Jour. Korean For. Soc. Vol. 95, No. 3, pp. 240~249 (2006)

한국임학회지

JOURNAL OF KOREAN FOREST SOCIETY

공간통계학적 방법에 의한 소나무 재선충 피해의 자연적 확산유형분석

손민호[1] · 이우균[1]* · 이승호 · 조현국[2] · 이준학[3]

[1]고려대학교 환경생태공학부, [2]국립산림과학원,

[3]버클리대학교 환경정책관리학과

Natural Spread Pattern of Damaged Area by Pine Wilt Disease Using Geostatistical Analysis

Min-Ho Son[1], Woo-Kyun Lee[1]*, Seung-Ho Lee[2], Hyun-Kook Cho[2] and Jun-Hak Lee[3]

[1]Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

[2]Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

[3]Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, USA.

요 약: 최근, 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)에 의한 소나무림의 피해에 대한 사회적 심각성이 크게 대두되고 있다. 소나무 재선충에 의한 산림피해는 피해지 내에서는 매개충인 솔수염하늘소의 자연적인 영역확장에 의해 확산되는 반면, 전국적으로는 감염목의 인위적 반출 및 이동에 의해 확산이 진행되고 있다. 본 연구에서는 부산 대변항의 재선충 피해지내에서 항공사진 및 현지조사에 의해 피해목의 공간적인 위치를 파악하였고, 공간통계학적인 방법을 통하여 피해목의 공간분포유형, 피해발생과 지형인자간의 관계를 분석하였다. 또한, 지형공간자료를 통계학적 Tree 모형에 적용한 CART(*Classification and Regression Trees*)모형을 이용하여 재선충 피해의 자연적인 확산 예측 지도를 작성하였다. 본 연구를 통해 공간통계학적인 분석과 CART모형이 소나무재선충 피해의 공간분포 및 자연적 확산유형을 파악하는데 유용한 도구로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract: Recently, dispersion of damaged forest by pine wilt disease has been regarded as a serious social issue. Damages by pine wilt disease have been spreaded by natural area expansion of the vectors in the damaged area, while the national wide damage spread has induced by human-involved carrying infected trees out of damaged area. In this study, damaged trees were detected and located on the digital map by aerial photograph and terrestrial surveys. The spatial distribution pattern of damaged trees, and the relationship of spatial distribution of damaged trees and some geomorphological factors were geostatistically analysed. Finally, we maked natural spread pattern map of pine wilt disease using geostatistical CART(*Classification and Regression Trees*) model. This study verified that geostatistical analysis and CART model are useful tools for understanding spatial distribution and natural spread pattern of pine wilt diseases.

Key words : *pine wilt disease,* Bursaphelenchus xylophilus, *spatial distribution, spread pattern, geostatistical approach, CART(Classification and Regression Trees)*

서 론

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 시들음병을 유발하여 소나무류를 죽게 하는 병원체로 미국, 캐나다, 멕시코 등 북미대륙의 토착종으로 알려져 있다(Steiner and Buhrer, 1934; Knowles *et al.*, 1983; Dwinell, 1997). 원산지 수종들은 대부분 저항성을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 이 선충이 다른 나라로 침입 할 경우 그 지역의 토착 소나무류는 대부분 극심한 피해를 나타내는 것으로 알려지고 있다(Wingfield, 1984; Bergdahl, 1988; Dwinell, 1997). 소나무재선충에 감염된 소나무는 대부분 감염된지 불과 3개월 이내 완전 고사되며, 매개충인 솔수염하늘소(*Monochamus*속)는 이들 고사목에서 서식하면서 공생관계를 유지하고 있다. 소나무재선충은 1988년 부산 금정산에서 처음으로 발생한 이후 남부지방을 중심으로 확산되고 있다. 올해 들어 부산, 대구, 제주 등 전국 49개

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

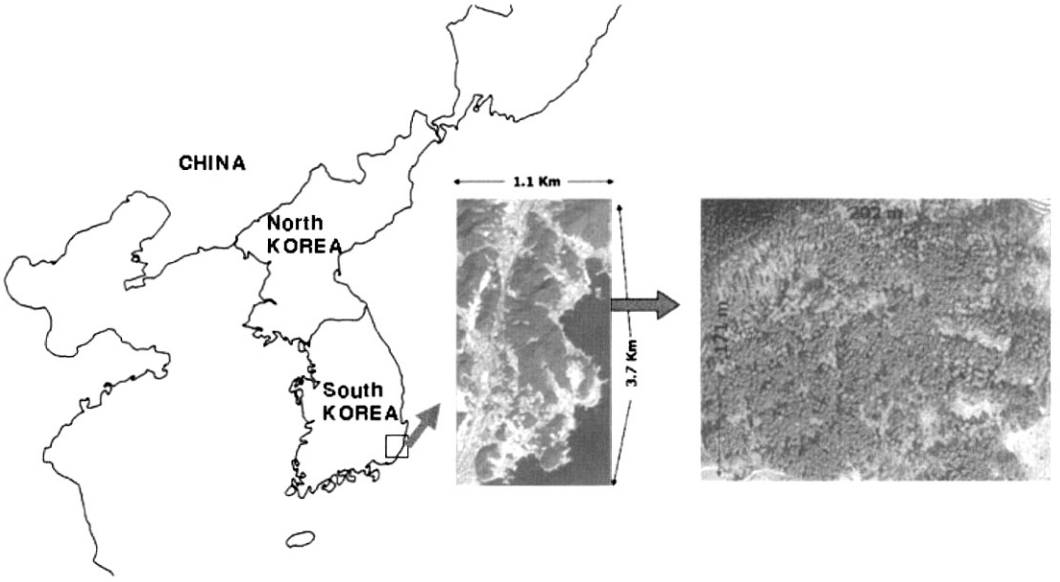


Figure 1. Study area damaged by pine wilt disease.

시군구에서 5,105 ha의 지역이 재선충 피해를 보았으며, 현재(2005년9월)까지 누적 피해 면적이 서울 여의도의 약 75배인 2만2525ha에 이르고 있다(국립 산림과학원, 2004). 소나무재선충은 스스로 이동할 수 있는 능력이 없기 때문에, 매개충이 건전한 나무의 수피를 후식할 때와 수피를 찢어서 산란할 때 생기는 상처를 통하여 건전한 나무로 확산된다(Mamiya and Enda, 1972; Morimoto 와 Iwasaki, 1972; Wingfield and Blanchette, 1983; Edwards and Linit, 1992).

관련된 국내·외 연구로는 병해충지역의 지형인자의 영향력에 대한 연구(김규현 등, 1995), 소나무 재선충의 매개충인 솔수염하늘소의 생태에 한 연구(김동수 등, 2003)와 병해충지역의 기상인자의 영향력에 대한 연구(김준범 등, 2003)등이 있으나 공간통계학적인 기법을 이용한 소나무재선충 확산에 관한 연구는 없는 실정인 반면에 국외에서는 다양한 공간통계학적인 알고리즘을 적용하여 확산에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kelly, 2002, 2003; Qinghua *et al*., 2005). 본 연구에서는 소나무재선충 피해목의 공간적 특성을 분석하고, 피해목에 대한 확산위험 지역을 공간통계학적인 방법을 적용하여 예측하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소는 주로 남부 해안 지방에 광범위하게 분포하는 것으로 나타났다(국립 산림과학원, 2004). 연구대상지인 부산시 기장군 대변리 지역은 소나무재선충병이 심각하게 확산되어 가고 있는 지역으로 이 지역은 해안을 끼고 있으며, 임상분포의 분석결과 해안선으로 부터 내륙 쪽으로 소나무림의 분포가 이어 지는 것으로 나타났다(Figure 1).

2. 현장조사 및 자료의 수집

항공사진 촬영을 통해 2001년부터 2004년 까지 4회에 걸쳐 획득된 칼라항공사진(1:5,000)의 판독을 통해 피해목의 위치좌표를 획득하였다. GPS(Trimble-Pathfinder pro XR) 장비로 측정된 현장조사 자료를 이용하여 항공사진 판독에 의해 획득된 피해목의 위치좌표를 보정하였다.

3. 분석체계

본 연구의 진행 방법은 3단계로 나누어 진행되었다. 우선 지형인자의 작성을 위하여 DiGeM(Göttingen Univ., 2002)을 사용하여 수치표고모델(DEM)을 보정하였다. 다음으로, S-Plus(Insightful, 2003)와 ERDAS IMAGINE (ERDAS, 2001), Arc Info(ESRI, 2002)를 이용하여 피해목의 공간분포와 지형인자와의 상관성을 분석하였다. 분석된 결과는CART(*Classification and Regression Trees*: Salford systems, 2002)모형의 Trees 알고리즘을 수행 후, Arc/View 3.1 프로그램을 이용하여 확산예측 지도를 작성하였다.

4. 분석방법

1) 예측인자의 생성

(1) 기상 DB구축

소나무재선충의 주 매개충인 솔수염하늘소의 생태에 따

라 피해지역의 범위가 민감하게 변화되며 특히, 우화시기는 기온의 영향을 가장 크게 받는다(김동수 등, 2003). 따라서 우화상태에 따라 확산되는 영향을 파악하기 위하여 기상자료로 강우, 지표면온도, 평균기온, 풍향, 풍속, 일사량 등의 자료를 수집하였다. 또한, 우화가 가장 활발하게 이루어지는 4월부터 6월까지의 기상변화가 가장 중요한 시기이므로(김동수 등, 2003) 피해지역의 피해목 조사 시기와 일치하는 기간인 2001년부터 2004년 까지의 4~6월 기상자료를 수집하였다. 강우의 경우 4월~6월 평균 강수량을 사용하였으며, 지표면 온도는 우화에 영향을 가장 많이 미치는 시간대인 08시~12시의 평균 지표면 온도를 사용하였고(고제호 등, 1969; 이범영 등, 1987) 풍향, 풍속, 일사량은 월평균 값을 이용하였다. 피해지역의 기상자료는 부산지방기상청(부산 대청동 소재)에서 측정한 기상자료(일단위 평균값)와 일광, 해운대지역의 무인 기상측정(AWS) 자료(시간단위 평균값)에서 제공되는 자료를 바탕으로 구축하였다.

(2) 지형 DB 구축

소나무재선충병 발생지의 1:25,000 수치지형도를 이용하여 확산과정에 고려해야 할 인자들을 주제도별로 작성하였다. 공간해상도는 피해지의 규모, 선행연구(Weitua and David, 1994; Kelly, 2002; Qinghua, 2005) 등을 고려하여 10 m×10 m로 결정하였다.

대상지의 피해현상과 유사한 참나무 피해지역에 대한 연구(Kelly, 2003)와 지형공간적인 영향력 연구(김규헌, 1995)등을 통하여 가장 영향력이 높은 인자로 밝혀진 6개의 지형관련인자(경사, 방위, 지형습윤지수, 지표면온도, 도로로부터의 거리, 수계로부터의 거리)를 선정하였다.

1:25,000 지형도와 위성영상을 통하여 DEM을 작성하였다. DiGeM(Göttingen Univ, 2002)를 통하여 지형자료(DEM)를 보정하여 고도(elevation)를 작성하였으며, 경사(slope)는 ArcInfo8.0(ESRI, 2001)을 이용하여 계산하였다. 방위(aspect)는 Dubayah(1994)에 의하여 얻어진 식(1)을 적용하여 계산되었다.

$$ASPECT = \cos\theta\cos S + \sin\theta S\cos(\Phi - A) \quad (1)$$

여기서, θ는 태양천정의 각(solar zenith angle), Φ는 태양각(solar azimuth), S는 사면 경사(slope of the terrain)이며, A는 사면 경사면적(area of the slope)이다.

지형 습윤지수(Topographic Moisture Index, TMI)는 Beven과 Kirkby(1979)이 제안한 식(2)를 적용하여 계산하였다.

$$TMI = \ln\left(\frac{A}{\tan\beta}\right) \quad (2)$$

여기서, A는 사면 면적을, tanβ는 경사를 의미한다.

지표면 온도는 4월부터 7월까지 병해충의 생장 및 확산이 활발하게 이루어진다는 연구 결과(고제호 등, 1969; 이범영 등, 1987)를 근거로 본 연구대상지에 새로이 적용하였다. 자료는 항공사진(2002, 2003년 5월 자료)과 GPS (2002년 5월)의 측정일자를 기준으로 전후 3개월의 평균온도를 적용하여, 이우균 등(2001)에 의하여 얻어진 식(3)을 적용하여 계산하였다.

$$TEMPER = BaT - (EL - BaEL)*TLR \quad (3)$$

여기서, BaT(base temperature)는 기준온도, EL(elevation)은 고도, BaEL(base elevation)은 기준고도, TLR(temperature lape rate)은 기온감율(-0.6°C/100 m) 이다.

도로 및 수계로부터의 거리는 Arc Info8.0을 사용하여 김규헌(1995)의 연구 결과를 기초로 각각 100 m, 30 m 단위로 버퍼링을 하였다.

(3) 피해목 위치정보 DB 구축

재선충 피해목의 위치정보는 2001년부터 2004년 까지 촬영된 항공사진 분석을 통해 피해지역의 위치정보를 점(point)형태로 조사되어 통합 데이터 모델(Integrated data model)인 ArcGIS 9.0을 이용하여 DB로 구축 하였다. GPS를 이용한 현장 조사를 통해 피해목의 위치 정확도를 보정하였다.

2) 공간패턴

피해목의 공간분석을 위해 공간패턴분석에 널리 사용되는 최근린지수(nearest neighbor index, NNI)와 Ripley's K 식(Ripley, 1976; Haase, 1995)을 적용하여 재선충 피해목의 공간패턴을 분석하였다.

NNI는 어떤 지점들이 분산, 집중, 랜덤하게 분포되어 있는지를 나타내는 지수이다. 대상지역에 존재하는 피해목과 모든 지점에서 가장 가까운 위치의 점까지 거리의 평균을 이 영역 내에 점들이 무작위로 존재한다고 할 때 기대되는 거리의 평균으로 나눈 값을 의미하며 식 4와 같이 나타낼 수 있다(국토연구원, 2004).

$$NNI = \frac{d_{obs}}{d_{ran}} \quad (4)$$

여기서,

$$d_{obs} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n}, d_{nm} = 0.5\sqrt{\frac{A}{n}}$$

d_i는 i지점에서 가장 가까운 거리에 있는 지점까지의 거리이며 A는 대상지역의 면적을 의미한다. NNI=1이면 랜덤, NNI<1은 집중, NNI>1은 분산을 나타낸다. 이론 적인 NNI의 최소값은 0(한점으로 집중), 최대값은 2.149이다.

피해목의 군집형태를 분석한 후 만약 피해지점에서 일정한 군집형태를 이루고 있다면 어떠한 피해 패턴을 이루

고 있는지를 분석해야 한다. 공간분포 패턴을 분석하기 위해서는 Ripley's K(Ripley, 1976; Haase, 1995)의 공간분포 패턴분석 방법이 사용된다. 일정공간에서 점들(points)이 갖는 집중도(intensity)는 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{S} \tag{5}$$

여기서, N은 점(Point)의 수를 나타내고, S는 임의의 공간의 면적을 나타낸다.

식(4)를 사용하여 공간분포의 패턴을 나타내는 식(6)를 유도할 수 있다(Ripley, 1976).

$$\hat{K}(t) = \frac{1}{\hat{\lambda}}\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{j\neq i} k_{ij} \tag{6}$$

여기서, t는 거리(Distance), k_{ij}=1이면 점 i와 j≤t사이의 거리를, k_{ij}=0이면 i와 j>t사이의 거리를 의미한다. Ripley's K 식을 Lhat(transformed K) 형태의 식(7)으로 변형 할 수 있다(Goreaud, 1999).

$$\hat{L}(t) = \sqrt{\frac{\hat{K}(t)}{\pi}} - 1 \tag{7}$$

여기서, L함수 값이 0보다 클 경우 군집형태의 분포, 0일 경우 임의 분포, 0보다 작을 경우에는 규칙적인 분포를 나타낸다.

L함수를 거리에 따라 그래프로 표현할 경우, 원점에서부터 기울기가 1인 직선은 임의분포를 나타낸다. 또한, 분포가 군집형태일 경우, L함수는 임의분포 직선의 상단에 위치하며 규칙적 형태일 경우 임의분포 직선의 하단에 위치하게 된다.

3) 공간통계 분석 모형 CART

예측변수(설명변수)로 부터 목표변수를 예측하는 규칙을 찾는 방법으로 분류나무(classification tree)가 흔히 쓰이고 있다. 이해하기 쉬운 규칙을 생성하고 분류작업이 용이할 뿐만 아니라 연속형과 범주형 자료를 다 취급할 수 있으며, 가장 좋은 변수를 명확히 알아낸다는 장점이 있어 분류나무가 사용되어지고 있다(송은태, 2004).

CART(classification and regression trees)모형은 분류나무에 기반을 둔 모형으로 Breiman(1984)등에 의해 제안되었다. 의사결정나무 분석의 기본적인 목적은 다양한 결정요인들에 의해 나타나는 결과(종속변수)를 보다 동일한 특성을 가진 하부 그룹으로 분류하고자 할 때, 그룹 간 특성은 가장 크게 하면서 그룹 내 동질성을 최대화 하는 결정요인들이 무엇인지 그리고 그 요인들이 어떻게 우선적으로 관여하는지 파악하고자 하는 것이다.

분류를 단계적으로 계속 시행 할수록 그룹 내의 동질성은 증가하게 된다. 그 방법론적인원리는 다음과 같다. 의사결정나무 분석은 마디(node)라고 불리는 구성요소들로 이루어져 있으며, 모든 관측치를 포함하는 뿌리마디(root node)로부터 시작하여 특정 법칙에 의해 각 가지가 끝마디(terminal node)에 이를 때까지 자식마디(child node)를 계속적으로 형성해 나감으로써 완성된다. 자식마디들이 형성될 때는 설명변수들의 선택과 병합이 여러 가지 기준에 의해 이루어진다.

피해목을 독립변수로 설정하고, 종속변수는 고도와 방위 등 5개의 지형 인자를 설정하였다. 방위는 0°~360°의 분포를 가지므로 이것을 1~8로 그룹화 시켜 모델에 적용하였고, 지형인자들은 예측 값으로 설정하여 포아송 패턴(Poisson Pattern) 분류(Classification)형태를 선택하여 실행하였다. 몬테카를(Monte carlo) 난수(random number)를 발생시켜 대상지 피해목과 함께 입력하여 피해지점(1)과 피해를 입지 않은 지점(0)을 검증(training) 자료로 사용 하였다. Figure 2는 개념적인 결과를 나타내고 있다. 즉, 가장 영향력 있는 인자를 통계적으로 선별하고 그 인자 값(A)을 기준으로 다음 영향력 있는 인자를 선별한다. 이러한 과정을 반복하면서 모든 인자를 통계적인 가중치를 부여한 함수식을 도출한다.

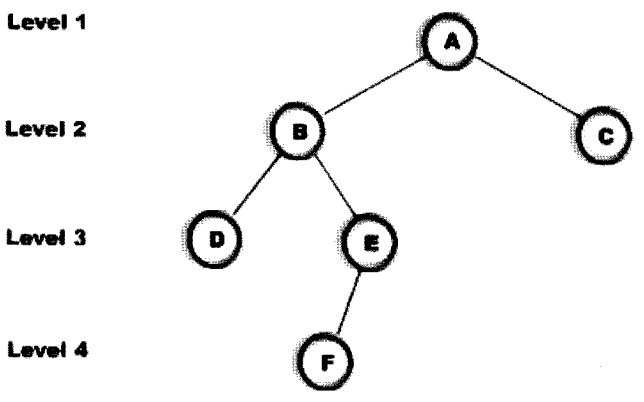


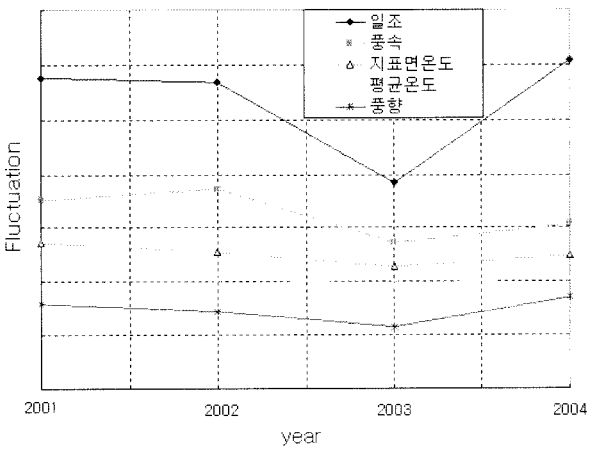
Figure 2. Structure of CART model for disease risk prediction.

결과 및 고찰

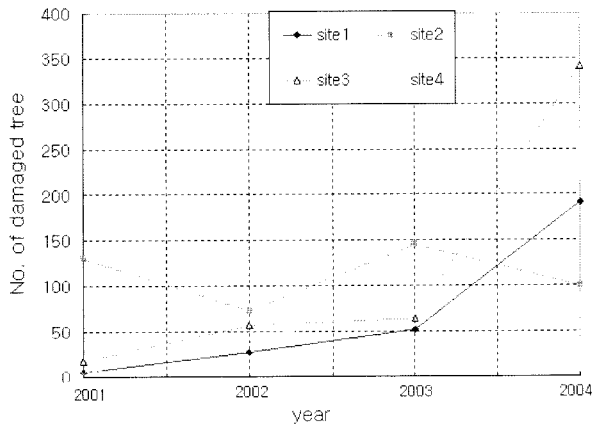
1. 시공간적 상관성 분석

1) 기상인자와의 상관성

기상인자와 피해목과의 관계 규명을 위해 2001년~2004년 동안 임의의 4개 지점에 대한 피해목 본수를 조사하였다(Figure 3(a)). 분석결과, 대체적으로 피해목 본수가 증가하였으며, 특히 2004년도에 급속한 증가를 나타내었다. 변화의 원인을 분석하기 위하여 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소의 우화 시기인 4월~6월 기간의 기상인자 값을 부산지방 기상청으로부터 획득하여 비교하였다(Figure 3(b)). 분석한 결과 일조의 경우 2003년과 2004년에 높은 변화를 보이고, 그 외 풍속, 풍향, 지표면온도, 평균온도 등은 큰 변화를 보이지 않았다. 이를 보면, 일조량의 변화가 피해목 본수와 높은 연관성을 가지고 있고 나머지 기상인자는 큰 연관성이 없는 것으로 판단되었다. 기상인자와의 시공간적 상관분석을 연구한 김준범 등(2003)의 연구결과에서도 온도, 풍속은 낮은 상관관계를 나타내고 있어 유사한 결과를 나타내고 있다.



(a)



(b)

Figure 3. Number of damaged trees (a) and climate factors (b).

2) 지형인자와의 상관성

피해지점의 지형인자들과 피해목과의 상관성을 분석한 결과, 경사, 고도, 수계와 지형습윤지수에서 의미 있는 특징를 보였다. 경사는 10°~25°, 도로는 50 m~110 m, 수계는 최대 300 m까지 상관성이 증가하였고 이후로는 감소하는 분포를 보이고 있다(Site 2의 경우 간벌에 의한 영향이 존재함). 지형습윤지수는 4~8일 때 높은 증가를 보였다. 경사, 고도, 수계 등은 높은 상관성을 보이고 있는 반면, 지표면온도, 방위, 도로망 등의 인자는 다른 인자들과 비교하여 영향력이 낮았다.

지형인자간의 상관성을 분석한 Figure 4(a)는 지형습윤지수와 온도와의 관계를 나타내고 있다. 지형습윤지수는 피해지역이 2~8에 분포하고, 온도의 변화는 높지 않은 것으로 나타났다. (b)는 방위와 경사의 관계를 나타내고 있다. 경사가 5°~15°에 주로 분포하고 있으며 대부분 방위와 관계없이 고르게 나타나고 있다. (c)는 방위와 온도와의 관계를 보이고 있다. 두 인자의 피해지역이 모두 고르게 분포하고 있어 상관성이 매우 낮게 나타났다. (d)의 경우 도로망과 수계망의 거리에 따른 피해지역의 분포를 나타내고 있다. 수계망의 경우 영향이 적은 반면 도로의 경우 도로에서 100 m 이내의 거리에서 피해지점이 집중되어 나타나고 있다.

2. 재선충 피해목의 공간분포패턴

1) 공간분포 패턴

항공촬영을 통해 2001년부터 2004년 까지 획득한 피해목의 분포가 지속적으로 확산되어 가고 있음을 알 수 있다(Figure 5). 지역적인 피해 특성을 통해 공간적인 확산 예측을 이해할 수 있으므로 지역적인 공간분포패턴을 분석하기 위해 4곳을 선정하였다(Figure 6). A, D 지역은 경사가 완만한 지역, B, C지역은 다른 지역에 비하여 경사도가 편차가 높은 편이다. 4곳에 대해 공간분포 패턴을 나타내는 최근린지수(NNI)를 분석한 결과를 Figure 7에 나타내었다. A, C, D 지역의 경우 2001년도에는 분산의 형태를 보였고, 2002년 이후에는 군집형태를 보이고 있다. 피해가 급속히 증가된 2002년도 이후에는 모든 지역에서 군집형태의 공간분포유형을 보였다. 이는 초기에는 산발적으로 피해목이 나타나지만, 시간이 지나면서 기존 피해목 주변으로 피해가 군집형태로 진행됨을 나타내는 것으로 판단될 수 있다.

또한, 피해지역의 항공사진 분석을 통하여 대상지역 전체의 밀도분포를 분석하였다. 피해지역의 분포는 북동쪽을 향하여 범위가 확산되어가는 경향을 보이고 있다(Figure 8).

Ripley's K 에 나타난 공간패턴은 100 m 범위에서 군집형태를 띠는 것으로 나타났다(Figure 9). 이는 100 m 범위

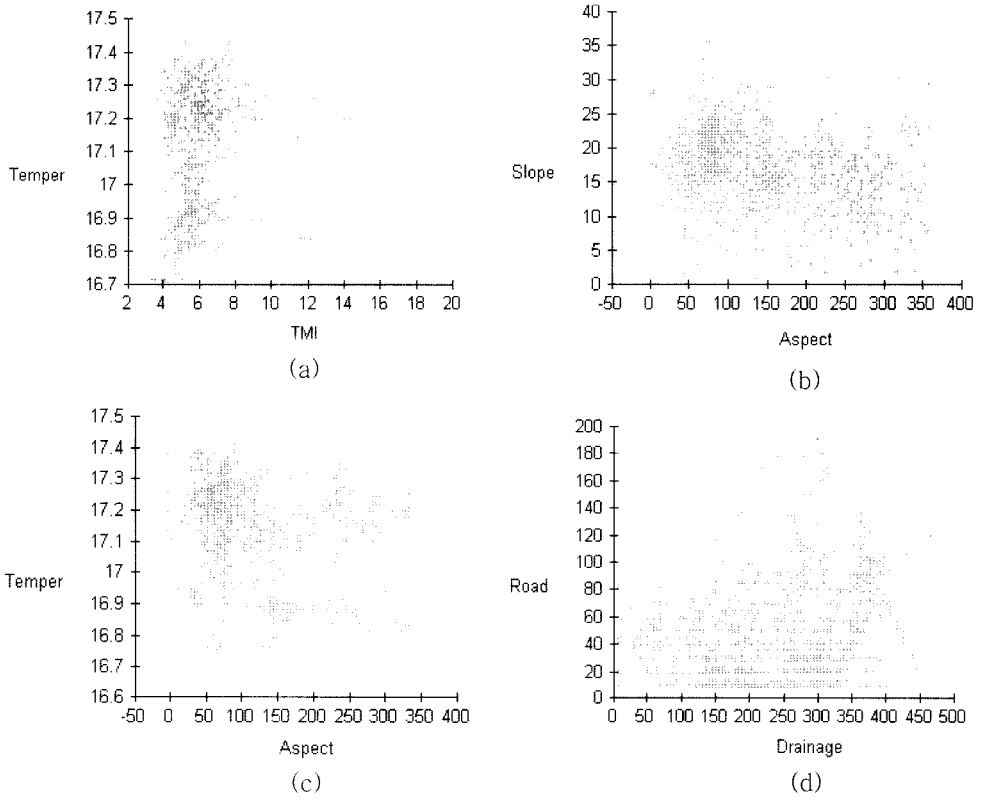


Figure 4. Distribution of damage tree with relative factors (a: Temperature & TMI, b: Slope & Aspect, c: Temperature & Aspect, d: Road & Drainage).

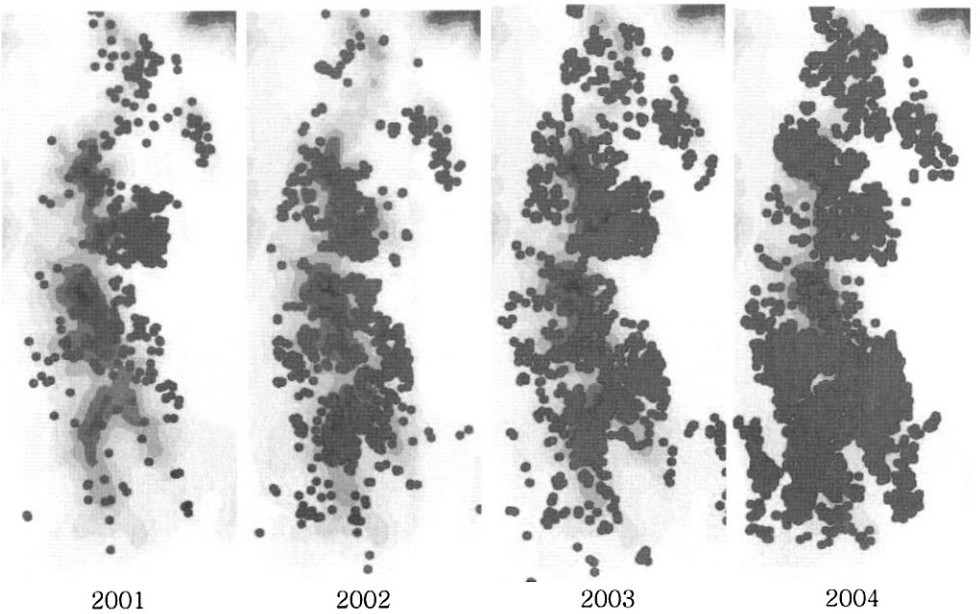


Figure 5. Damaged tree points by pine wilt disease.

에서 1차 피해군집에서 2차 피해군집 까지 영향을 주는 이동 범위를 의미한다. 솔수염 하늘소의 비산거리는 자연 상태에서는 100 m, 태풍 등의 바람의 영향을 받을 때는 4 km 까지 이동할 수 있다는 연구 결과(국립 산림과학원, 2004)를 고려할 때, 한 피해목으로부터 자연적으로 피해가 확산될 범위는 약 100 m 정도라는 것을 유추할 수 있다.

3. CART모형에 의한 피해확산 예측

지형인자들을 CART모델에 적용한 결과, 재선충 피해 위험에 대한 높은 예측 결과 값을 얻을 수 있었다. Table 1은 알고리즘에 의해서 나타난 인자의 중요도를 나타내고 있다. 경사의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 수계, 고도가 비교적 높은 영향을 주는 것으로 나타났다. 반면, 방

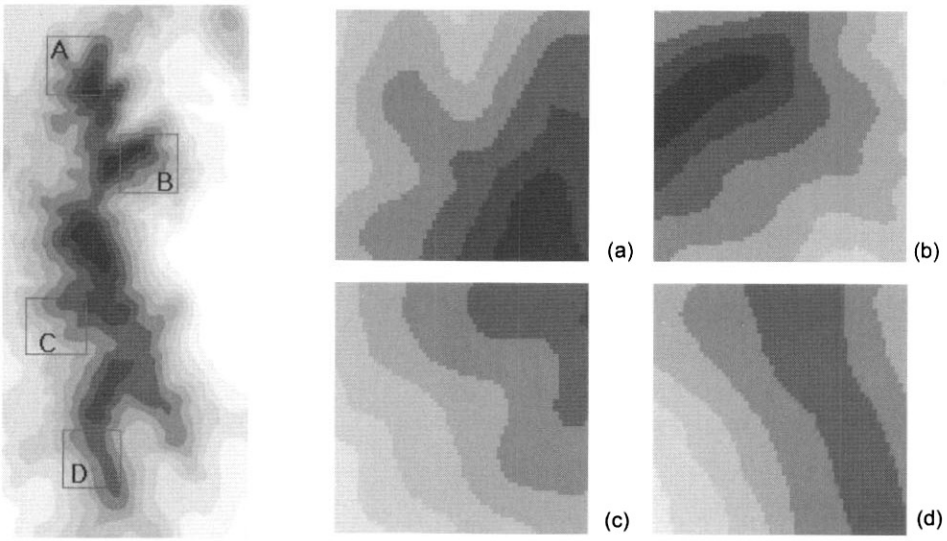


Figure 6. Test site for analysing spatial patteren analysis.

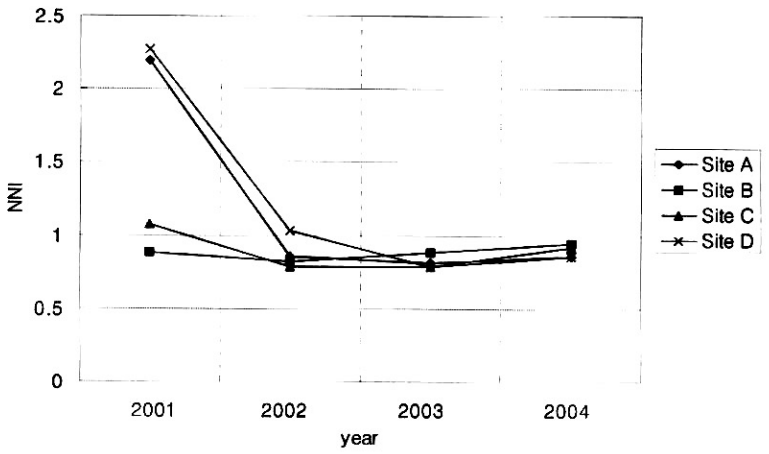


Figure 7. NNI (nearest neighbor index).

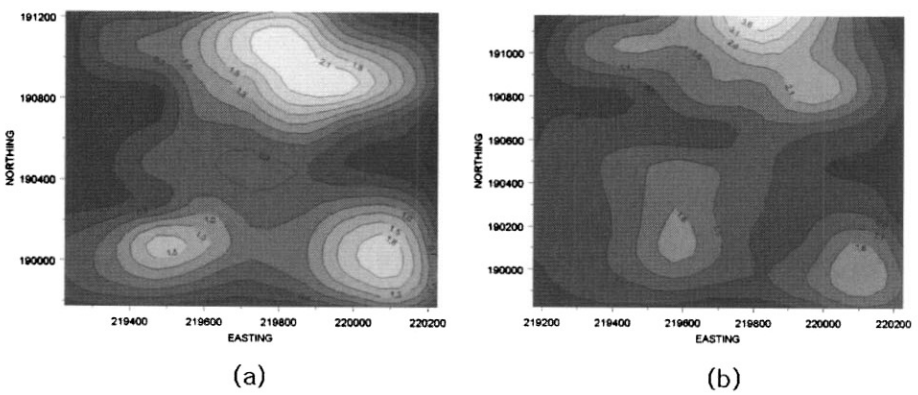


Figure 8. Density of damaged tree (a:2002, b:2003).

위와 도로로부터의 거리에 대한 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

Figure 10은 CART모델의 시뮬레이션 결과이다. 모델의 정확도는 80%로 나타났다. 본 연구는 비교적 소규모 지역을 대상으로 적용한 연구이므로 지표면 온도에 대한 영향력이 낮게 나타났으나, 켈리포니아를 대상으로 연구한 Kelly(2003)의 연구 결과를 보면 지표면 온도의 영향도 중요한 인자로 고려되고 있다.

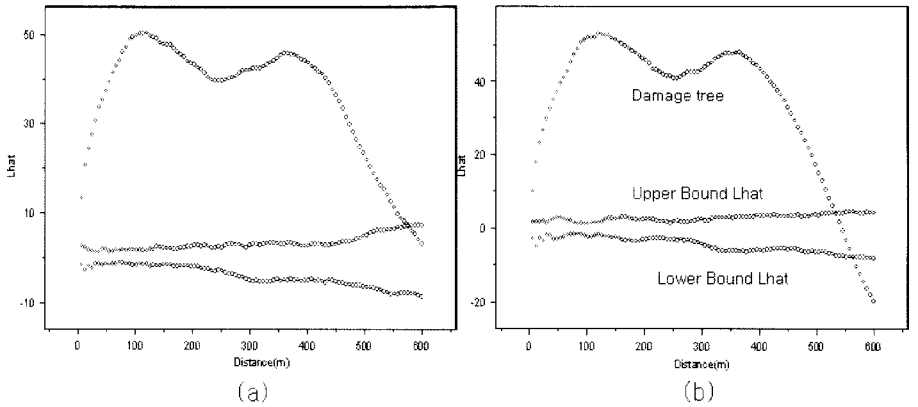


Figure 9. Diagram of the Lhat(h) transformation for damage tree (a: 2002, b: 2003).

Table 1. Result of final environmental variables.

Grade	Variables (%)
1	Slope (100)
2	Distance from drainage (79)
3	Altitude (67)
4	TMI (54)
5	Temperature (54)
6	Aspect (51)
7	Distance from road (19)

본 연구에서는 다음 연구에서 고려해야 할 사항으로 첫째, 대상 연구지역은 대부분 소나무 임상으로 구성되어 있어 임상을 별도의 종속변수로 구분하지 않았다. 그러나 보다 넓은 지역을 대상으로 적용 하거나 유사 병해충에 적용할 경우 임상의 변화를 고려해야 할 것이다. 선행 연구 (kelly, 2002)의 경우 임상과 피해확산 분포 사이의 상관성이 높음을 설명하고 있다. 이는 유사 병해충 별로 피해를 입는 임상의 종류가 다르므로 다양한 임상이 존재하는 넓은 지역의 경우 피해확산 분포유형을 설명하는 변수로 활용 가능함을 보여주고 있다. 또한 동일 연구에서 임상의 밀도가 확산에 높은 상관성이 있으며 이는 확산 속도와 연관성이 있는 것으로 분석되었다. 둘째, 연구지역의 규모에 따른 해상도(resolution)를 고려해야한다, 해상도가 낮아질수록 향과 경사의 영향력은 낮아지게 될 것이다. 따라서 높은 상관성이 있는 경사의 경우 영향력이 낮게 되어 모델에 주는 영향력을 고려해야 할 것이다. 또한 병해충 매개체의 성장과 이동에 높은 상관관계가 있을 것으로 판단되는 기후, 기상 인자를 고려한다면 정확도가 높은 확산예측 모델이 될 것으로 기대된다.

결 론

본 연구에서는 재선충 피해지내에서 항공사진 및 현지조사에 의해 피해목의 공간적인 위치를 파악하였고, 공간통계학적인 방법을 통하여 피해목의 공간분포유형, 피해발생과 지형인자간의 관계를 분석하였다. 이를 통해 소나무재선충의 자연적 피해에는 경사, 수계로 부터의 거리,

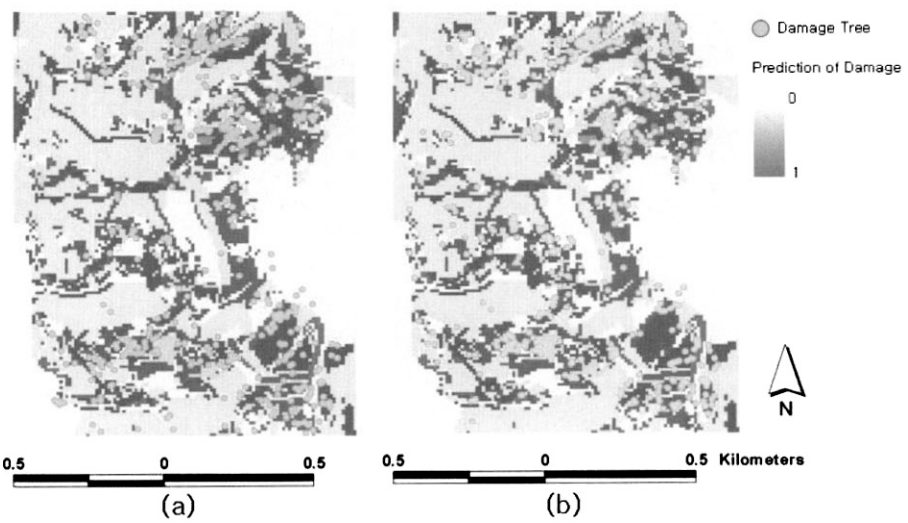


Figure 10. Point of damage tree and damage risk area predicted by CART model (a: damaged points and damage risk area in 2002, b: damaged points in 2003 and damaged risk area in 2002).

고도의 영향이 높음을 알 수 있었으며, 재선충 피해의 자연적 확산은 100 m 범위 내에서 이루어짐을 파악할 수 있었다. 또한, CART(*Classification and Regression Trees*)모형을 이용하여 재선충 피해의 자연적인 확산을 예측한 결과, 약 80%의 정확성으로 피해지내에서의 피해목의 자연적 확산을 예측 할 수 있었다. 이를 통해 유사한 산림 병해충 확산에도 공간통계학적인 기법과 CART모델을 적용한다면 확산 및 위험지역 예측이 가능함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원격탐사 기술개발 사업 위탁 연구개발과제 "GIS 및 공간통계학적 기법을 이용한 산림병해충 피해발생 및 확산 모형개발" 연구비에 의해 수행된 연구결과의 일부임.

인용문헌

1. 고제호. 1969. 봄철의 솔잎혹파리 유충밀도의 변동 조사. 한국임학회지 9: 45-48.
2. 국립산림과학원. 2004. 소나무재선충병, 산림과학속보 04-06.
3. 국토연구원. 2004. 공간분석기법. 한울. 서울.
4. 김규헌. 1995. 원격탐사 및 수치지형모델을 이용한 솔잎혹파리 피해지역의 피해동태 및 지형분석. 한국임학회 춘계학술지.
5. 김동수, 이상명, 정영진, 최광식, 문일성, 박정규. 2003. 소나무 재선충의 매개충인 솔수염 하늘소 성충의 우화상태. Korean J. Applied Entomology. 42(4): 307-313.
6. 김준범, 조명희, 오정수, 신동호. 2003. GIS와 위성영상을 이용한 소나무 재선충 피해지역과 기상인자와의 시공간적인 상관분석. 한국 임학회 92(4): 362-366.
7. 송은태. 2004. CART에서 변수선택 편의에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문: 10-12.
8. 이범영, 우건석. 1987. 솔입혹파리 생장지역에 따른 온도별 생육기간의 차이. The Korean J. of Entomology. 17(3): 185-190.
9. 이우균, 이준학, 정기현, 전은진. 2001. IKONOS 영상과 지리형태 인자에 근거한 임상분포의 공간적 특징. 한국산림측정학회 4(1): 74-82.
10. Bennett, R.J. and Haining, R.P. 1985. Spatial structure and spatial interaction : Modelling approaches to the statistical analysis of geographical data. Journal of the royal statistical society. Series A(General). 148(1): 1-36.
11. Bergdahl, D.R. 1988. Impact of pinewood nematode in North America : Present and future. J. Nematology. 20: 260-265.
12. Beven, K.H. and Kirkby, M.J. 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull. 24: 43-69.
13. Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. and Stone, C. 1984. Classification and regression trees. Chapman and Hall. New York.
14. Dwinell, L.D. 1997. The pinewood nematode : Regulation and mitigation. Annu. Rev. Phytopathol. 35: 153-166.
15. Dubayah, R.C. 1994. Modeling a solar radiation topoclimatology for the Rio Grande River Basin. Plant Ecology 142: 71-85.
16. Edwards. O.R. and Linit. M.J. 1992. Transmission of *Bursaphelenchus xylophilus* through oviposition wounds of *Monochamus carolinesis*. J. Nematology. 24: 133-139
17. Goreaud, F. and Pelissier, R. 1999. On explicit formulas of edge effect correction for Ripley's K-function. Journal of Vegetaton Science 10: 433-438
18. GOettingen Univ. 2002. Department of physical geographic, Germany, DiGeM Program, http://www.geogr.uni-goettingen.de/pg/saga/digem/(2005. 04. 20).
19. Haase, P. 1995. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K-function : Introduction and methods of edge correction. Journal of vegetation science 6: 575-582.
20. Kelly, M. 2002. Landscape dynamics of the spread of sudden oak death, Photogrametric Engineering & remote sensing 68(10): 1001-1009.
21. 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.
22. Knowles, K., Beaublen, Y. Wingfield, M.J. Baker, F.A. and French, D.W. 1983. The pinewood nematode new in Cannada. Forestry Chronicle 59: 40.
23. Korea Forest Research Institute. 2003. Annual research report of forest pests monitoring in 2002, Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea: 259pp.
24. Mamiya.Y. and Enda. N. 1972, Transmission of *Bursaphelenchuslignicolus* by *Monochamus alternatus*, Nematologica, 18: 159-162.
25. Mamiya, Y. and Enda, N. 1972. Transmission of Bursaphelenchus lignicolus (Nematoda : Aphelenchoidae) by Monochamus alternatus (Coleoptera:Cerambycidae) Nematologica. 18: 159-162.
26. Morimoto, K. and Iwasaki, A. 1972. Role of Monochamus alternatus (Coleoptera : Cerambycidae). as a vector of Bursaphelenchus lignicolus (Nematoda : Aphelenchoididae). J. Japan Forest Society. 54: 177-183.
27. Parker, I.M., Simberloff, D., Lonsdale, K., Goodell, M., Wonham, P.M., Kareiva, M.H., Williamson, B.V., Holle, P.B., Moyle,J.E., Byers, and Goldwasser, L. 1999. Impact : toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. Biological Invasions 1: 3-19.
28. Qinghua G., Kelly, M. and Catherine H. Graham. 2005. Support vector machines for predicting distribution of Sudden Oak Death in California. Ecological Modeling 182: 75-90.
29. Quinn, P. and Beven, K. 1991. The prediction of hills-

lope flow paths for distributed hydrologycal modeling using digital terrain models. Hydrological processes 5: 59-79.
30. Ripley, B.D. 1976. The second order analysis of stationary point processes. J. Applied Probability. 13: 255-266.
31. Ristaino, J.B. and Gumpertz, M. 2000. New frontiers in the study of dispersal and spatial analysis of epidemics caused by species in the genus phytophthora, Annu. Rev., Phytopathology. 38: 541-576.
32. Sanford system, USA, http://salford-systems.com (2005. 06. 10).
33. Steiner. G. and Buhrer, E.M. 1934. Aphelenchoides xylophilus n.sp., a nematode associated with blue stain and other fungi in timber. J. Agricultural Research 48: 949-951.
34. Thrall, P.H. and Burdon, J.J. 1999. The spatial scale of pathogen dispersal : Consequences for disease dynamics and persistence. Evolutionary Ecolgy Research 1(6): 681-701.
35. Vious, P.K., D'Antonio, C.M., L.L. Loope, and R. Westbrooks. 1996. Biological invasions as global environmental change, American Scientist 84: 468-479.
36. Weihua Z. and David R.M. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations. Water resource research 30(40): 1019-1028.
37. Wingfield, M.J. and Blanchette. R.A. 1983. The pinewood namatode. *Bursaphelenchus xylophilus*, in Minnesota and Wisconsin: Insect associates and transmission studies. Canada J. Forest Research. 13: 1068-1076.
38. Wingfield, M.J., Blanchette, R.A., and Nicholls, T.H. 1984. Is th pine wood nematode an important pathogen in the United States, J. Forest. 82: 232-235.

(2006년 8월 16일 접수; 2006년 5월 8일 채택)