

공간통계와 GIS를 이용한 소나무림과 참나무류림의 분포패턴

이종수¹ · 이우균^{2*} · 윤정호¹ · 송철철²

¹한국환경정책·평가연구원 환경정보센터, ²고려대학교 환경생태공학부

Distribution Pattern of *Pinus densiflora* and *Quercus* Spp. Stand in Korea Using Spatial Statistics and GIS

Chong-Soo Lee¹, Woo-Kyun Lee^{2*}, Jeong-Ho Yoon¹ and Chul-Chul Song²

¹Environmental Information Center, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

요약: 본 연구는 소나무림과 참나무류림의 공간분포 패턴을 규명하기 위하여 수행하였다. 공간분석을 위한 기초 자료로 수치 임상도와 현존식생도를 활용하여 100 m×100 m 격자 단위로 전국 단위의 소나무림과 참나무류림 분포도를 제작하였다. 또한 100 m×100 m 래스터 격자 단위의 지형, 기후, 토양 관련 주제도를 제작하였다. 이상의 소나무림과 참나무류림의 분포도와 주제도간의 GIS 기반 공간 분석을 실시하여 지형, 기후, 토양 등의 환경 인자에 따른 소나무림과 참나무류림의 공간분포 특성을 분석하였으며, 이러한 공간분포 특성을 활용하여 소나무림과 참나무류림의 출현빈도모형을 제시하였다. 소나무림의 경우 참나무류림에 비하여 상대적으로 표고가 낮고 경사도가 완만하며 기온이 높은 지역에 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 소나무림은 양토, 보통 이하의 얇은 토심지역이며 배수가 양호한 화성암 지역에 주로 분포한 반면, 참나무류림은 사양토, 보통 이하의 얇은 토심지역이며 배수가 양호한 변성암 지역에 주로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이상과 같은 지리형태학적 인자에 따른 소나무림과 참나무류림의 공간분포 패턴을 회귀식으로 도출한 결과 통계적 유의성이 매우 높게 나타났다. 본 연구 결과는 지형, 기후, 토양 등의 환경 요소를 고려한 소나무림과 참나무류림 임분의 합리적인 관리에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract: This study was performed for exploring the spatial distribution pattern of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. in Korea. Firstly, the spatial distribution map of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. was prepared in grid of 100 m×100 m at national level, using digital forest type map and actual vegetation map. And thematic maps for topography, climate, and soil were also prepared in the raster form of 100 m×100 m. Through GIS based spatial analysis of the digital distribution map of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. and thematic maps, the spatial characteristics of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. distribution was explored in relation to the environmental factors such as topography, climate, and soil. And the occurrence frequency models of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. were derived. *Pinus densiflora* occurs more often than *Quercus* spp. at low elevation, low slope gradient, and high temperature areas. In addition, *Pinus densiflora* is mainly distributed at shallow and well-drained loamy soil from igneous rocks. In contrast, *Quercus* spp. is more common at shallow and well-drained loamy soil from metamorphic rocks. As a result, the prediction model for the spatial distribution of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. by topographical variables has proven successful with high statistical significance. The result of this study can contribute to rational management of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. stand in Korea, considering environmental factors such as topography, climate, and soil.

Key words : *Pinus densiflora*, *Quercus* spp., spatial distribution patterns, GIS, spatial analysis, occurrence frequency model

*Corresponding author
E-mail: leewk@korea.ac.kr

서 론

우리나라 산림면적의 24%와 20%를 각각 점유하고 있는 소나무와 참나무류는 그 면적에서 알 수 있듯이 우리나라의 대표수종이라 할 수 있다. 이 두 수종은 여러 면에서 우리 생활문화와 밀접한 연관성을 맺고 있을 뿐만 아니라, 경제 및 생태적으로도 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 소나무의 경우, 국가적인 보호책에도 불구하고 환경변화와 각종 병해충 등으로 점차 감소추세에 있으며, 참나무류의 경우는 생태적으로나 경제적으로 중요한 수종임에도 불구하고 잠목으로 취급되는 경향이 있어 왔다.

소나무와 참나무는 모두 양수로서 많은 경우에 있어서 경쟁관계에 있다. 이 두 수종을 동시에 보호하고 다방면에서 가치 있는 숲으로 유도하기 위해서는, 소나무와 참나무류의 분포 및 생장에 영향을 주는 제반 입지환경인자의 과학적 규명을 통해 생육적지를 파악하고, 이를 근거로 두 수종에 대한 종합적인 관리방법을 마련하는 것이 필요하다.

그간 우리나라에서 소나무나 참나무류에 대한 개별적 연구는 생장(곽두안 등, 2004; 서정호 등, 2001; 손영모 등, 1998, 1999; 송철철 등, 1995; 이우균, 1996a, 1996b; 이우균 등, 2000), 식물사회학적 분석(송호경 등, 1995a, 1995b; 이우철과 이철환, 1989; 장규관 등 1997; Kim, 1996; Kim *et al.*, 1995), 갱신(김성덕과 김운동, 1995; 김성덕과 송호경, 1995), 생태 및 입분구조(김지홍 등, 1993; 농림부, 2000; 윤충원, 1999; 조재창, 1994), 분포(환경부, 1997; Lee *et al.*, 2003), 유전(김진수와 이석우, 1992; 김진수와 홍용표, 1982; 김진수 등 1993; 손두식 등, 1990a, 1990b), 형태(손영모 등, 2000; 이우균, 1994; 함보영 등, 2004; Lee *et al.*, 2003, 2006) 등 다양한 분야에서 많이 이루어 졌으나, 두 수종을 동시에 다룬 것은 극히 미미한 실정이다(송호경과 장규관, 1997; 이우균, 1999; Lee *et al.*, 2004).

또한, 두 수종의 분포에 관한 연구는 거의 이루어지지 않은 상황이며, 환경부(1997)에서 수행한 소나무림의 분포에 관한 연구는 경북 내륙지역의 소나무에 국한되어 참나무와 연계된 종합적인 관리대책에 활용되기에는 한계를 지니고 있다. 특히, 전국을 대상으로 소나무와 참나무류의 분포를 공간 통계학적인 방법으로 분석한 연구는 아직 없는 실정이다.

본 연구의 주요 내용은 소나무와 참나무류의 공간분포 패턴을 파악하고, 두 수종의 출현확률을 출현지점과 연계된 지형, 기상, 토양 등의 공간정보로부터 추정하는 것이다. 외국에서는 이와 관련된 공간분석 관련 연구가 산림(De Fouquet and Mandallaz, 1993; Mandallaz, 1994; Palmer, 1988; Payn and Clough, 1988; Ramirez, 1988;

Hershey, 2000; Hershey and Drake, 1997; Rossi *et al.*, 1992; Samra *et al.*, 1989)등에서 활발히 이루어지고 있다.

이에 본 연구의 목적은 소나무와 참나무류의 공간분포 및 출현에 미치는 지형, 기상, 토양 등의 영향기작을 공간 통계학적인 분석을 통해 밝히고, 이를 기반으로 두 수종의 생육에 대한 적합한 입지환경조건을 제시함으로써 두 수종의 종합적 관리를 위한 기술적 기틀을 마련하는데 있다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 제주도와 서남해안 일부 도서지역을 제외한 동경 125° 46' 30"~129° 31' 19", 북위 33° 56' 24"~38° 36' 56"에 해당하는 면적 98,654.4 km²의 전국 산림을 대상으로 하였다. 분석단위는 연구대상지의 크기와 자료의 양을 고려하여 100 m×100 m 격자 단위로 하였다.

2. 연구재료

현재 전국 단위의 소나무림 및 참나무류림의 분포를 추정하는데 국립산림과학원에서 제작한 임상도와 환경부에서 제작한 현존식생도를 활용할 수 있다. 그러나 임상도는 항공사진의 판독상의 오류, 임상도면 제작상의 오류, 수치화 작업과정상의 오류, 제작이후 시계열적인 변화의 미반영 등으로 인하여 현재의 임상에 대한 적시적이고 현실적인 자료 생성에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 국립산림과학원의 수치임상도를 기본으로 환경부에서 제작한 현존식생도 및 중해상도 인공위성 영상자료인 Landsat TM을 이용하여 제작한 대분류 토지피복지도 등을 이용하여 임상도에 내재된 오류를 가능한 한 제거하였다. 이를 토대로 현재의 임상 분포도를 제작하여 우리나라 소나무림 및 참나무류림의 공간적 분포를 파악하였다.

1) 수치임상도

임상도는 1:25,000축척의 국가기본도를 토대로 전국산림조사사업 및 항공측량을 통하여 단색의 양화필름으로 제작되었으나, 최근 컴퓨터 기술의 발달과 국가 정보화 정책에 따라 1994년(제3차 전국산림자원조사)부터 국립산림과학원에서 수치지도로 제작하고 있다. 본 연구에서는 국립산림과학원에서 제작한 남한 전역에 대한 1:25,000 축척의 수치 임상도를 집합하여 사용하였다.

2) 현존식생도

현존식생도는 현재의 식생 분포상태를 지도에 도식한 것으로 잔존한 자연군락과 대상군락(代償群落: 인간의 간섭으로 변형된 것)에 대한 정보가 표현된다. 본 연구에서는 제2차 자연환경 기초조사('97~'03) 결과를 바탕으로 제

작된 1:50,000 축척의 수치 현존식생도를 정리하여 사용하였다(환경부 2004).

3) 대분류 토지피복지도

Landsat TM 위성영상을 이용하여 제작한 대분류 토지피복지도를 사용하여 소나무림 및 참나무림의 분포도를 작성하기 위한 시계열 보조 자료로 활용하였다. 본 연구에서 사용한 대분류 토지피복지도는 시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 7개 분류 항목으로 구성되며 30 m×30 m 크기의 공간해상도를 갖는다.

3. 연구 방법

본 연구의 주된 목적은 소나무림 및 참나무림의 분포 지점의 지형, 기상, 토양인자와 함께 분석함으로써 소나무림 및 참나무림의 공간분포에 영향을 미치는 제반 입지환경인자를 밝히는데 있다. 이를 위해 소나무림 및 참나무림의 분포에 대한 2차원 위치자료(x, y)를 구축하고, 그 위치에 대해 파악된 지형, 기상, 토양관련 인자를 z변수로 추가한 3차원 자료를 구축하여 공간분포패턴 분석에 활용하였다. GIS 및 영상자료 처리에는 ArcView 3.2a, ArcGIS 8.3, ERDAS IMAGINE 8.5를 사용하였으며, 통계 자료 처리에는 SAS 9.1과 SigmaPlot 8.0을 사용하였다.

1) 소나무림과 참나무림 공간분포도 제작

본 연구에서 소나무림은 임상도 상에서 리기다소나무를 제외한 소나무림으로 한정하였다. 참나무림은 현존식생도상의 활엽성 참나무류인 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무, 상수리나무, 떡갈나무, 갈참나무 임분과 상록성 참나무류인 가시나무, 붉가시나무, 종가시나무, 참가시나무, 개가시나무, 줄가시나무 임분을 대상으로 하였다. 소나무림 및 참나무림 분포도의 제작 순서는 다음과 같다.

① 수치임상도에서 리기다소나무, 소나무 인공림, 소나무림(천연림), 참나무림을 추출하여 100 m×100 m 격자 형태의 Raster 자료를 제작하였다.

② 현존식생도에서 소나무 군락과 소나무 혼효림 군락, 참나무림 군락과 참나무 혼효림 군락을 추출하여 100 m×100 m 격자 형태의 Raster 자료를 제작하고, Raster 자료의 공간연산을 통하여 소나무림 및 참나무림의 분포 자료를 제작하였다.

③ 자료 분석의 기준 시점을 통일하기 위하여 대분류 토지피복지도 상의 산림지역 및 초지와 감독 분류를 통해 산출된 위성영상자료(Landsat TM 및 IRS 1C/D) 상의 산림지역 자료와 마이너스 공간연산을 통하여 변화된 지역을 제거하였다.

④ 1과 2에서 생산된 자료의 공간연산을 통해 외래 수종인 리기다소나무림과 인공림을 제거하였다.

⑤ 3에서 생산된 자료와 1과 2에서 생산된 자료를 식생 경계에 대하여 마이너스 공간연산을 통하여 시가화/건조 지역, 농경지역, 습지, 나지 및 수역에 해당되는 부분을 제거하여 최종적으로 현존 소나무림 및 참나무림 분포도를 작성하였다.

2) 소나무림 및 참나무림의 공간분포 패턴 분석

(1) 지리형태학적 주제도 제작

지형분석을 위한 표고, 경사, 향 자료는 환경부에서 구축한 수치표고모델(Digital Elevation Model: DEM)을 이용하여 제작하였다.

기상자료는 지구기후네트워크(Global Historical Climatology Network Data: GHCN)의 동북아시아 지역 기온 124개소, 강수량 101개소 지점의 월평균기온, 강수량 자료와 기상청 상시관측소 80개 지점의 월 평균 기온과 강수량 자료를 이용하여 제작하였다. 각 관측소의 자료는 IDSW (Inverse Distance Squared Weighting) 공간내삽 방법을 이용하여 공간해상도 1 km×1 km 자료를 생성한 후, 분석 단위를 통일하기 위해 100 m×100 m 격자단위로 분할하여 사용하였다.

토양자료는 1:25,000 축척의 정밀토양도에서 표토특성, 유효토심, 배수등급 및 모재 특성 자료를 추출하여 100 m×100 m 격자단위의 Grid 도면을 제작하였다.

(2) 공간분포패턴 분석

소나무림 및 참나무림의 공간적 분포 및 속성정보와 지형인자, Indicator kriging 기법을 통하여 생성된 기상인자를 100 m×100 m의 공간해상도를 갖는 별도의 Layer를 생성한 후 이 Layer의 각 Cell에서 x, y, z, 경사, 연평균 기온, 4월 평균기온, 강수량 값을 8bit ASCII text 파일로 저장하여 통계분석에 이용하였다. 소나무림 및 참나무림의 출현빈도, 공간적 분포양상 및 각 인자들간의 상관관계는 SAS 9.1을 이용하여 분석하였다(권세혁, 2004). 통계분석 결과를 토대로 출현 빈도 지수 함수식을 작성하였다.

결과 및 고찰

1. 소나무 및 참나무림의 공간분포 특성

현존 소나무림 및 참나무림 분포도를 제작한 결과 소나무림 분포 면적은 16,066.60 km²으로 제주도를 제외한 국토 면적의 16.3%, 산림면적 대비 24.3%인 것으로 나타났다. 참나무림의 분포면적은 13,395.73 km²으로 국토면적의 13.6%, 산림면적 대비 20.3%인 것으로 나타났다. 지역별로 소나무림의 경우에 영동 및 영서내륙, 남부 지역에 많이 분포하고, 참나무림의 경우에는 강원도 태백산맥의 상부와 중부 내륙지역에 가장 많이 분포하는 것



Figure 1. Actual distribution map of *Pinus densiflora* and *Quercus spp.* stand in Korea.

으로 나타났다(Figure 1). 특히, 6대 광역시도의 경우 소나무림 및 참나무림의 분포가 매우 낮은 것으로 나타났는데 이는 인구증가 및 산림의 토지이용 변화, 환경오염 등의 원인이 복합적으로 작용하여 급격히 산림이 감소한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

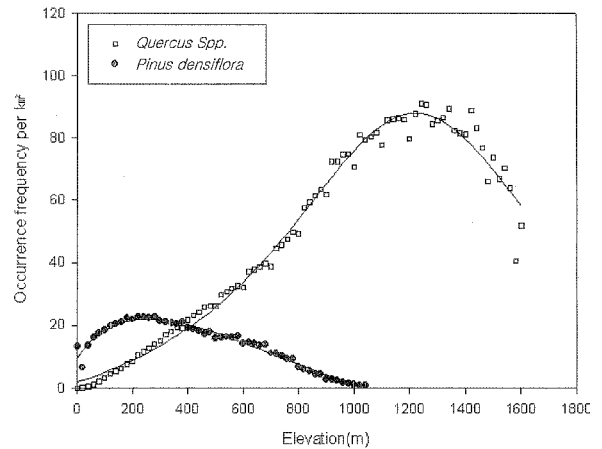
2. 지리형태학적 인자에 따른 공간분포 특성

1) 지형인자

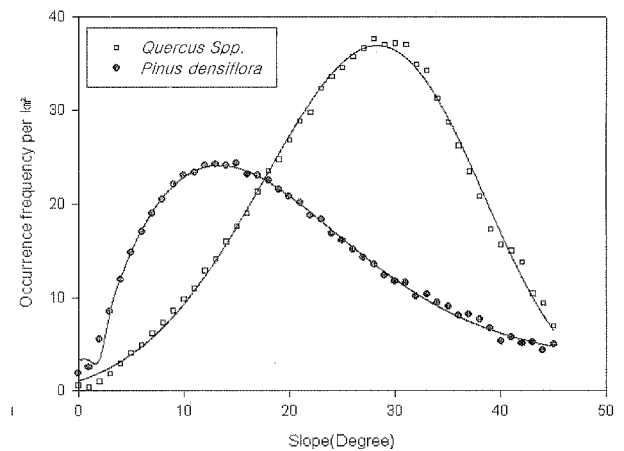
표고는 높아질수록 경사도는 급해질수록 전 국토 면적 중 단위면적이 기하급수적으로 줄어들게 된다. 따라서 해당 표고 및 경사도 간격별 단위 면적당 소나무림 및 참나무림 출현빈도의 변화를 살펴보았다.

표고에 따른 출현빈도는 Figure 2(a)와 같이 소나무의 경우 지수 Weibull 형태를 나타내며 표고 200-300 m 사이에서 가장 높은 출현 빈도를 보였다. 참나무류는 Gaussian과 Lorentz 함수의 혼합형태인 Pseudo-Vogit 5parameter 분포를 나타내며 표고 1,150~1,250 m에서 가장 높은 출현 빈도를 나타냈다.

경사도에 따른 출현빈도는 모두 지수 Weibull 형태로 나타나며 소나무의 경우에는 경사도 15° 부근에서, 참나무



(a)



(b)

Figure 2. Occurrence frequency per unit area(No. of grid cell/km²) of *Pinus densiflora* and *Quercus spp.* stand by elevation(a) and slope(b) and estimation curve derived exponential function.

류의 경우에는 경사도 28°도 부근에서 가장 높은 출현빈도를 나타냈다(Figure 2(b)).

본 연구는 우리나라 전역을 대상으로 하기 때문에 자료의 양이 방대하다. 즉 소나무림과 참나무림의 면적을 본 연구의 분석 단위인 100 m×100 m격자로 환산할 경우 소나무림은 160만개, 참나무림은 133만개의 격자에 해당하므로 Figure 2에서는 출현빈도를 중첩시켜 점들로 나타내었다.

Table 1은 표고와 경사도에 따른 단위면적당 출현빈도를 함수식으로 도출한 결과로 모든 인자에서 결정계수(R²) 값이 매우 높게 나타났다.

방위와의 연관성 분석 결과, 각 방위에서 소나무림과 참나무림이 큰 차이 없이 공히 20.09~27.24%사이 분포하는 것으로 나타났다(Table 2). 이는 연구대상지가 남한 전역으로 매우 광범위하기 때문에 방위 특성이 나타나지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Table 1. Occurrence frequency models by topographical factors.

| Stand | Factor | Function | R ² |
|-------------------------|-----------|--|----------------|
| <i>Pinus densiflora</i> | Elevation | $f(x) = -19.31 + 58.75 \cdot \left(\frac{(x-255.94)}{814.95} + 0.61 \right)^{0.38} \cdot e^{-\left \frac{(x-255.94)}{814.95} + 0.61 \right ^{11.38} + 0.28}$ | 0.97008 |
| | Slope | $f(x) = 3.3137 + 29.92 \cdot \left(\frac{(x-13.34)}{18.90} + 0.41 \right)^{0.69} \cdot e^{-\left \frac{(x-13.34)}{18.90} + 0.59 \right ^{1.69} + 0.41}$ | 0.99452 |
| <i>Quercus spp.</i> | Elevation | $f(x) = -19.16 + 107.25 \cdot \left[0.96 \cdot \left[1 + \left(\frac{x-1.219}{606.76} \right)^2 \right]^{-1} + 0.04 \cdot e^{-0.5 \left(\frac{x-1.219}{606.76} \right)^2} \right]$ | 0.98431 |
| | Slope | $f(x) = -0.324 + 45.01 \cdot \left(\frac{(x-28.32)}{44.39} + 0.95 \right)^{3.66} \cdot e^{-\left \frac{(x-28.32)}{44.39} + 0.95 \right ^{4.66} + 0.79}$ | 0.99614 |

Table 2. Distribution of *Pinus densiflora* and *Quercus spp.* stand by aspect.

| Stand | Area(km ²) | Direction | | | | | Total |
|-------------------------|------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | Flat | North | East | South | West | |
| <i>Pinus densiflora</i> | Area(km ²) | 8.74 | 3,291.87 | 4,258.35 | 4,376.36 | 4,131.28 | 16,066.60 |
| | Ratio(%) | 0.05 | 20.49 | 26.50 | 27.24 | 25.71 | 100.00 |
| <i>Quercus spp.</i> | Area(km ²) | 18.07 | 3,646.23 | 3,483.55 | 2,691.60 | 3,556.28 | 13,395.73 |
| | Ratio(%) | 0.13 | 27.22 | 26.00 | 20.09 | 26.55 | 100.00 |

2) 기상인자

현존 소나무림과 참나무류림의 분포도와 연평균 기온 및 강수량 자료에 대한 공간분포 관계를 분석하였다. 또한, 분석 자료의 용량과 생장 시점을 고려하여 4월 평균기온에 대한 분석도 실시하였다. 4월 평균기온의 분포에 따른 소나무림의 출현빈도는 Pseudo-Voigt 형태를 나타내며 7°C에서 완만한 증가를 보이기 시작하여 8~11°C 사이에서 급격히 증가하고 11~12.4°C 사이에서는 고른 분포를 보인 후 12.4°C 이상에서 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 참나무류림은 Weibull 4parameter 형태를 나타내며 소나무림보다 낮은 5°C에서 완만한 증가를 보이다가 10°C에서 최대출현 빈도를 보인 후 급격히 감소하는 경향을 보였다(Figure 3(a)).

연평균 기온과의 관계는 소나무림의 경우 수정가우스 지수식으로 표현되며 4월 기온과의 비교보다 온도의 증감에 따른 분포 변화가 완만한 정규분포에 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다(Figure 3(b)). 소나무림은 9.4°C에서 완만한 증가를 보이다가 12°C에서 최대 출현 빈도를 보였다. 참나무류림의 경우에는 Weibull 5parameter 형태로 4월 평균기온과 유사한 경향을 나타냈다. 즉, 6°C에서 완만한 증가를 보이다가 10°C에서 최대출현 빈도를 보인 후 12°C까지 급격히 감소하는 경향을 보였다.

연평균 강수량과 소나무림 및 참나무류림의 분포는 강수량의 변화에 따라 여러 개의 정점이 나타나는 매우 복잡한 형태의 분포 양상을 보였다(Figure 4). 이는 강수량의 경우 기온과 달리 지형적 영향에 의하여 국지적 편차가 매우 크게 나타나기 때문이다. 따라서 소나무림 및 참

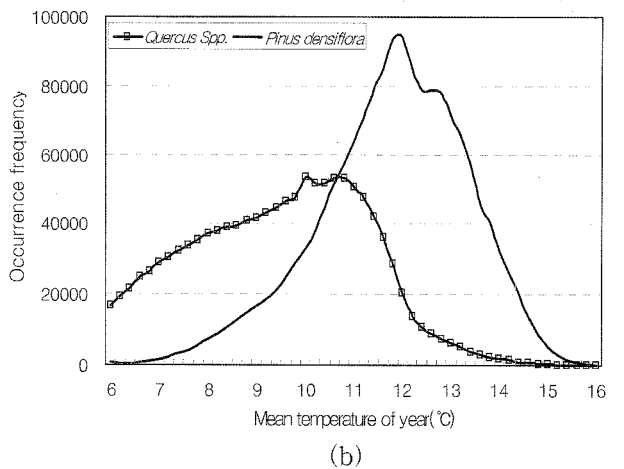
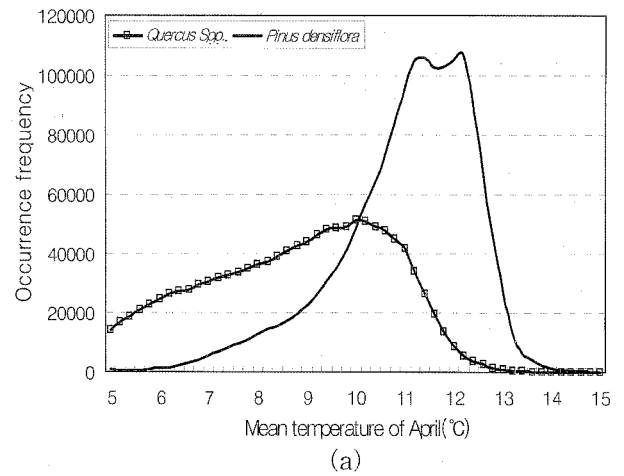


Figure 3. Occurrence frequency(No. of grid pixels) of *Pinus densiflora* and *Quercus spp.* stand by April mean temperature(a) and yearly mean temperature(b).

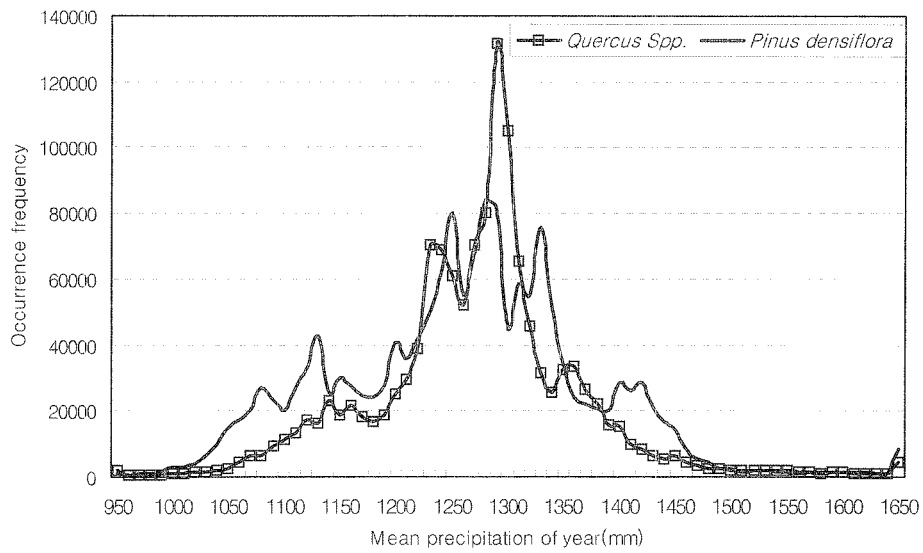


Figure 4. Distribution of *Pinus densiflora* and *Quercus spp.* stand by yearly mean precipitation.

Table 3. Occurrence frequency models by meteorological factors.

| Stand | Factor | Function | R ² |
|-------------------------|---------------------------|--|----------------|
| <i>Pinus densiflora</i> | April mean temperature | $f(x) = 0.26 + 6.57 \left\{ 1.89e^{-9} \left[1 + \left(\frac{x-1.14}{1.05} \right)^2 \right]^{-1} + (1 - 1.86e^{-9}) \cdot e^{-0.5 \left(\frac{x-1.14}{1.05} \right)^2} \right\}$ | 0.94945 |
| | Yearly mean temperature | $f(x) = 0.072 + 5.52 \cdot e^{-0.5 \left(\frac{x-11.99}{1.34} \right)^{1.81}}$ | 0.98670 |
| | Yearly mean precipitation | $f(x) = -0.27 + 5.13 \cdot e^{-0.5 \left \frac{x-1275}{6.17} \right }$ | 0.87457 |
| <i>Quercus spp.</i> | April mean temperature | $f(x) = 4.06 \cdot \left(\frac{x-9.51}{27686.3} + 0.99 \right)^{1.38e^4} \cdot e^{-\left \frac{(x-9.51)}{27686.3} + 0.99 \right ^{1.38e^4} + 0.99}$ | 0.96271 |
| | Yearly mean temperature | $f(x) = 0.0511 + 4.14 \cdot \left(\frac{(x-9.99)}{29690.1} + 0.99 \right)^{1.51e^4} \cdot e^{-\left \frac{(x-9.99)}{29690.1} + 0.99 \right ^{1.51e^4} + 0.99}$ | 0.97298 |
| | Yearly mean precipitation | $f(x) = 0.17 + 8.10 \cdot e^{-0.5 \left \frac{x-1288}{27.19} \right }$ | 0.90119 |

나무류림이 분포하는 지형적 특성에 의하여 강수량의 편차가 매우 크게 나타날 수 있으나 소나무림의 경우 전반적으로 최대 출현빈도를 갖는 1,280 mm를, 참나무류림의 경우 1,230 mm를 정점으로 분포하는 경향을 나타냈다.

Table 3은 기상 인자에 따른 단위면적당 출현빈도를 함수식으로 도출한 결과로 모든 인자에서 결정계수(R²)값이 매우 높게 나타났다. 특히, 강수량은 지형인자인 표고 및 경사, 기상인자의 4월 기온 및 연평균 기온과 같은 단일 정점을 보이지는 않았으나 전체적으로 최대 출현 빈도를 중심으로 지수적 증감을 나타내므로 수정가우스 지수식을 사용하여 회귀식을 도출하였다(Table 3).

3) 토양인자

표토 특성, 유효토심, 배수등급, 모재특성과 소나무림 및

참나무류림의 분포 관계를 분석한 결과 소나무림은 양토, 보통 이하의 얇은 토심지역이며 배수가 양호한 화성암 지역에 주로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 참나무류림은 사양토, 보통 이하의 얇은 토심지역이며 배수가 양호한 변성암 지역에 주로 분포하고 있는 것으로 나타났다.

그러나 소나무림 및 참나무류림과 토양인자와의 관계는 동일 기후대 또는 국지적 지역내에서의 생장 정도 및 분포의 비교시 유용한 자료로 활용될 수 있으나 본 연구와 같은 광역적 지역의 분포 특성을 파악하고자 하는 경우 소나무림 및 참나무류림의 분포 확률에 영향을 주는 인자로 활용하기에는 어려운 것으로 판단된다. 토양인자인 표토특성 및 모재특성의 경우 해당 특성을 갖는 지역별 면적비와 소나무 분포비의 뚜렷한 차이가 나타나지 않았고 일부 특성이 나타나는 유효토심, 배수등급의 경우에

Table 4. Distribution of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. stand by soil factors.

| Factor | Stand | | | | |
|----------------------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|--------|
| | <i>Pinus densiflora</i> | | <i>Quercus</i> spp. | | |
| | Area(km ²) | Ratio(%) | Area(km ²) | Ratio(%) | |
| Top soil | Silt clay loam | 91.21 | 0.57 | 4.56 | 0.03 |
| | Silt loam | 2,457.88 | 15.30 | 1,170.33 | 8.74 |
| | Sandy loam | 5,568.78 | 34.66 | 6,577.43 | 49.10 |
| | Fine sandy loam | 8.48 | 0.05 | 1.04 | 0.01 |
| | Clay loam | 175.31 | 1.09 | 47.84 | 0.36 |
| | Loamy sand | 2.52 | 0.02 | 0.18 | 0.00 |
| | Loamy fine sand | 19.69 | 0.12 | 0.03 | 0.00 |
| | Loamy coarse sand | 108.20 | 0.67 | 41.75 | 0.31 |
| | Loam | 6,792.77 | 42.28 | 5,038.25 | 37.61 |
| | N/A | 841.76 | 5.24 | 514.32 | 3.84 |
| | Total | 16,066.60 | 100.00 | 13,395.73 | 100.00 |
| Effective soil depth | Deep | 527.22 | 3.28 | 83.88 | 0.63 |
| | Medium | 7,493.69 | 46.64 | 5,071.16 | 37.86 |
| | Shallow | 3,369.95 | 20.97 | 3,778.05 | 28.20 |
| | Very shallow | 3,833.98 | 23.86 | 3,948.32 | 29.47 |
| | N/A | 841.76 | 5.24 | 514.32 | 3.84 |
| | Total | 16,066.60 | 100.00 | 13,395.73 | 100.00 |
| Drainage class | 1 | 10,037.48 | 62.47 | 10,564.50 | 78.86 |
| | 2 | 4,869.23 | 30.31 | 2,336.87 | 17.44 |
| | 3 | 245.77 | 1.53 | 42.08 | 0.31 |
| | 4 | 163.97 | 1.02 | 23.16 | 0.17 |
| | 5 | 6.53 | 0.04 | 0.20 | 0.00 |
| | 6 | 29.00 | 0.18 | 4.65 | 0.03 |
| | N/A | 714.62 | 4.45 | 424.27 | 3.17 |
| | Total | 16,066.60 | 100.00 | 13,395.73 | 100.00 |
| Parent rock | Metamorphic | 4,227.57 | 26.31 | 6,264.12 | 46.76 |
| | Tertiary | 53.87 | 0.34 | 1.69 | 0.01 |
| | Quaternary | 109.05 | 0.68 | 6.73 | 0.05 |
| | Sedimentary | 3,014.57 | 18.76 | 1,197.45 | 8.94 |
| | Volcanic rock | 0.09 | 0.00 | 0.04 | 0.00 |
| | Igneous rock | 7,819.69 | 48.67 | 5,411.38 | 40.40 |
| | N/A | 841.76 | 5.24 | 514.32 | 3.84 |
| | Total | 16,066.60 | 100.00 | 13,395.73 | 100.00 |

도 정량화가 어려우며 소나무의 생육에 직접적인 영향을 준다고 보기는 어려울 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 제주도를 제외한 우리나라 전역의 소나무림과 참나무림의 공간 분포와 지형, 기상, 토양인자 등간의 영향기작을 공간적인 분석을 통해 밝히고, 이를 기반으로 소나무림 및 참나무림의 생육에 적합한 입지 환경 조건을 제시하기 위해 수행되었다. 본 연구를 통하여 전국 단위의 소나무림 및 참나무림의 공간분포도가 100 m×100 m 래스터자료로 구축되었으며, 공간분포의 특성을 지형, 기상, 토양 인자와 연계하여 규명하고 출현 빈도

지수 함수식을 작성하였다.

소나무림의 경우 참나무림에 비하여 상대적으로 표고가 낮고 경사도가 완만하며 기온이 높은 지역에 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 소나무림은 양토, 보통 이하의 얇은 토심지역이며 배수가 양호한 화성암 지역에 주로 분포한 반면, 참나무림은 사양토, 보통 이하의 얇은 토심지역이며 배수가 양호한 변성암 지역에 주로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이상과 같은 지리형태학적 인자에 따른 소나무림과 참나무림의 공간분포 패턴을 회귀식으로 도출한 결과 통계적 유의성이 매우 높게 나타났다. 이러한 소나무 및 참나무의 생장에 미치는 인자별 특성에 대한 분석 결과는 향후 소나무 및 참나무류의 식재 및 갱신에 적합한 지역의 선정과 제반 입지 조건

별 산림 관리 계획 수립시에 참조자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 지원으로 이루어진 국제공동연구인 “공간통계학적 기법에 의한 소나무림과 참나무림의 공간분포 및 출현확률모델(과제번호: KOSEF FO 1-2003-000-00083-0)의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부임.

인용문헌

1. 광두안, 이우균, 김상우, 서정호. 2004. 소나무 수고 및 수간형태의 지역별 차이에 관한 연구. 한국산림측정학회지 7(1): 49-60.
2. 권세혁. 2004. SAS 활용 다변량 분석. 자유아카데미. 파주시. pp. 281.
3. 김성덕, 김윤동. 1995. 점봉산 신갈나무(*Quercus mongolica* Fisher)림의 갱신과정에 관한 연구. 한국임학회지 84(4): 447-455.
4. 김성덕, 송호경. 1995. 경북 불영계곡 소나무(*Pinus densiflora*)림의 재생과정에 관한 연구. 한국임학회지 84(2): 258-265.
5. 김지홍, 이돈구, 김진수, 이경준, 현정오, 황재우, 권기원. 1993. 참나무 천연림의 임분 구조에 대한 해석. 한국임학회지 82(3): 235-245.
6. 김진수, 이석우. 1992. 강원경북지역 소나무 천연집단의 유전적 구조. 한국육종학회지 24: 48-60.
7. 김진수, 홍용표. 1982. 소나무의 몇가지 다형적 동위효소 유전분석 (1). 한국임학회지 58: 1-7.
8. 김진수, 이석우, 황재우, 권기원. 1993. 금강 소나무 - 유전적으로 별개의 품종으로 인정될 수 있는가? -동위효소분석 결과에 의한 고찰- 한국임학회지 82(2): 166-175.
9. 농림부. 2000. 강송림(*Pinus densiflora* for. *erecta* Uyeki)의 생태종 개발에 관한 연구. pp. 286.
10. 서정호, 이우균, 손요환, 함보영. 2001. 안면도 소나무 임분의 동적 성장모델, 한국임학회지90(6): 725-733.
11. 손두식, 박상준, 황재우. 1990a. 소나무 및 곰솔의 수지구 지수에 따른 침엽구과 및 종자의 형태적 특성과 동위효소의 변이. 한국임학회지 79(4): 424-430.
12. 손두식, 최철용, 박상준. 1990b. 곰솔과 소나무의 천연잡종으로 추정되는 잡종소나무의 특성. 한국임학회지 79(2): 127-137.
13. 손영모, 이경학, 정영교, 이우균. 1998. 강원도산 소나무의 수피두께 및 수피율, 한국산림측정학회지 1(2): 64-69.
14. 손영모, 이경학, 정영교, 이우균. 1999. 강원지방소나무의 개체목 수간곡선 및 재적추정 시스템, 산림과학논문집 62: 156-167.
15. 손영모, 이경학, 이우균, 권순덕. 2000. 우리나라 주요 6수종의 수간곡선식. 한국임학회지 91(2): 213-218.
16. 송철철, 변우혁, 이우균. 1995. 직경생장패턴에 따른 강원도 소나무의 생장권역 구분, 한국임학회지 84(1): 71-76.
17. 송호경, 김성덕, 장규관. 1995a. TWINSpan과 DCCA에 의한 금강소나무 및 춘양소나무 군집과 환경의 상관관계분석. 한국임학회지 84(2): 266-274.
18. 송호경, 장규관, 김성덕. 1995b. TWINSpan과 DCCA에 의한 신갈나무군집과 환경의 상관 관계분석. 한국임학회지 84(3): 299-305.
19. 송호경, 장규관. 1997. 소나무림과 신갈나무림의 흉고직경급과 천이에 관한 연구. 한국임학회지 86(2): 223-232.
20. 윤충원. 1999. 금강소나무의 식생구조와 개체군 동태 및 형태적 특성. 경북대학교 대학원 박사학위논문. pp 147.
21. 이우균. 1994. Spline 함수와 선형방정식을 이용한 수간 및 임분 간곡선 모델, 한국임학회지83(1): 63-74.
22. 이우균. 1996a. 위치중속임분조사에 의한 개체목의 경쟁지수 및 흉고직경생장추정, 한국임학회지 85(3): 539-551.
23. 이우균. 1996b. 강원도지역 소나무의 임분의 임분 및 일반 수고-흉고직경곡선 모델, 산림경제연구 4(2): 66-78.
24. 이우균. 1999. 소나무-참나무류 혼효림의 단목성장모델 개발. 한국과학재단 핵심연구 최종보고.
25. 이우균, 서정호, 배상원. 2000. 강원도 지방 소나무 동령 임분의 최대입목본수모델, 한국임학회지 89(5): 634-644.
26. 이우철, 이철환. 1989. 한국산 소나무림의 식물사회학적 연구. 한국생태학회지 12(4): 257-284.
27. 장규관, 송호경, 김성덕. 1997. 식물사회학적 방법과 TWINSpan에 의한 강원도 신갈나무림의 분류에 관한 연구. 한국임학회지 86(2): 214-222.
28. 조재창. 1994. 울진군 소광리지역 소나무임분구조 및 성장양상과 산불과의 관계. 서울대학교대학원 박사학위 논문. pp. 101.
29. 함보영, 이우균, 정재서, 이준학. 2004. IKONOS영상과 GIS를 이용한 참나무류의 공간분포 및 출현확률추정. 한국산림측정학회지 7(1): 74-84.
30. 환경부. 1997. 금강소나무 분포 정밀조사 -경북 내륙지역 중심으로-. pp. 91.
31. 환경부. 2004. 자연환경현황 GIS-DB구축 결과보고서.
32. De Fouquet, C. and Mandallaz, D. 1993. Using geostatistics for forestry inventory with air cover: An example. In Geostatistics Troia '92. Soares. A. Ed. Kluwer Academic Publisher. Amsterdam, pp. 975-886.
33. Hershey, R.R. 2000. Modelling the spatial distribution of ten tree species in Pennsylvania, pp. 119-135 in Quantifying spatial uncertainty in natural resources. Mowrer, H.T., Congalton, R.G., 2000. Ann Arbor Press, pp. 244.
34. Hershey, R.R. and Drake, D.A. 1997. Using geostatistical techniques to map the distribution of tree species from ground inventory data, pp. 187-198 in Modelling Longitudinal and Spatially Correlated Data: Methods, Applications, and Future Directions. Lecture Notes in Statistics, 122, T.G. Gregoire et al., Eds., Springer Verlag, New York. pp. 402.
35. Kim, J.W. 1996. Floristic Characterization of the temperate oak forests in the Korean peninsula using high-rank

- Taxa. *J. Plant Biology*. 39(2): 149-159.
36. Kim, J.W., Lee, D.I. and Kim, W. 1995. Minimal areas and community structures of *Pinus densiflora* Forests and *Quercus mongolica* Forests. *Korean J. Ecology*. 18(4): 451-462.
37. Lee, J.H., Lee, W.K., Jun, E.J., Kim, S.W. and Kwak, D.A. 2003. Regional Level Impact of Global Warming on the Distribution of Oak Stands in Central Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research*(제47기 학회) 17(2): 135-138.
38. Lee, W.K., Seo, J.H., Son, Y.M., Lee, K.H. and Gadow, K.v. 2003. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. *Forest Ecology and Management* 172: 69-77.
39. Lee, W.K., Gadow, K.v., Chung, D.J. and Lee, J.L. 2004. Dbh-growth model of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* mixed stands in central Korea. *Ecological modeling*. 176(1/2): 187-200.
40. Lee, W.K., Biging, G.S., Son, Y., Byun, W.H., Lee, K.H., Son, Y.M. and Seo, J.H. 2006. Geostatistical analysis of regional differences in stem taper form of *Pinus densiflora* in central Korea. *Ecological Research*, in print.
41. Mandallaz, D. 1994. Geostatistical methods for double sampling schemes: application to combined forestry inventory. Chair of Forest Management and Planning, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
42. Palmer, M.W. 1988. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetation* 75(1-2): 91-102.
43. Payn, T.W. and Clough, M.E. 1988. Differential fertilization on pine plantations on acid forest soils. *S. Afr. For. J.* 147: 16-25.
44. Ramirez, M.H. 1988. On relevance of geostatistical theory and methods of forest inventory problems. Ph.D. Thesis, University of Georgia.
45. Rossi, R.E., Mulla, D.J., Journel, A.G. and Franz, E.H. 1992. Geostatistical tools for modelling and interpreting ecological spatial dependence, *Ecology. Monogr.* 62(2): 277-314.
46. Samra, J.S., Gill, M.S. and Bhatia, V.K. 1989. Spatial stochastic modelling of growth and forest resource evaluation. *Forestry Science*. 35(3): 663-676.

(2006년 7월 27일 접수; 2006년 11월 17일 채택)