보이지 않았다.

면적의 경우에도 경사도의 구분과 마찬가지로 자료 수에 기준하여 구분을 하였으며 가장 높은 결정계수(R^2)을 보이는 식생지수도 적외선지수(II), 태슬모자형 변환 토양수분지수, 식생상태지수(VCI)임을 보여주었다. 결과 값은 60 acre 이상인 지역에서 가장 높게 나타났으며 각각 0.882, 0.877, 0.865를 보였다. 면적구분은 경사도 구분과는 다르게 0~5 acre 지역을 제외한 모든 지역에서 좋은 결과를 보여주고 있다. 위에서 나타난 연구 결과를 살펴보면 면적증가에 따른 결정계수(R^2)의 증가를 볼 수 있으며 경사 증가에 따른 결정계수의 차이는 거의 나타나지 않았다. 경사의 변화보다 면적의 크기가 넓어질수록 결정계수(R^2) 증가에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 표준오차값을 살펴보면 경사도 구분에 따른

분석에서 정규식생지수 (NDVI), 태슬모자형 변환 녹색식생지수, 밴드 4, 토양보정식생지수 (SAVI)의 분석에서 3이상의 표준오차가 많이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 이상치 분석을 통하여 추정된 직선 방정식에서 관계가 먼 값들의 제거를 통하여 해결할 수 있다. 면적에 따른 분석에서는 0~5 acre 구간에서는 모든 식생지수가 3이상의 표준오차값을 보였다. 신뢰할만한 결과를 얻기 위하여 기준의 되는 면적의 설정이 필요하다. 다음의 Fig. 11과 Fig. 12는 경사와 면적의 각각 계산된 결과의 그래프를 보여준다.

6. 결론

본 논문은 교목연령 추정에 영향을 주는 위성영상의 밴드 값과 밴드 연산을 이용하여 추출한 식생지수간의 연관성과 이들의 활용에 대한 연구이다. 회귀분석 결과 교목연령 추정에 가장 많은 영향을 미치는 식생지수로 적외선지수(II), 태슬모자형 변환 토양수분지수, 식생상태지수(VCI)임을 보였으며 이에 대한 결과로 높은 결정계수(R^2)값을 가지는 이들 식생지수를 이용하는 것이 교목연령 추정에 가장 효율적임을 알 수 있다.

향후 연구가 더 진행되어야 할 부분으로 본 논문에서 분석을 진행한 대상지역 이외의 다른 지역에도 적외선

지수 (II), 태슬모자형 변환 토양수분지수, 식생상태지수 (VCI)가 우세한 결과가 나타나는지에 대한 검증이 필요할 것이며 다른 지역에서도 우세한 결과를 보인다면 이들 식생지수를 이용한 다중회귀분석을 통하여 교목연령 추정 연구의 활용 가능성에 대한 연구도 또한 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 박성현, 2003. 회귀분석, 민영사.
- Hardisky, M. A., V. Klemas, and R. M. Smart, 1983. The Influence of Soil salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Radiance of *Spartina Alterniflora* Canopies, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 49(1): 77-83.
- Heo, J., J. H. Kim, J. S. Park, and H. G. Sohn, 2006. Timber age verification using historical satellite image analysis, *Forest ecology and management*, 236: 315-323.
- Heo, J., J. W. Kim, S. Pattnaik, and H. G. Sohn, 2006. Quality improvement of loblolly pine (*pinus taeda*) plantation inventory GIS using shuttle radar topography mission (SRTM) and the national elevation dataset (NED), *Forest ecology and management*, 233: 61-68.
- Huete, A. R. and H. Q. Liu, 1994. An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric and Soil Correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4): 897-905.
- Jensen, J. R., 2004. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 3rd ed.: Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Kogan F. N., 1995. Drought of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar orbiting satellite data, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76: 655-668.
- Sivanpillai, R., Charles T. Smith, R. Srinivasan, Michael G. Messina, and X. Ben Wu, 2006. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data, *Forest Ecology and Management*, 223: 247-254.
- Zheng, G., J. M. Chen, Q. J. Tian, W. M. Ju, and X. Q. Xia, 2007. Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping, *Journal of Environmental Management*, 85: 616-623.