

덕유산 국립공원 산림식생구조의 지형적 영향 분석

김태근 · 노 일 · 정종철 · 조영환¹ · 오장근*

(국립공원관리공단, ¹목포대학교 조경학과)

Analysis the Impact of Topographic Factors on the Structure of Forest Vegetation in Deogyusan National Park. Kim, Tae-Geun, Il Noh, Jong-Chul Jeong, Young-Hwan Cho¹ and Jang-Geun Oh* (Korea National Park Service, 8th FL 144 Mapodae-ro (Taeyoung Bldg, Gondeok-dong) Mapo-gu, Seoul 121-717, Korea; ¹Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea)

The purpose of this study was to analyze the topographic effect of the LAI (Leaf Area Index), which has been widely used as an index that quantifies the structure of forest vegetation in Deogyusan National Park. With this aim, the study was conducted through a regression analysis which took as explanation the following variables: the elevation, slope, aspect, and soil moisture conditions. The LAI was taken as the response variable. Overall, the correlation between the Field-LAI and topographic factors was less than 0.5, which was relatively low. Except for topographic altitude, there was no statistical significance regarding the correlation with other factors. Meanwhile, regarding the orientation of the correlation, the higher the attitude, the steeper slope, the lower the soil moist, the lower the LAI value. The topographic altitude was found as a statistically significant explanation variable. The TWI (Topographic Wetness Index), which was used in this study to explain the soil moisture conditions, was not significantly related to the LAI distribution. The results of this study are expected to be utilized as basic data in more accurate forecasting the LAI distribution using remote sensing data.

Key words : Leaf Area Index, topographic factors, National Park

서 론

지구 온난화 현상과 더불어 급격한 기후변화가 진행됨에 따라 생물다양성에 대한 위협은 국가적인 관심사로 대두되고 있다. IPCC (2007)에 따르면 범 지구온도가 1.5~2.5°C 상승할 경우 동식물의 20~30%가 멸종하고 지리적 분포 범위가 크게 변할 것으로 보인다.

최근 국립공원관리공단의 보도한 자료에서 기후변화에 따른 신갈나무의 개엽시기도 빨라지고 있다고 하였다 (National Park Research Institute, 2012a). 기후변화에 따른 식생의 구조와 분포 변화는 생물다양성에도 커다란 영향을 미칠 것으로 판단된다 (Kim *et al.*, 2009).

국립공원에서 식생구조와 분포의 변화를 주기적으로 관찰하는 것은 생물다양성 보전 및 증진에 있어서 매우 중요한 요소이다. 그러나 전국에 산재되어 있는 국립공원

* Corresponding author: Tel: +82-2-3279-2871, Fax: +82-2-3279-2804, E-mail: jgohh@hanmail.net

의 지리·지형적 특성상 광범위한 지역에서 식생의 구조와 분포 변화를 직접적으로 관찰하는 것은 인력 및 시간적 비용이 많이 소요된다. 이에 원격탐사를 이용하여 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)를 측정하는 방법이 효율적으로 적용될 수 있다(Lee *et al.*, 2003).

산림특성에 있어서 식생의 구성요소 중 잎은 지표면과 대기, 기후의 상호작용인 에너지균형, 수분 및 탄소의 순환 매개체로서 매우 중요한 역할을 한다. 이는 단위 지표면적당 잎의 면적의 비율로 정의된 LAI로서 정량화할 수 있고 산림환경에서 일어나는 광합성, 증발산, 산림생산성 등과 같은 생물학적·물리학적 과정을 정량적으로 분석하는 데 있어서 중요한 기초변수 중 하나이다(Bonan, 1993).

지형의 기복이 심한 산악지역에 위치한 국립공원에서 보다 효율적으로 위성영상자료를 활용하여 광역적인 규모의 산림지역에서 LAI를 정확하게 추정하기 위해서는 지형요소에 대한 영향을 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 덕유산국립공원의 산림지역을 대상으로 하여 식생의 구조를 정량화하는 지수로 널리 이용되고 있는 LAI를 중심으로 지형적인 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해서 식생의 분포와 구조에 영향을 주는 해발고도, 지형경사, 사면향, 그리고 토양 수분조건과 LAI의 관계를 살펴보고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구지역 및 방법

덕유산 국립공원의 면적은 229.43 km²에 달하며 행정구역상 경남 2개군(거창군, 함양군), 전북 무주군에 해당된다(National Park Research Institute, 2012b). 산림지역의 공간적 분포 형태나 면적을 살펴보기 위해 환경부에서 제공하는 중분류 체계의 토지피복도에서 토지유형별 분포현황을 추출한 결과, 산림지역은 총면적 218.2 km²로 덕유산국립공원의 전체 면적 중 약 96%를 차지하고 있다. 산림유형별 활엽수림은 산림 총면적 중 67.2%, 침엽수림은 13.5%, 혼효림은 15.1%의 비율로 분포하는 것으로 산출되었다. 토지피복도는 지구표면의 형태를 일정한 과학적 기준에 따라 동질의 특성을 지닌 구역을 지도의 형태로 표현한 자료로서 중앙정부 및 지방정부의 환경정책 수립의 과학적 근거 및 다양한 연구자료로 활용되고 있다(Korea Environment Institute, 2002).

덕유산국립공원의 산림지형특성에 따른 LAI의 분포를 해석하기 위해서 R tool을 이용하여 현지에서 측정된 LAI

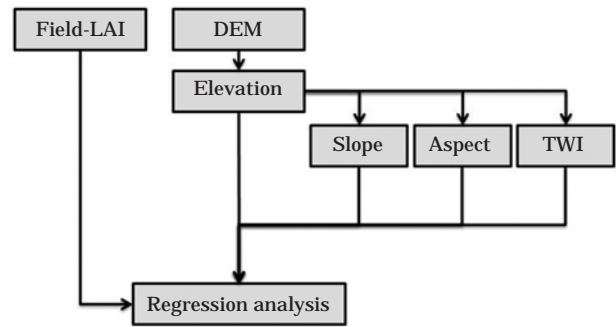


Fig. 1. Processing scheme to analysis the relationship between field-LAI and topographic properties.

값과 고도·경사·사면·토양수분조건의 관계를 통계분석기법 중 하나인 회귀분석방법을 통해 분석하였다(Ahn, 2011). Fig. 1은 전체적인 연구 수행 과정을 보여주고 있다.

2. LAI 현지측정

LAI를 현장에서 측정하는 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 구분될 수 있다(Chen and Cihlar, 1996; Gower *et al.*, 1999; Zheng and Moskal, 2009). 직접적인 방법은 단위 지표면적 안에 포함되는 모든 잎을 채집하여 측정하는 것으로 수목을 벌목하여 모든 잎을 측정하거나 낙엽을 통해서 측정한다. 이 방법은 주로 농경지 혹은 초지에서 주로 적용되었다. 농경지 혹은 초지보다 잎의 분포가 보다 복잡한 산림지역에 적용하는 것은 어렵고 많은 시간이 소요된다. 직접적인 방법 중 잎의 전체 면적과 수목의 높이 및 흉고직경(diameter at breast height, DBH)의 관계를 이용한 성장식(allometric equation)을 적용하는 방법은 수목의 나이, 밀도, 성장조건 등의 산림지역의 지역적 특성에 의해 종종 한정된다. 최근 LAI를 간접적으로 측정할 수 있는 광학기기를 이용할 수 있게 되었고 이 기기는 잎의 면적과 분포상태에 따라 산림의 수관층을 통과하는 태양 빛의 투과율을 canopy gap fraction 모형을 통해 역변환하여 LAI를 산출한다(LI-COR Inc., 1992; Stenberg *et al.*, 2003).

본 연구에서 덕유산국립공원 산림지역의 LAI 현지측정은 Lee (2003) 등이 제시한 방법을 참조하여 이루어졌다. 산림지역에서 태양 빛의 투과율을 이용하는 광학측정 장치인 LI-COR 회사의 LAI PCA 2000 측정기 1대를 이용하여 국립공원의 산림지역에 대한 접근성과 최소한 통계적 유의성을 고려하여 24개 지점에서 LAI를 측정하였다. 현장 측정은 2012년 8월 29일에서 31일까지 그리고 9월 18일에서 21일까지 총 7일에 걸쳐 이루어졌다. 각 측정지점

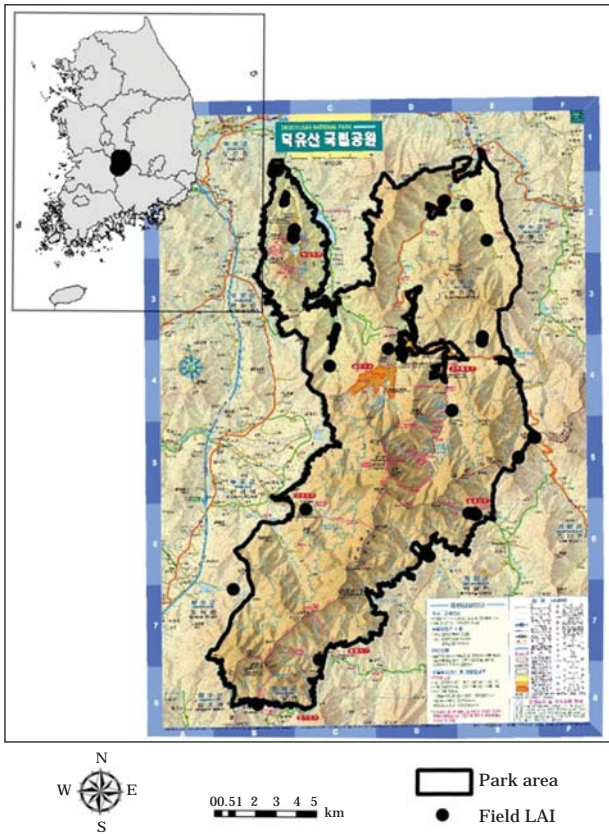


Fig. 2. Distribution of 24 ground plots for the field LAI measurements within the boundary of Deogyusan National Park.

의 면적을 $5 \times 5 \text{ m}^2$ 크기로 이 영역 내에서 5지점을 3번 측정하여 각 지점에 대해서 총 15개 측정값을 획득한 후 평균한 값을 이용해 각 해당지점의 LAI 값을 산출하였다. 측정지점의 정확한 위치는 GPS (global positioning system) 수신기를 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 덕유산 국립공원 산림지역에서 LAI를 현지 측정된 24개 지점을 보여주고 있다.

3. 지형요소 추출

수치고도자료 (Digital Elevation Model, DEM)는 실제 지형기복의 형태를 표현하고자 3차원으로 표현한 수치자료로서 대상 지역을 일정한 면적을 정방형으로 격자를 나누는 뒤 각 격자마다 해당지점의 해발고도가 입력된다. 본 연구에서 사용된 수치고도자료는 국립공원에서 제작하고 배포하는 1:5,000 축척의 수치지형도에서 지형의 고도 값을 나타내는 등고선 관련 자료에서 고도값이 입력된 각 지점을 연속적인 삼각형으로 연결하는 불규칙 삼각망 (Triangulated Irregular Network, TIN) 보간법을

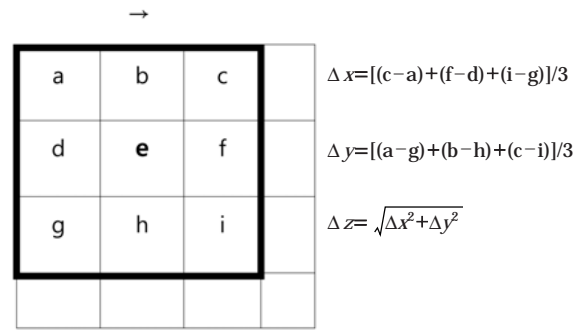


Fig. 3. Moving window operation for calculating slope and aspect from digital elevation model data.

적용하여 격자크기는 수치지형도의 정확도를 고려하여 10 m DEM자료를 제작하였다 (Burrough and McDonnell, 1998).

이 자료로부터 덕유산국립공원의 해발고도자료를 LAI 현지 측정 한 지점에서 추출하였다. 그리고 이 지점에서 경사 및 사면향은 간단한 공간분석 기법을 응용하여 산출하였다. 고도 자료로부터 경사, 방위, 그리고 기타 지형 인자를 산출한 과정은 Fig. 3에 나타난 것 같이 주변 격자 값을 이용한 간단한 산술식에 의하여 계산되어 질 수 있다 (Lee *et al.*, 1996).

$$\text{Slope} = \tan^{-1}(\Delta z/2S), \text{Aspect} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)$$

여기서 S는 격자와 격자간의 거리이고 Fig. 3의 격자점 e에서 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 격자간 오른쪽으로 동일한 계산을 반복 하면서 다음 식에 의해 덕유산 국립공원 전 지역에 대해서 경사와 사면향을 구할 수 있다.

토양수분조건으로 오목한 형태와 경사가 완만한 특성을 갖는 지형에서 분포한 토양에서는 수분이 모이고 경사가 가파르고 볼록한 형태의 지형에서는 물이 흐르는 특성을 지형습윤지수 (Topographic Wetness Index, TWI)를 이용하여 정량화하여 사용하였다. 이 지수는 경사에 따라 물이 흐르는 방향에 직각을 만나는 단위 면적에 대한 물의 면적의 비율로 산출된다 이 값이 높을수록 토양 수분 상태가 높은 값의 지역에 상대적으로 많다는 것을 의미한다 (Gessler *et al.*, 2000).

$$\text{TWI} = \ln(A_s/\tan\beta)$$

여기서, A는 집수면적이고 $\tan\beta$ 는 라디안 단위로 표현되는 경사를 나타냈다.

Fig. 4는 지리정보시스템 (geographic information system, GIS)의 공간분석 기법을 적용하여 제작된 덕유산국립공원의 지형적 특성을 보여주고 있다. 지도에서 색상의

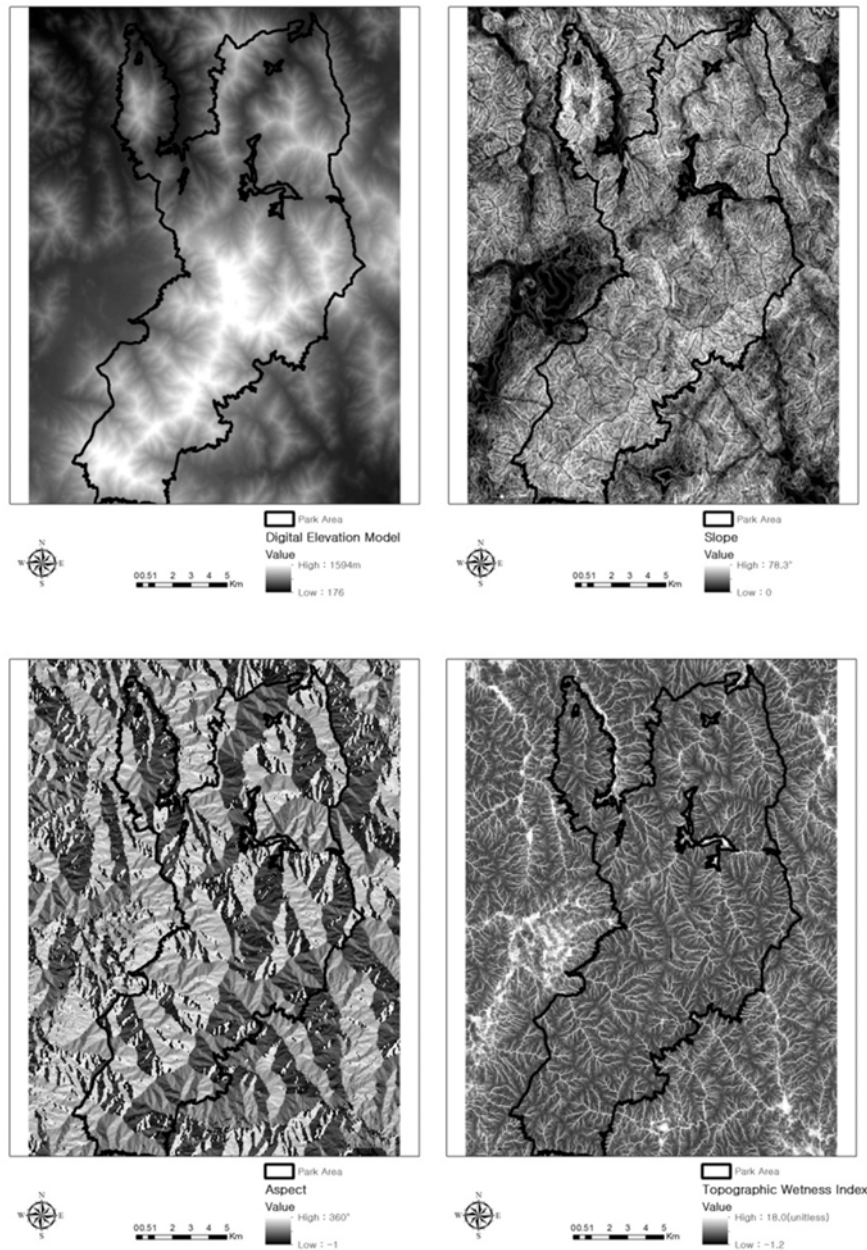


Fig. 4. Topographic property of Deogyusan National Park generated using GIS spatial analysis.

변화가 검은색상에서 흰색으로 갈수록 고도가 높고, 경사가 급하고 지형적 수분 상태가 높은 것을 의미한다. 사면향은 평지를 나타내는 -1과 0°에서 360°까지 각도로서 보여주고 있다.

결과 및 고찰

현지에서 측정된 LAI 값은 평균 3.67이고 표준편차는

1.47로 비교적 좁은 범위의 LAI 값이 측정되었다. 측정된 지점의 지형특성을 보면 해발고도는 최소 228m에서 최대 940m 범위에서 평균 606.5m으로 나타났다. 지형경사는 평균 19.6°이고 최소 2.7°에서 최대 41.2°의 범위에 분포하고 있다. 북쪽사면에 22%, 동쪽사면에 23%, 남쪽사면에 48%, 서쪽사면에 6%의 비율로 LAI가 분포하는 것으로 나타났다. 토양의 수분상태를 설명하는 지형습윤지수(TWI)는 전반적으로 1.2 이상으로 평균 3.7과 최대 12.8로 나타났다. Fig. 5는 지형요소에 대한 히스토그램

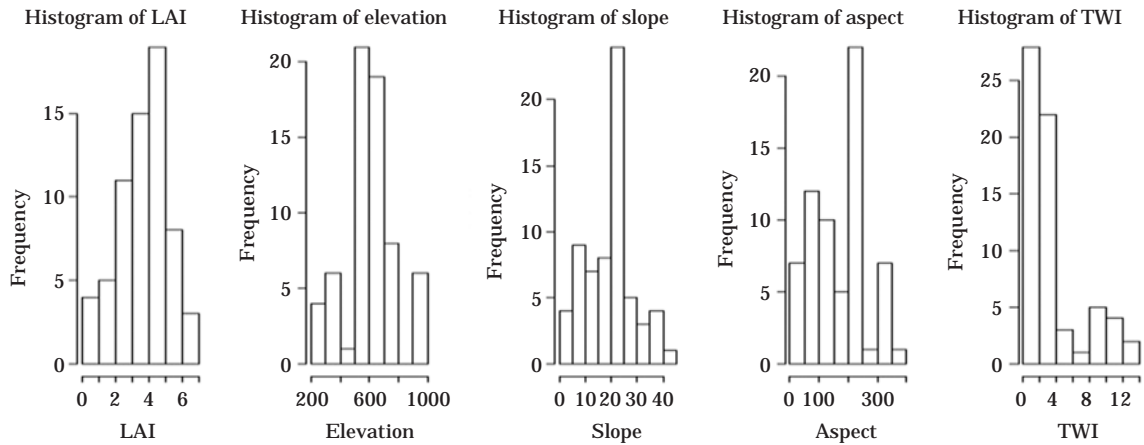


Fig. 5. Histogram of topographic factors and Leaf Area Index. Elevations are in meters, -; slope and aspect are in degrees. Topographic Wetness Index (TWI) and Leaf Area Index (LAI) are unit-less.

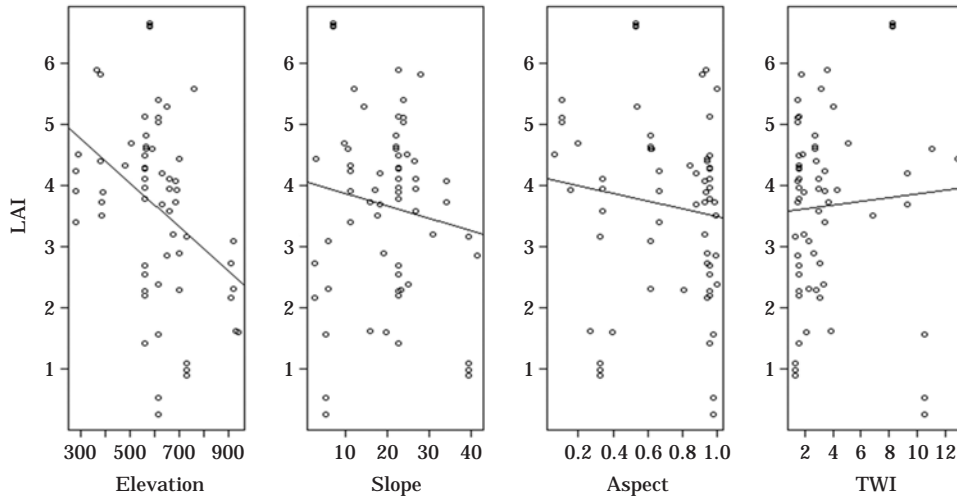


Fig. 6. Relationship between Leaf Area Index and terrain indices from DEM. Aspect converted to circular score range from 0 to 1 via $\sin(\text{Aspect} \times \pi/360)$ was used.

을 보여주고 있다.

지형요소에 따른 LAI분포의 영향을 분석하기 전에 LAI와 모든 DEM자료로부터 유도된 지형요소와 어떤 관계가 있는지를 상관분석을 통해 평가한 결과 지형고도와 상관성은 매우 높은 통계적 유의성 ($p\text{-value} < 0.001$)이 나타난 반면에 나머지 지형요소와 상관성의 통계적 유의성 뿐만 아니라 전체적으로 LAI와 지형요소의 상관계수도 비교적 낮게 산출되었다($r < 0.5$). Table 1은 LAI와 지형요인간의 상관관계를 보여주고 있다.

상관성의 방향성을 보면 주로 고도가 높고 경사가 급하고 토양의 수분상태가 낮은 지역일수록 LAI 값이 낮은 것으로 나타났다(Fig. 6). 이는 지형적 변화가 다양하고

Table 1. Correlation between Topographic factors and LAI.

	R	t-value	p-value
Elevation	-0.37822	-3.2429	0.001894
Slope	-0.13755	-1.1022	0.2746
Aspect	-0.1256	-1.0049	0.3188
TWI	0.067023	0.5332	0.5958

산림밀도가 높은 산림지역의 특성과 산림지역에서 나타나는 지형요소의 복합적인 상호작용에 기인할 수 있다고 판단되며 (Lee *et al.*, 2003), 상관관계의 방향성은 지형특성에 따라 LAI의 분포변화에 영향을 미친다는 것을 간

Table 2. Linear model between Leaf Area Index and terrain properties.

	var. name	Estimate	Std. error	t value	Pr (> t)		R-squared	Adj. R-squared	AIC	p-value
Full	Elevation	-0.004046	0.001107	-3.654	0.000544	****	0.216	0.164	44.39	0.004974
	Slope	-0.033421	0.022385	-1.493	0.140674					
	Aspect	-1.104199	0.582984	-1.894	0.063042	*				
	TWI	-0.018287	0.069407	-0.263	0.793092					
var. 3	Elevation	-0.00404	0.001099	-3.678	0.0005	****	0.216	0.177	42.47	0.001881
	Slope	-0.029721	0.017299	-1.718	0.0909	*				
	Aspect	-1.108911	0.578248	-1.918	0.0598	*				
var. 2	Elevation	-0.003883	0.001112	-3.493	0.000888	****	0.178	0.151	43.54	0.002333
	Aspect	-0.932445	0.57794	-1.613	0.111738					
var. 1	Elevation	-0.003608	0.001113	-3.243	0.00189	***	0.143	0.130	44.21	0.001894
	Slope	-0.02062	0.0187	-1.102	0.275					
	Aspect	-0.6228	0.6198	-1.005	0.319					
	TWI	0.0314	0.0589	0.533	0.596					

(significant level : **** $\alpha < 0.001$, *** $\alpha < 0.01$, ** $\alpha < 0.05$, * $\alpha < 0.1$)

접적으로 알 수 있다.

이러한 지형특성의 영향을 평가하기 위해 앞서 제시된 GIS 공간분석 기법을 통해 유도된 지형요소를 설명변수로 하고 LAI 현지 측정값을 반응변수로 하여 회귀분석을 수행하였다.

지형요소 변수를 1개부터 모든 변수를 포함한 모델에서 변수의 통계유의성(Pr (>|t|))을 고려하여 LAI 분포를 가장 잘 설명할 수 있는 변수를 검토함으로써 지형특성에 대한 영향을 평가하였다. Full 모델은 모든 변수를 동시에 적용한 경우이고 var. 3는 Full 모델에서 변수의 통계적 유의성이 가장 낮은 TWI변수를 제외한 3개의 변수의 영향을 검토한 모델이다. var. 2는 slope과 TWI변수를 제외한 2개의 변수를 적용한 경우이고 var. 1은 각 변수의 영향을 검토하기 위해 적용한 모델이다(Table 2). 지형고도는 모든 모델에서 통계적으로 유의한 설명변수로 나타났다. 비록 LAI 변화량을 14.3%에서 21.6% 정도 낮은 설명력을 갖지만 통제 불가능한 변인들이 많은 연구에서 이 정도의 설명력(R^2)은 작지 않다. 고도가 상승함에 따라 기온이 낮아지는 특성에 따른 LAI 변화를 분명하게 설명할 수는 없지만 고도가 높은 지역에서 수목의 짧은 생장기간으로 잎의 면적이 작을 수 있다(Spadavecchia *et al.*, 2008).

지형고도의 1개 변수를 고려한 모델에서는 14.3% 정도 LAI 변화량을 설명하고 지형고도, 경사, 사면향을 함께 고려할 경우 7% 정도로 적은 양이지만 보다 더 많은 LAI 변화량을 설명하는 것으로 나타났다. 토양수분조건을 설명하기 위해 본 연구에서 사용한 지형습윤지수(TWI)는 LAI 분포와 유의한 관계가 없는 것으로 나타났다. 덕유산

국립공원 산림의 식생구조 변화를 설명하는데 적합하지 않는 지수일지 모른다. 이와 같이 LAI 분포는 단순히 하나의 특성에 의해 영향을 받는 것이 아니라 다양한 요소가 복합적으로 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

적 요

본 연구에서는 덕유산 국립공원의 산림지역을 대상으로 하여 식생의 구조를 정량화하는 지수로 널리 이용되고 있는 LAI에 대한 지형적인 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해서 식생의 분포와 구조에 영향을 주는 해발고도, 지형경사, 사면향, 그리고 토양 수분조건을 설명변수로 하고 엽면적지수(LAI, Leaf Area Index)를 반응변수로 하는 회귀분석방법을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다. 전체적으로 LAI와 지형요소의 상관관계는 0.5 미만으로 비교적 낮고 지형고도를 제외한 나머지 요소와의 상관성에 대한 통계적 유의성이 없는 것으로 나타난 반면에 상관성 방향성을 보면 주로 고도가 높고 경사가 급하고 토양의 수분상태가 낮은 지역일수록 LAI 값이 낮은 것으로 나타났다. 지형특성에 따른 LAI 분포에 대한 영향을 평가하기 위해 지형요소의 조합에 따른 회귀분석 결과 지형고도가 모든 모델에서 통계적으로 유의한 설명변수로 나타났다. 지형고도의 변수만을 고려한 경우보다 경사와 사면향을 추가적으로 고려할 경우 LAI 변화량을 설명하는데 보다 더 잘 적합한 것으로 나타났다. 토양수분조건을 설명하기 위해 본 연구에서 사용한 지형습윤지수(Topographic Wetness Index, TWI)는 LAI 분포와 유의한 관계

가 없는 것으로 추가적인 연구가 필요할 것이다. 본 연구에서 유도된 결과는 위성영상자료를 이용하여 덕유산 국립공원 산림식생 LAI를 추정하는데 있어서 영상자료의 분광 반사율과 지형적 특성을 함께 고려하면 보다 높은 정확도를 갖는 LAI 분포를 예측하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구 논문은 국립공원관리공단 국립공원연구원에서 수행한 자연자원조사사업 (2012)의 일부 결과를 반영하여 작성되었습니다.

인 용 문 헌

- Ahn, C.H. 2011. Data Analysis for Beginners. Hannarae Publishing Co., Korea.
- Bonan, G. 1993. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of Environment* **43**: 303-313.
- Burrough, P.A. and R. McDonnell. 1998. Principles of Geographic Information Systems. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Chen, J.M. and J. Cihlar. 1996. Retrieving leaf area index of Boreal conifer forest using Landsat TM image. *Remote Sensing of Environment* **55**: 153-162.
- Gessler, P.E., O.A. Chadwick, F. Chamran, L. Althouse and K. Holmes. 2000. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Science Society of America Journal* **64**: 2046-2056.
- Gower, S.T., C.J. Kucharik and J.M. Norman. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* **70**: 29-51.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007- Synthesis Report. International Panel on Climate Change.
- Kim, M.H., H.S. Bang, M.S. Han, H.K. Hong, Y.E. Na, K.K. Kang, J.T. Lee and D.B. Lee. 2009. Effect of vegetation types on the distribution of soil invertebrates. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **28**(2): 125-130.
- Korea Environment Institute. 2002. Building the Land Cover Map using Remote sensed data. Ministry of Environment, Korea.
- Lee, K.S., B.C. Lee and J.H. Shin. 1996. Classification of forest vegetation zone over southern part of Korean peninsula using geographic information systems. *Korean Journal Ecology* **19**: 465-476.
- Lee, K.S., S.H. Kim, Y.I. Prak and K.C. Jang. 2003. Generation of forest Leaf Area Index (LAI) map using multispectral satellite data and field measurements. *Korean Journal of Remote Sensing* **19**(5): 371-380.
- LI-COR Inc. 1992. Instruction Manual LAI 2000 Plant Canopy Analyzer. LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA.
- National Park Research Institute. 2012a. Establishing Monitoring System for the impact of Climate Change on Ecosystem. Korea National Park Service.
- National Park Research Institute. 2012b. Nature Resource Research of Deogyu-San National Park. Korea National Park Service.
- Spadavecchia, L., M. Williams, R. Bell, P.C. Stoy, B. Huntley and M.T. VanWijk. 2008. Topographic controls on the leaf area index and plant functional type of a tundra ecosystem. *Journal of Ecology* **96**: 1238-1251.
- Stenberg, P., T. Nilson, H. Smolander and P. Voipio. 2003. Gap fraction based estimation of LAI in Scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. *Canadian Journal of Remote Sensing* **29**(3): 363-370.
- Zheng, G. and L.M. Moskal. 2009. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors* **9**: 2719-2745.

(Manuscript received 5 March 2013,
Revised 8 March 2013
Revision accepted 11 March 2013)