

원격탐사자료를 이용한 참나무시들음병 피해목의 공간분포특성 분석

차성은¹ · 이우균^{1*} · 김문일¹ · 이슬기¹ · 조현우¹ · 최원일²

¹고려대학교 환경생태공학과, ²국립산림과학원 산림병해충연구과

Characterizing the Spatial Distribution of Oak Wilt Disease Using Remote Sensing Data

Sungeun Cha¹, Woo-Kyun Lee^{1*}, Moonil Kim¹, Sle-Gee Lee¹, Hyun-Woo Jo¹ and Won-Il Choi²

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Division of Forest Insect Pest and Disease, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 본 연구는 참나무시들음병이 수도권에 피해가 집중되어 있는 점을 고려해 북한산, 청계산, 수리산의 시계열 항공사진을 사용하여 감독분류기법(supervised classification)으로 피해목을 분류하였으며, 피해지의 공간적인 특성을 분석하기 위해 피해목 위치의 지형적 특성을 통계처리 하여 고도와 경사와의 밀접한 상관관계를 확인하였다. 또한, Moran's I 통계 분석을 이용한 북한산의 Moran's I 값은 2009, 2010, 2012년 각 0.25, 0.32, 0.24, 청계산은 2010, 2012, 2014년 각 0.26, 0.32, 0.22, 수리산은 2012, 2014년 각 0.42, 0.42의 값을 갖으며, 이는 피해목이 군집하여 분포함을 의미한다. 아울러, 피해목 군집의 이동성을 파악하기 위해 hotspot 분석을 실시하여 시계열적으로 hotspot이 이동하는 특성을 확인하였다. 참나무시들음병의 전체 hotspot 면적(z-score>1.65) 중 고도 200~400 m, 경사 20~40°에 분포하는 활엽수 및 혼효림에서의 발생비율은 약 80%로 나타났다. 이는 미래의 피해지역 hotspot은 상기의 지형 및 임상조건에서 발생 또는 이동될 수 있음을 시사한다. 본 연구의 결과는 참나무시들음병의 이동경로 예측의 기초자료로 이용될 수 있으며, 향후 병해충 피해의 사전 방제 및 시스템 구축에 사용될 수 있다.

Abstract: This study categorized the damaged trees by Supervised Classification using time-series-aerial photographs of Bukhan, Cheonggae and Suri mountains because oak wilt disease seemed to be concentrated in the metropolitan regions. In order to analyze the spatial characteristics of the damaged areas, the geographical characteristics such as elevation and slope were statistically analyzed to confirm their strong correlation. Based on the results from the statistical analysis of Moran's I, we have retrieved the following: (i) the value of Moran's I in Bukhan mountain is estimated to be 0.25, 0.32, and 0.24 in 2009, 2010 and 2012, respectively. (ii) the value of Moran's I in Cheonggye mountain estimated to be 0.26, 0.32 and 0.22 in 2010, 2012 and 2014, respectively and (iii) the value of Moran's I in Suri mountain estimated to be 0.42 and 0.42 in 2012 and 2014, respectively. These numbers suggest that the damaged trees are distributed in clusters. In addition, we conducted hotspot analysis to identify how the damaged tree clusters shift over time and we were able to verify that hotspots move in time series. According to our research outcome from the analysis of the entire hotspot areas (z-score>1.65), there were 80 percent probability of oak wilt disease occurring in the broadleaf or mixed-stand forests with elevation of 200~400 m and slope of 20~40 degrees. This result indicates that oak wilt disease hotspots can occur or shift into areas with the above geographical features or forest conditions. Therefore, this research outcome can be used as a basic resource when predicting the oak wilt disease spread-patterns, and it can also prevent disease and insect pest related harms to assist the policy makers to better implement the necessary solutions.

Key words: oak wilt disease, aerial photographs, geographical features, Moran's I statistical analysis, hotspot analysis

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

서론

우리나라에서 처음 발견된 참나무시들음병은 일본의 참나무시들음병과 비슷한 증상으로 대경목의 참나무가 한여름에 일시적으로 말라죽는 현상을 말한다. 참나무시들음병은 긴나무좀과에 속하는 광릉긴나무좀(*Platypus koryoensis*)의 공생균인 *Raffaelea quercivola*에 의해 발생하며, 식염성 해충이나 뿌리썩음병 등의 고사형태와는 공통적인 요인이 밝혀져 있지 않았다(Kim, 2005). 전체 피해목 중 약 77%가 수도권에 집중되어 있는 참나무시들음병은 적극적 방제노력에도 피해목의 수가 2010년 약 181,000본에서 2013년 약 309,000본으로 많아지고 있으며(Park, 2014), 참나무의 분포가 넓은 경기도와 남부 지역으로 확대되는 추세에 있다. 참나무시들음병의 방제를 위해 다양한 방법이 사용되고 있지만 아직 완벽한 방제 방법이 개발되지 않아, 우리나라 산림에 큰 피해를 입히고 있다.

참나무시들음병 방제에 사용되는 방법으로는 metam-sodium 벌채훈증방법, 우화시기에 살충제 살포방법, 훈증약제주사방법, 소구역 모두 베기방법 등이 있으며, 일부 방법에서 효과가 입증되기는 했지만, 낮은 살충율과 산악 지형에서의 고사목 접근성 등 근본적인 병의 진단 및 예방에 어려운 실정이다(Choi, 2010; Park et al., 2015). 참나무시들음병의 종합적 방제 및 관리시스템을 구축하기 위해서는 넓은 면적에서의 피해목의 공간분포특성에 대한 기초연구가 필요하며, 피해목 중에서 육안 판독이 가능한 고사목의 위치정보는 고해상도 위성사진 혹은 항공사진 등의 영상자료를 통하여 획득할 수 있다

(Yeum et al., 2013). Kim 등(2014)은 2006년 수락산 지역 참나무시들음병 피해목의 hotspot과 지형인자의 상관성을 추정하였다. 하지만, 피해목의 일 년치의 통계자료를 사용했다는 점과 단일 대상지역을 조사했다는 점 등 현지조사의 한계로 인해 다양한 공간분석을 수행하는데 제한적이었다.

본 연구에서는 북한산, 청계산, 수리산 지역에서 다양한 시점의 시계열 항공사진을 확보하여 피해목을 탐지하였다. 또한, 고도, 경사, 사면에 대한 주제도를 작성하여 통계분석을 실시해 분류된 피해목의 지형적인 특성을 확인하고, Moran's I 통계분석을 통해 피해목의 군집도를 확인하였다. 피해목 군집의 공간분포를 확인하기 위해 hotspot 분석을 실시하여 hotspot의 공간적인 이동성이 있음을 모의하였으며, 참나무시들음병에 영향을 주는 지형 요인 및 임상과의 관계를 확인하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 재료

연구 대상지는 2010년도에 가장 참나무시들음병에 피해가 뚜렷하게 나타난 북한산과 청계산 일부, 그리고 2017년 현재 참나무시들음병의 확산으로 인해 고사목의 수가 증가하고 있는 수리산 일부를 선정하였다(Figure 1). 총 연구대상지 면적은 약 1,905 ha이며(북한산, 청계산, 수리산 각 635 ha), 1 pixel에 대한 공간해상도는 0.25×0.25 m이다. 아울러, 피해목의 분광특성을 고려하여 탐지하기 위해 사용된 항공사진은 식생이 풍부하지만 단풍의 영향

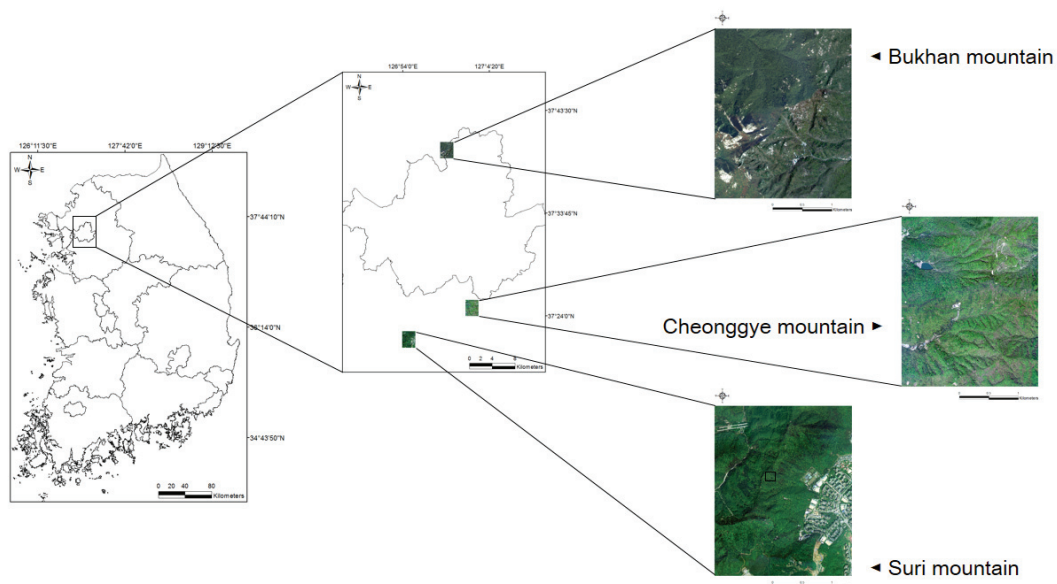


Figure 1. Map of study areas.

Table 1. Spectral characteristics of damaged trees extracted from aerial photographs by year.

Research Area	Spectral characteristics (year)		
Bukhan mountain	R: 0.410~0.450, G: 0.218~0.248, B: 0.337~0.420 (2009)	R: 0.395~0.616, G: 0.280~0.536, B: 0.341~0.520 (2010)	R: 0.412~0.488, G: 0.285~0.364, B: 0.365~0.425 (2012)
Cheonggye mountain	R: 0.509~0.608, G: 0.392~0.512, B: 0.478~0.644 (2010)	R: 0.487~0.524, G: 0.312~0.416, B: 0.465~0.524 (2012)	R: 0.459~0.569, G: 0.292~0.360, B: 0.454~0.550 (2014)
Suri mountain	R: 0.438~0.688, G: 0.306~0.454, B: 0.401~0.603 (2012)	R: 0.458~0.552, G: 0.285~0.397, B: 0.422~0.488 (2014)	

*R, G and B refer to Red, Green and Blue band respectively.

을 받지 않는 시기를 고려하여 7-9월의 영상을 사용하였다. 연구대상지역별 시계열 항공사진에 나타난 피해목의 분광특성을 Table 1에 제시하였다. 북한산 피해목의 분광특성은 red band에서 0.395~0.616, green band에서 0.218~0.536, blue band에서 0.337~0.520 범위의 분광값이, 청계산의 경우, red band에서 0.459~0.608, green band에서 0.292~0.512, green band에서 0.454~0.644 범위의 분광값이, 수리산은 red band에서 0.438~0.688, green band에서 0.285~0.454, blue band에서 0.401~0.603 범위의 분광값이 추출되었다. 촬영 당시 기상조건과 카메라의 성능 등의 이유로 연구대상지역별 시계열 항공사진의 red, green, blue band의 값의 범위가 다소 차이가 있으나, 피해목 분류에는 영향을 미치지 않았다.

항공사진에서의 피해목 분광특성 값을 설정하기 위해 현장 답사를 통한 피해목의 지리적 위치 정보(Global Positioning System; GPS)를 추출하였다. GPS는 Garmin GPS Map 64 기기를 이용하여 오차가 1 m 이내인 범위의 자료를 사용하였으며, 추출된 피해목의 GPS를 항공사진과 동일한 좌표계로 설정하였다. 또한, 본 연구에서는 참나무시들음병의 시계열 공간특성을 분석하기 위해 북한산(2009, 2010, 2012년), 청계산(2010, 2012, 2014년), 수리산(2012, 2014년)의 항공사진과 대상지역의 1:5,000 수치지도를 사용하였다.

분석방법

1. 참나무시들음병 피해목 분류

영상분류기법(image classification)은 원격탐사 분야에서 가장 보편화된 분석 중의 하나로 각 픽셀을 몇 개의 집단으로 할당하는 방법이다(Dietterich, 1998). 본 연구에서는 현장조사를 통해 획득한 피해목의 GPS와 북한산(2009, 2010, 2012년), 청계산(2010, 2012, 2014년), 수리산(2012, 2014년)의 시계열 항공사진에서 공통으로 선정된 피해목을 기준으로 분광특성에 대한 훈련지역들을 생성하였다. 훈련지역은 피해목, 나지, 활엽수림(I, II), 침엽수림으로 총 5개의 지역을 선정하였으며, 추출한 분광특성들에 maximum likelihood 기법을 적용한 감독분류를 실시하여 피해목을 분류하였다(Figure 2).

2. 지형인자 분석

참나무시들음병 피해목 분포의 지형인자별 특성을 파악하기 위하여 Kim 등(1995)과 Kelly(2003)의 선행연구를 통해 참나무시들음병 분포에 영향력이 높은 인자로 밝혀진 고도, 경사, 사면을 고려하였다. 먼저, 고도에 대한 주제도를 작성하기 위해 수치지형도를 이용해 불규칙삼각망(Triangulated Irregular Network; TIN)을 작성하고, 이를 자연 근접 보간법(natural neighbor interpolation)을

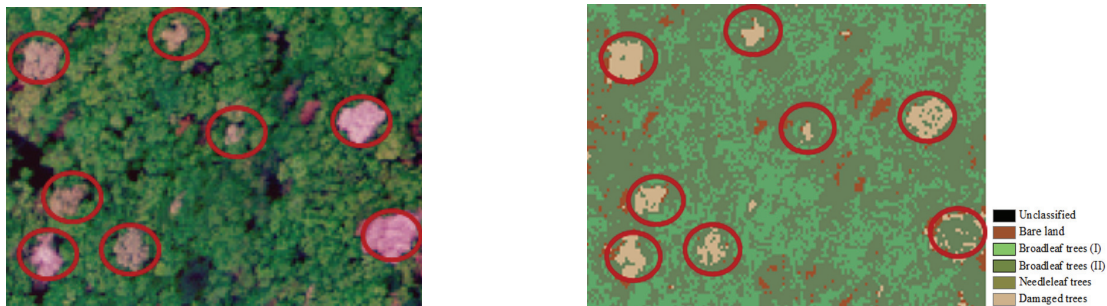


Figure 2. Classification of damaged trees using geo-spatial data.

통해 연구대상지에 대한 DEM을 작성하였다. 경사의 경우, Burrough와 McDonell(1998)에 의해 개발된 식 1을 적용하여 계산된 값을 이용해 주제도를 작성하였다. 식 1은 3×3 moving window 기반으로 계산되었으며, 이 식은 수평적인 방향의 경사를 고려한 dz/dx와 수직적인 방향의 경사를 고려한 dz/dy를 모두 포함하고 있다.

$$Slope (degree) = \text{ArcTAN}(\sqrt{[(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2]}) * 57.29578 \quad (1)$$

여기서 57.29578은 180/pi를 수치화 한 것임.

사면은 Dubayah(1994)에 의해 개발된 식 2로부터 계산된 값을 이용하여 주제도를 작성하였다. 식 2에서 θ 는 태양천정의 각(solar zenith angle), ϕ 는 태양각(solar azimuth), S는 사면 경사(slope of the terrain)이며, A는 사면 방향(aspect of the slope)을 의미한다.

$$Aspect = \cos \theta \cos S + \sin \theta \cos(\phi - A) \quad (2)$$

3. 공간분포특성 분석

1) Moran's I 통계분석

피해목의 공간분포특성을 분석하기 위해 자기상관 지수인 Moran's I를 계산하였다. Moran's I는 이웃한 개체들의 유사성을 측정하기 위한 통계치로 대상 개체와 이웃 개체들의 속성치를 전체 자료집합의 평균치와 비교한 정량적인 지수이다. 분석 결과 값은 -1부터 1까지 산출되며, 0보다 크면 분석 대상의 공간분포가 집결된 군집 패턴(clustered pattern)을, 0보다 작으면 분산된 패턴(dispersed pattern)을, 0에 근접하면 일정한 패턴이 없는 무작위 패턴(random pattern)을 갖는다는 것을 의미한다(Goodchild, 1986; Griffith, 1987)(식 3). 본 연구에 사용한 Moran's I 값은 1 pixel(50×50 m)안의 피해목 수를 기준으로 계산하였다. 식 3에서 $w_{i,j}$ 는 feature i와 j 사이의 공간 가중치를, n은 feature의 총 개수를 의미한다.

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j w_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{i,j} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

2) Hotspot 지역 및 이동성 분석

공간통계기법인 hotspot 분석은 Getis와 Ord(1992)에 의하여 개발된 통계기법으로 지형 및 지리 등 주변 환경적 변인들을 공간적으로 군집한 지역(hotspot)과 분산된

지역(coldspot)으로 표현해주는 방법이다(Cáceres, 2011; Brown et al., 2015). 본 연구는 pixel(50×50 m) 당 피해목 수를 기준으로, Getis-Ord G_i^* 통계를 이용하여 표준정규분포(standard normalized distribution)로 나타내었으며, 피해목 위치에 대한 시계열 데이터의 통계치를 분석함으로써 참나무시들음병의 피해가 집중되는 지역을 파악하였다(Ebdon, 1985; Getis and Ord, 1992). 식 4의 G_i 는 피해목에 대한 z-score를 계산하는데 사용된 식이다. 식에서 \bar{X} 는 피해목 수에 대한 모평균, S는 모평균에 대한 표준편차, n은 전체 피해목의 수를, $x_j, j, w_{i,j}$ 는 i와 j 사이의 공간 가중치를 의미한다. 아울러, z-score의 값이 1.65(p-value<0.10) 이상이면 hotspot이며, 피해목이 집중되어 있음을 의미하고, 반대로 z-score 값이 -1.65(p-value<0.10) 이하이면 coldspot으로 피해목이 분산되어 있음을 의미한다.

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j}\right)^2}{n-1}}} \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

G_i 통계값은 z-score이므로, 더 이상 계산할 필요가 없음.

결과 및 고찰

1. 참나무시들음병 피해목 분류 결과

본 연구에서는 픽셀단위로 분류된 참나무시들음병의 피해목 자료를 육안판독(visual interpretation)하여 중심점을 선택하였으며, 위치(point) 데이터 형태로 전환하여 통계 처리한 결과를 Figure 3에 표시하였다. 북한산의 경우, 2010년에 1,013본으로 2009년 910본, 2012년 903본에 비해 피해목이 더 많이 분포하였으며, 2012년에 피해목이 줄어든 이유는 2010년 북한산에서 집중적으로 시작되었던 방제작업의 결과로 사료된다(Park, 2014). 청계산은 해가 지남에 따라 지속적인 방제작업으로 2010년 946본에서 2012년 603본, 2014년 405본으로 피해목 수가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 다른 대상지보다 남쪽에 위치한 수리산에서는 방제 작업으로 인한 피해목의

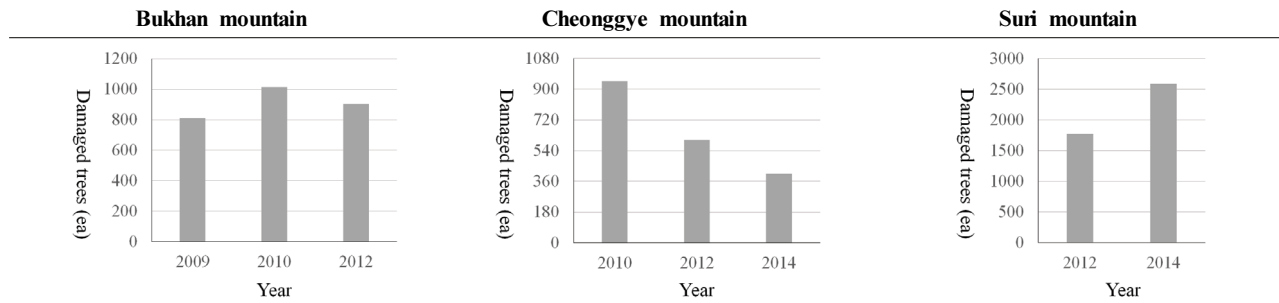


Figure 3. Effect of oak wilt disease through time series of aerial photographs.

감소량보다 확산량이 더 많았던 것으로 추정되며, 따라서 2012년 1,770본에서 2014년 2,590본으로 오히려 증가한 것을 확인하였다.

2. 참나무시들음병 발생과 지형인자 간의 관계

피해목과 지형인자와의 관계를 확인하기 위해, 위치(point) 데이터로 분류한 피해목과 작성된 지형 주제도 정보를 통계 분석하였다(Table 2, 3, 4). 침엽수림과 비산림지역에서는 참나무시들음병이 발생할 수 없으므로, 1:5,000 수치 임상도에서 나타난 참나무림과 호효림만을 추출하여 면적을 산출하였다. 또한, 각 산의 지형적 특징에 따라 분석결과가 달라질 수 있으므로, 단위 면적당

피해목 수를 산출하여 비교에 용이하게 하였다. 그 예로, Table 2에서 고도 100~200 m에 해당하는 면적은 973.09 ha이고, 300~400 m에 해당하는 면적 또한 비슷한 수치인 959.41 ha이다. 하지만, 피해목의 수는 100~200 m에서 1,182본이며, 300~400 m에서는 월등히 많은 2,774본이다. 결과적으로, 면적당 피해목(%)이 가장 높게 나타난 범위는 고도 200~400 m, 경사 20~40°, 방위는 남동사면과 남사면이며, 각 범위에서 약 56%, 51%, 34%의 피해목이 분포하였다. 고도와 경사의 경우, 상기 범위에서 50% 이상의 피해목이 집중되어 있는 것을 확인하였지만, 사면별 피해목 분포의 차이는 미미한 것으로 판단되었다. 또한, Kelly와 Meentemeyer(2002)는 2001년 미국

Table 2. Effect of oak wilt disease by elevation of the study areas.

DEM (m)	(a) Damaged trees (ea)	(b) Broadleaf and mixed stand forest areas (ha)	(a)/(b) (ea/ha (%))
0~100	2	124.52	0.02 (0.19)
100~200	1,182	973.09	1.21 (11.32)
200~300	3,708	1,201.25	3.09 (28.91)
300~400	2,774	959.41	2.89 (27.03)
400~500	1,154	654.25	1.76 (16.46)
500~600	197	153.96	1.28 (11.97)
600~700	17	55.80	0.30 (2.81)
700~800	6	43.32	0.14 (1.31)

*NB: ea is the total number of damaged trees.

Table 3. Effect of oak wilt disease by slope of the study areas.

Slope (°)	(a) Damaged trees (ea)	(b) Broadleaf and mixed stand forest areas (ha)	(a)/(b) (ea/ha (%))
0~10	149	254.50	0.59 (6.21)
10~20	1,618	903.07	1.79 (18.84)
20~30	4,069	1,631.25	2.49 (26.21)
30~40	2,483	1,059.03	2.34 (24.63)
40~50	660	370.57	1.78 (18.74)
50~60	58	123.07	0.47 (4.95)
60~70	3	85.12	0.04 (0.42)
70~80	0	43.79	0 (0)

*NB: ea is the total number of damaged trees.

Table 4. Effect of oak wilt disease by aspect of the study areas.

Aspect (0~360 degree)	(a) Damaged trees (ea)	(b) Broadleaf and mixed stand forest areas (ha)	(a)/(b) (ea/ha (%))
337.5~22.5 (North)	960	814.93	1.18 (7.36)
22.5~67.5 (Northeast)	1,069	553.02	1.93 (12.05)
67.5~112.5 (East)	1,259	599.24	2.10 (13.11)
112.5~157.5 (Southeast)	1,632	591.11	2.76 (17.23)
157.5~202.5 (South)	1,382	513.83	2.69 (16.79)
202.5~247.5 (Southwest)	838	494.53	1.69 (10.55)
247.5~292.5 (West)	871	479.94	1.81 (11.30)
292.5~337.5 (Northwest)	1,029	552.06	1.86 (11.61)

*NB: ea is the total number of damaged trees.

캘리포니아 지역의 참나무시들음병 피해목 2,000본에 대한 연구에서 피해목들이 고도에 따라 다르게 분포하는 특성을 모의하였다. 그리고 Kim 등(2014)은 2006년 수락산 지역의 참나무시들음병 피해목 10,919본에 대한 피해강도별 위치정보와 피해목이 집중되어있는 지역(hotspot)의 지형인자(고도, 경사, 사면)를 분석하였다. 그 결과, 피해목은 고도 200~400 m에서 약 78%, 경사 20~40°에서 약 82%, 남향에서 약 31%로 분포하였다. 이를 통해, 참나무시들음병은 특정 범위의 지형인자(고도, 경사, 사면 등)의 면적에서 발생할 가능성이 높음을 확인할 수 있다.

3. 참나무시들음병 발생의 공간분포특성(Moran's I 통계 분석)

공간적 위치를 고려한 공간분포 특성을 하나의 지수로 산출하기 위해 Moran's I를 사용하였다. 피해목의 위치(point) 데이터를 기반으로 조사된 북한산의 Moran's I 값은 2009, 2010, 2012년 각 0.25, 0.32, 0.24, 청계산은 2010, 2012, 2014년 각 0.26, 0.32, 0.22, 수리산은 2012, 2014년 각 0.42, 0.42의 값을 갖는다(Table 5). 수리산의 경우, 북한산과 청계산보다 군집도가 높으며, 시계열적인 군집도의 변화가 없었다. 북한산과 청계산의 경우, 2010년과 2012년도에 각각 군집도가 높아졌다가 그 이후에 다시 이전 수준으로 낮아졌다. 이는 2010년 이후 북한산과 청계산에서 집중적으로 진행된 참나무시들음병 피해

목 방제작업의 영향으로 사료된다(Lee, 2010).

결과 값에 대한 z-score는 모든 경우에서 2.58보다 높아, 결과 값은 1% 이내(p-value<0.01)의 확률로 유의하다. 또한, Kelly와 Meentemeyer(2002)는 미국 캘리포니아 지역의 참나무시들음병 피해목에 대해 군집도 분석을 수행한 결과, 모든 지역에서 피해목들이 군집하여 분포함을 밝혔다. 상기 결과를 통해 참나무시들음병 피해목이 공간적으로 군집하여 분포하는 특성을 확인할 수 있다.

4. 참나무시들음병 Hotspot의 이동성

북한산의 경우, 2009년에 피해목이 집중되어 있는 hotspot은 동, 남동, 북서쪽에 분산되어 있는 것이 확인되었다. 2010년에는 hotspot이 동, 남동쪽에 집중되어 분포하였고, 2012년에는 남서, 북동쪽으로 이동하였음을 확인하였다. 청계산의 경우, 2010년에는 남서, 북동, 북서쪽에 hotspot이 분산되어 분포하다가 2012년에는 북동쪽에 집중되어 분포하게 된다. 2014년에는 다시 산발되어 남동, 북, 북동, 북서쪽으로 이동하였다. 수리산은 2014년에 남서, 북, 북동쪽에 hotspot이 집중되어 있다가 2014년에는 북동, 북서쪽으로 분포가 달라진 것을 확인하였다. 따라서 피해목이 집중되어있는 hotspot은 모든 대상지의 시계열 데이터에서 이동하는 특성을 보였다. 하지만, 연구 대상지의 작은 면적과 단기간의 항공사진을 사용했다는 점 등의 이유로 hotspot의 시계열적 이동패턴을 규명하기에는 한계가 있었다(Figure 4).

Table 5. Moran's I index value by year in study areas.

Research Area	Moran's I index (year)		
Bukhan mountain	0.25 (2009)	0.32 (2010)	0.24 (2012)
Cheonggye mountain	0.26 (2010)	0.32 (2012)	0.22 (2014)
Suri mountain	0.42 (2012)	0.42 (2014)	

*For all values z-score>2.58 and p-value<0.01.

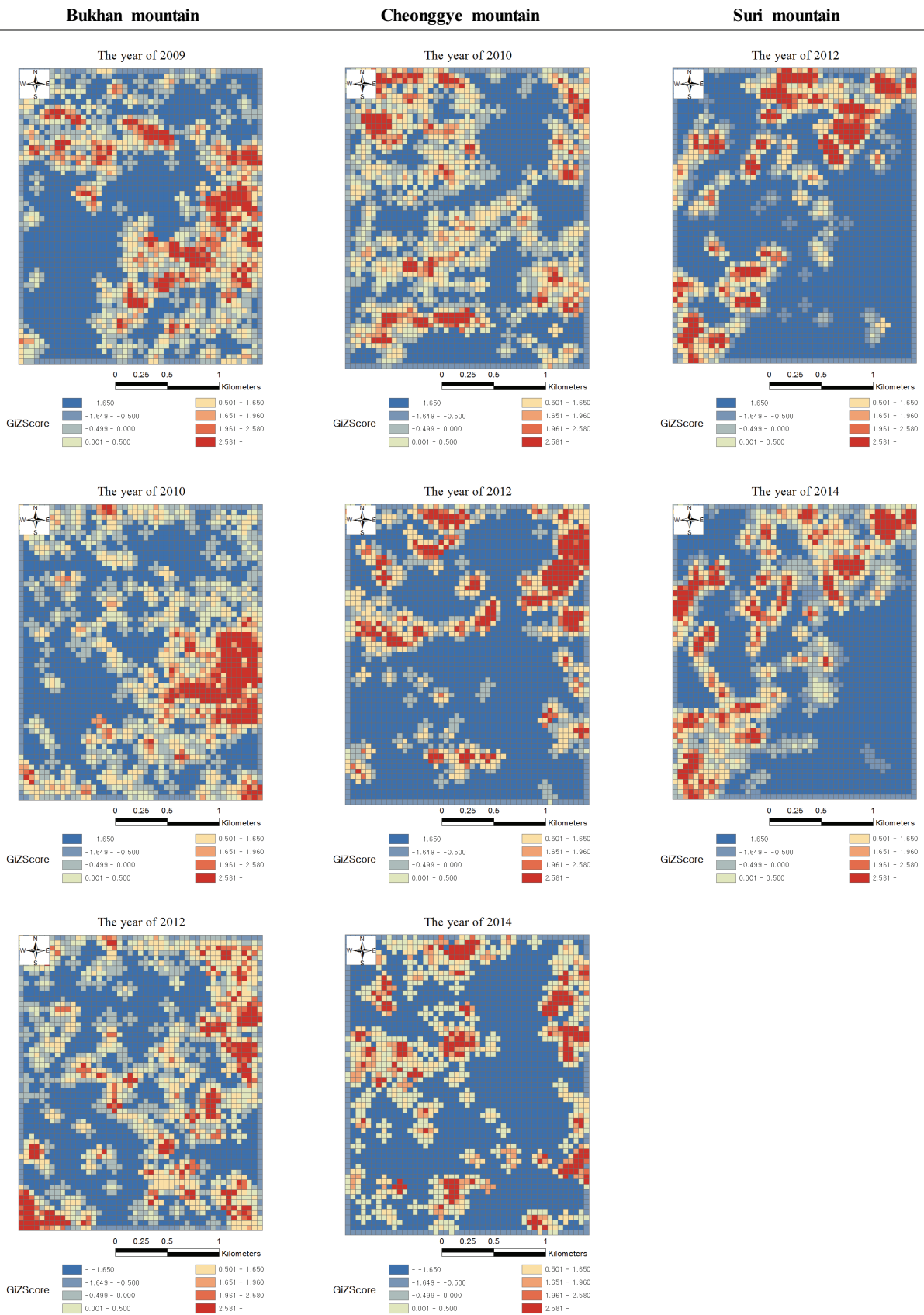


Figure 4. Analyzing the hotspot movement on different time series of aerial photographs.

5. 지형인자와 임상을 고려한 참나무시들음병 발생가능지 예측

본 연구에서는 피해목이 집중된 hotspot의 공간적인 특성에 대한 이동성을 분석하기 위해 특정 범위의 지형인자와 임상의 면적을 추출하였다. 지형인자에서 피해목의 밀도가 높은 범위(고도: 200~400 m, 경사: 20~40°)에 해당하는 면적과 1:5,000 수치 임상도 중 참나무시들음병 피해목이 약 85% 이상이 집중되어 있는 활엽수림 및 혼효림에 대한 면적에서 공통으로 포함되는 면적을 추출하였으며, 실제로 hotspot이 특정 지형인자와 임상에 분포하는지를 모의하였다. 그 결과, 참나무시들음병의 피해는 모든 지역의 시계열 데이터의 지형인자와 임상을 고려한 면적에서 전체 hotspot의 약 80%가 분포하였으며(Table 6),

이는 추출한 면적이 참나무시들음병이 발생할 가능성이 높은 면적임을 의미한다.

Figure 5는 피해목의 밀도가 높은 지형인자 및 임상을 고려하여 피해목이 발생 가능한 지역을 빨간색으로 표시한 부분과 과거 피해목이 집중되었던 지역들(z-score > 1.65)을 노란색으로 표시하여 나타낸 주제도이다. 구체적으로 빨간색으로 표시한 부분은 과거에 적절한 방제가 이뤄지지 못한 지역이거나, 미래에 피해목이 발생 할 가능성이 있는 지역이라고 할 수 있다. 하지만, 다양한 시점과 공간분석에도 불구하고 자료의 한계는 있기 때문에 해당 지역에 대한 자료 구축과 미래 모니터링이 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

Table 6. Spread of hotspot on different geographical features (DEM, slope) and forest types (broadleaf and mixed stand forest).

Research area	Year	(a) The area of hotspot considering geographical features and forest types (ha)	(b) The area of total hotspot (ha)	(a)/(b)×100 (%)
Bukhan mountain	2009	83.50	97.75	85.42
	2010	57.75	77.25	74.75
	2012	49.50	69.75	70.97
Cheonggye mountain	2010	60.50	76.50	79.08
	2012	51.75	70.75	73.14
	2014	67.50	82.75	81.57
Suri mountain	2012	64.25	74.75	85.95
	2014	69.50	84.00	82.74
Average		63.03	79.19	79.59

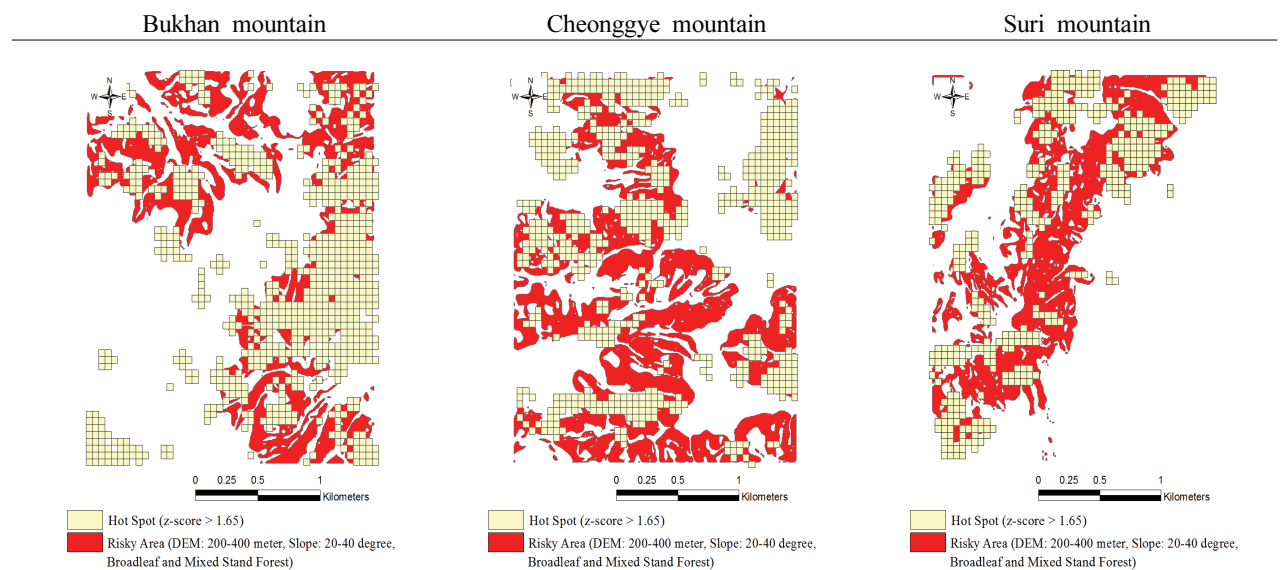


Figure 5. Prediction of oak wilt disease in different geographical features and forest types.

결 론

본 연구에서는 북한산, 청계산, 수리산 지역의 시계열 항공사진을 확보하여 감독분류를 통해 총 9,040본의 피해목을 탐지하였다. 또한, 지형인자들의 주제도를 통한 피해목의 통계분석을 실시하였다. 아울러, 피해목의 공간 분포특성을 파악하기 위해 Moran's I 통계분석과 hotspot 분석을 실시하였으며, 이를 특정 지형인자 및 임상과 비교분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 시계열 항공사진에서 추출된 피해목은 고도 200~400 m에서 약 56%, 경사 20~40°에서 약 51%, 방위는 남동사면과 남사면에 약 34%가 분포하였다. 고도와 경사의 경우, 지형인자의 특정 범위에서 50% 이상의 피해목이 집중되어 있는 것을 확인하였지만, 사면별 피해목의 분포의 차이는 미미한 것으로 판단되었다.

2) 참나무시들음병의 피해목에 대한 Moran's I 분석 결과, 북한산은 2009, 2010, 2012년 각 0.25, 0.32, 0.24, 청계산은 2010, 2012, 2014년 각 0.26, 0.32, 0.22, 수리산은 2012, 2014년 각 0.42, 0.42의 값을 갖는다. 이는 모든 대상지역의 시계열 데이터에서 피해목의 공간적인 분포가 균집하여 분포함을 의미한다.

3) 북한산, 청계산, 수리산의 모든 시계열 영상에서 피해목이 밀집되어 있는 hotspot은 시계열적으로 이동하는 특성이 있지만, 움직임에 대한 패턴을 규명하기에는 한계가 있다.

4) 지형인자(고도, 경사)와 임상(활엽수림, 혼효림)을 모두 고려한 면적에서 전체 hotspot의 약 80%가 분포한다. 이는 특정 지형인자와 임상에 해당하는 면적에서 참나무시들음병이 발생할 가능성이 높음을 의미한다.

본 연구결과를 통해 분석된 참나무시들음병의 지형·공간적 선호도와 균집 및 확산패턴은 피해 확산 방지와 예방에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 후속연구를 통해 매개충의 생리, 생태적 특성과 피해범위의 공간적 변화의 관계성이 밝혀진다면 병충해의 예방과 산림 건강 활력도 유지 및 증진에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 국립산림과학원의 위성영상을 이용한 참나무시들음병 발생분포 및 확산 관여인자 규명 사업과 2017년도 한국환경산업기술원의 환경정책기반 공공기술 개발사업(Project No. 2016000210001)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Brown, K.A., Parks, K.E., Bethell, C.A., Johnson, S.E. and Mulligan, M. 2015. Predicting plant diversity patterns in Madagascar: understanding the effects of climate and land cover change in a biodiversity hotspot. *PloS one*, 10(4): e0122721.
- Burrough, P.A. and McDonell, R.A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, pp. 190.
- Cáceres, C.F. 2011. Using GIS in Hotspots Analysis and for Forest Fire Risk Zones Mapping in the Yeguaré Region, Southeastern Honduras. Volume 13, *Papers in Resource Analysis*. pp. 14. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. Winona.
- Choi, E.H. 2010. Comparison in characteristics of *Raffaella* species causing oak wilt disease, and analysis efficacy of fungicides injection. Kangwon University master's thesis.
- Dietterich, T.G. 1998. Approximate statistical tests for comparing supervised classification learning algorithms. *Neural computation*, 10(7): 1895-1923.
- Dubayah, R.C. 1994. Modeling a solar radiation topoclimatology for the Rio Grande River Basin. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 627-640.
- Ebdon, D. 1985. *Statistics in Geography*. Blackwell.
- Getis, A. and Ord, J.K. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 24(3): 189-206.
- Goodchild, M.F. 1986. *Spatial autocorrelation*. Volume 47. Geo Books.
- Griffith, D.A. 1987. *Spatial Autocorrelation: A Primer*. Resource Publications in Geography, Association of American Geographers.
- Kelly, M. and Meentemeyer, R.K. 2002. Landscape dynamics of the spread of sudden oak death. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(10): 1001-1010.
- Kelly, M. 2003. Terrain Modeling and visualization to understand spatial pattern and spread of sudden oak death in California. *Terrain data: Application and visualization Making the Connection*.
- Kim, G.H., Lee, S.H., Jung, Y.J. and Jung, S.H. 1995. Change Detection and Terrain Analysis for the Pine Forests Damaged by Pine-Gall Midge Using Remote Sensing and Digital Terrain Model. *Forest Science and Technology Symposium*, pp. 9-11.
- Kim, K.H. 2005. Oak wilt disease. *Tree Protection*, 10: 17-25.
- Kim, S.R., Lee, J.B., Kim, J., Kim, E.S. and Lee, W.K. 2014. Spatial distribution analysis for damaged trees by Oak wilt

- disease. Korean Society for GeoSpatial Information Science Symposium, pp. 209-210.
- Lee, S.H.. 2010. 2010 Oak Wilt Disease Control Plan. Korea Forest Service. http://www.forest.go.kr/newkfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1130&orgId=kfri&mn=KFS_14_04_02_03&nttId=2779809 (2017. 04. 10.)
- Park, D.H. 2014. Forest disease and insectpest prediction-prevention plan. *Tree Protection*, 19: 1-25.
- Park, I.K., Nam, Y., Seo, S.T., Kim, S.W., Jung, C.S. and Han, H. R. 2015. Development of a mass treapping device for the ambrosia beetle, *Platypus koryoensis*, an insect vector of oak wilt disease in Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(1): 39-43.
- Yeum, J.H., Han, B.H., Choi, J.W. and Jeong, H.U. 2013. Mapping of the Damaged Forest by Oak Wilt Disease in Bukhansan National Park. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 27(6): 704-717.
-
- (Received: April 19, 2017; Accepted: June 28, 2017)