

## 우리나라에서 소나무재선충병 초기 발생지의 환경 특성 분석

이대성<sup>1</sup> · 남영우<sup>2</sup> · 최원일<sup>2</sup> · 박영석<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 생물학과, <sup>2</sup>국립산림과학원 산림병해충연구과, <sup>3</sup>경희대학교 나노의약생명과학과

**Environmental Factors Influencing on the Occurrence of Pine Wilt Disease in Korea.** Lee, Dae-Seong<sup>1</sup> (0000-0001-7288-0156), Youngwoo Nam<sup>2</sup> (0000-0001-5936-1124), Won Il Cho<sup>2</sup> (0000-0001-8133-9898) and Young-Seuk Park<sup>1,3,\*</sup> (0000-0001-7025-8945) (<sup>1</sup>Department of Biology, Kyung Hee University, Dongdaemun-gu, Seoul 02447, Republic of Korea; <sup>2</sup>Forest Disease and Pest Division, Korea Forest Research Institute, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Republic of Korea; <sup>3</sup>Department of Life and Nanopharmaceutical Sciences, Kyung Hee University, Dongdaemun-gu, Seoul 02447, Republic of Korea)

**Abstract** Pine wilt disease (PWD) is one of the hazardous pine tree diseases in whole world. In Korea, PWD has been spreading since it was first observed in Busan in 1988. Dispersion of PWD is mainly mediated by its vectors such as Japanese pine sawyer. In this study, we characterized environmental condition including meteorological factors, geographical factors, and land use factors influencing on the occurrence of PWD. The occurrence data of PWD were collected at 153 sites where were the initial occurrence sites of PWD in local government regions such as city, Gun, or Gu scale. We used Akaike Information Criterion (AIC) to evaluate the relative importance of environmental variables on the discrimination of occurrence or absence of PWD. The results showed that altitude, slope, and distance to road were the most influential factors on the occurrence of PWD, followed by distance to building. Finally, our study presented that human activities highly influenced on the long term dispersal of PWD.

**Key words:** occurrence patterns, nationwide scale, pine wood nematode, environmental factors, human mediated dispersal, invasive species dispersal, hazard rating of invasive species

## 서 론

소나무재선충 (Pine wood nematode; *Bursaphelenchus xylophilus*)에 의해 소나무 및 잣나무가 고사하는 소나무재선충병 (Pine wilt disease, PWD)은 현재 전 세계적으로 가장 심각한 소나무 질병으로 여겨지고 있다. 1905년 일본에서 처음 피해가 보고된 이후 (Yano, 1913), 병 발생지역이 일본 전역으로 확산되었다. 우리나라에는 소나무재선충병

피해가 1988년 부산에서 처음 보고된 이후 (Yi *et al.*, 1989) 피해 발생지역이 전국으로 확대되고 있다. 일본, 한국뿐만 아니라 중국 등 인접국가로 피해가 확산되고 있으며, 유럽 지역의 포르투갈 등 세계 각지로 피해 발생이 확산되고 있다 (Webster and Mota, 2008; Zhao *et al.*, 2008).

소나무재선충병의 원인인 소나무재선충은 그 자체로는 이동성이 거의 없기 때문에 새로운 지역에서 발생하는 소나무재선충병은 소나무재선충의 매개충에 의해 확산된다. *Monochamus* 속의 하늘소류가 소나무재선충을 옮기는 매개충으로 알려져 있다 (Morimoto and Iwasaki, 1972). 소나무재선충병의 발생과 확산은 다양한 환경 요인의 영향을 받는데 그중 온도는 소나무재선충뿐만 아니라 매개충

Manuscript received 26 September 2017, revised 8 November 2017, revision accepted 9 November 2017  
\* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244, E-mail: parkys@khu.ac.kr

의 생장 및 발달에도 영향을 주기 때문에 소나무재선충병 확산에 있어 주요 인자로 여겨진다(Lu *et al.*, 2005; Futai, 2008; Hirata *et al.*, 2017). 일반적으로 소나무재선충병은 연평균온도가 20°C 이상인 지역에서 발생하는 것으로 알려져 있으나(Rutherford and Webster, 1987) 연평균온도가 14°C 이상인 지역에서 소나무재선충병이 확산이 되고, 매 개충인 하늘소의 생장 기준 온도가 13.2°C였다는 보고가 있다(Kwon *et al.*, 2006). 한편, 고도 450 m 이상에서 소나무재선충병의 피해가 감소하며, 고도 750 m 이상에서는 소나무재선충병 발병 자체가 매우 적게 나타난다고 보고되었다(Kiyohara *et al.*, 1975). 그러나, 최근 해발 고도 1,150 m 지점에서도 소나무재선충병에 의한 고사목이 나타났다는 보고가 있다(Kiyohara *et al.*, 1975; Ohsawa and Akiba, 2014). 강수량은 소나무재선충의 기주식물에 영향을 주어 소나무재선충병의 확산에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Futai, 2008; Park *et al.*, 2013). 또한 소나무 서식지의 경사도, 방위, 기주식물의 영양, 흉고 직경 등이 소나무재선충병의 발생에 있어 중요한 역할을 한다는 보고가 있다(Futai, 2008; Park *et al.*, 2013). 최근 소나무재선충병의 확산이 온도와 강수량 등 자연적인 요인뿐만 아니라 피해 고사목의 운반 등 인간의 활동에 의한 인위적인 요인에 의해

증가하고 있다는 주장이 힘을 얻고 있다(Mota and Vieira, 2008; Shin, 2008).

우리나라에서 소나무재선충병의 방제면적은 2015년 61,089 ha, 2016년 80,000 ha로 지속적으로 증가하고 있다(KFS, 2016). 소나무재선충병이 전국적으로 확산되고 있는 상황에서 소나무재선충병으로 인한 산림 자원의 손실을 최소화 하기 위해서는 소나무재선충병의 발생 및 확산 특성을 이해하여 효과적인 방제 전략을 수립하고 방제 효율을 극대화하는 방안을 마련해야 한다. 본 연구는 우리나라에서 소나무재선충병 초기발생지의 환경 특성을 분석하고, 소나무재선충병 발생에 대한 피해위험도 평가를 위한 기본자료를 제공하기 위해 수행되었다.

## 재료 및 방법

본 연구에서는 우리나라 시·군·구 단위에서 소나무재선충병 초기 발생지를 확인하고, 각 발생지점의 좌표를 수집 하였다. 그리고 각 지점에 대한 환경자료를 GIS 등을 통하여 추출하여 초기 발생지점의 환경 특성을 분석하였다. 자료수집 및 분석의 흐름은 Fig. 1과 같다.

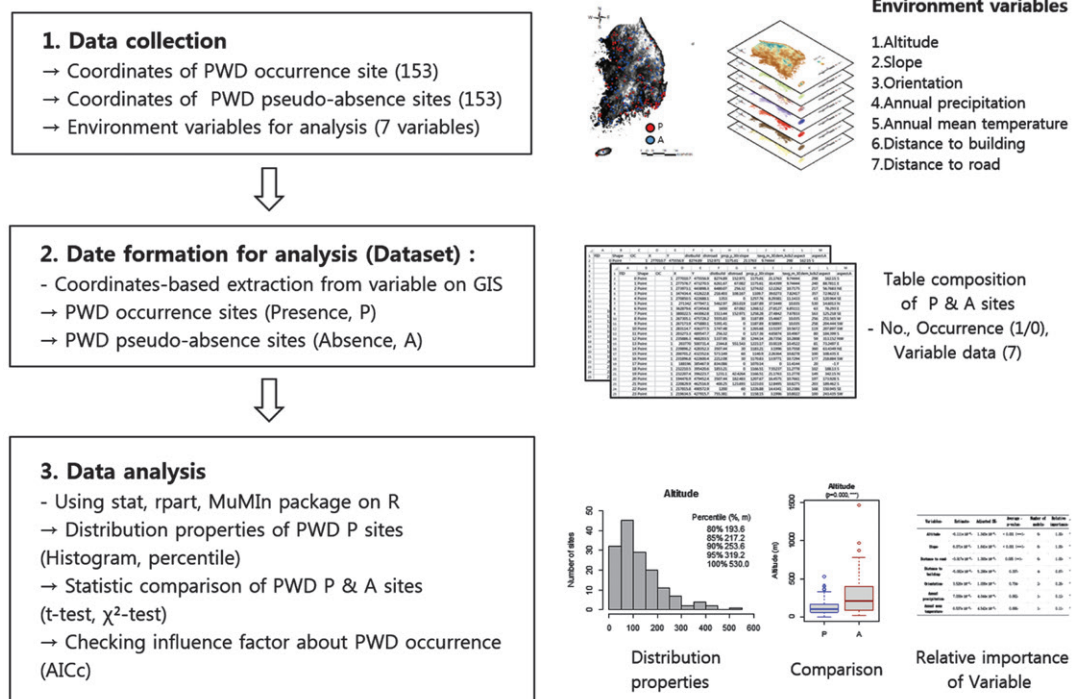


Fig. 1. Conceptual diagram for studying the effects of environmental variables (altitude, slope, aspect, annual precipitation, annual mean temperature, distance to building, and distance to road) on the occurrence of pine wilt disease (PWD).

### 1. 소나무재선충병 초기 발생지

기존 문헌 자료(KFRI, 2011)와 국립산림과학원 내 자료를 바탕으로 1988년부터 2016년까지 전국 153개지점에서 발생한 소나무재선충병 초기 발생지 위치를 획득하였다. 광역자치단체 단위에서의 초기발생지 분포는 다음과 같다. 부산광역시 15개지점, 경상남도 14개지점, 경상북도 15개지점, 전라남도 9개지점, 전라북도 6개지점, 충청남도 5개지점, 충청북도 5개지점, 경기도 14개지점, 강원도 7개지점, 서울특별시 4개지점, 대구광역시 4개지점, 울산광역시 5개지점, 광주광역시 2개지점, 제주도 2개지점, 세종특별자치시 1개지점 등이다.

소나무재선충병의 초기 발생에 미치는 환경영향을 평가하기 위하여 각 초기 발생지에서 5개의 자연적 환경요인(고도, 경사도, 방위, 연강수량, 연평균기온)과 2개의 인위적 요인(건물까지 거리, 도로까지 거리), 총 7개 환경 변수를 측정하였다. 각 자료는 지리정보시스템(GIS, ESRI 사 ArcGIS 10.1 사용)을 이용하여 디지털 지도에서 산출하였으며, 국립산림과학원에서 제공한 ‘전국단위행정구역도’, ‘수치표고모형’과 국토교통부 국가공간정보포털 및 표준노드링크 사이트에서 얻은 ‘전국표준노드링크’, ‘도로중심선’ 및 ‘GIS건축물통합정보’, 기상청 기후정보포털에서 받은 ‘한반도기후변화 시나리오(RCP 8.5, 제어적분 400년)’ 자료를 사용하였다. 강수량과 평균기온은 30년(1981~2010) 자료를 이용하여 평년 자료로 산출하였다. 방위 변수를 제외한 모든 자료는 수치형 자료이며, 방위 변수는 8방위 및 평지로 구성된 명목형 자료를 코사인 함수를 통해 서열형 자료로 변환하여 사용하였다.

소나무재선충병 발생지의 특성을 비발생지 특성과 비교 분석하기 위하여 153개 초기발생지에 대응하는 153개 지점의 의비발생지(Pseudo-absence sites, 이하 비발생지)를 전국에서 무작위(Random point) 선택하였다. 이후 비발생지의 환경 자료를 초기 발생지 자료와 같이 GIS를 통해 구성하였다. 무작위 선택은 R(<https://www.r-project.org/>) 프로그램 상에서 dismo package(Hijmans, 2017)를 이용하였다.

### 2. 소나무재선충병 초기 발생지 특성 분석

소나무재선충병 초기 발생지에 대해 각 환경 변수별로 분포 특성을 히스토그램으로 확인하였다. 그리고 초기 발생지와 비발생지 간 환경 변수의 차이는 t-검정과 카이제곱 검정을 통해 통계학적 유의성을 확인하였다. 이후 아카이케 정보 기준(Akaike Information Criterion, AIC)을 이용해 소나무재선충병 초기 발생 판별 여부에 사용한 환경 변수들의 상대적 중요성을 평가하였다. AIC는 주어진 데

이터를 통해 학습된 통계학적 모델의 상대적 적합성과 구조적 단순성을 나타내주는 지표로 여러 모델 비교 시 모델을 선택하는 기준으로 사용된다(Aho *et al.*, 2014). AIC 산출을 위한 모델은 소나무재선충병 발생 유무를 0(비발생)과 1(발생)으로 변환하여 구성하였다. AIC는 표본 자료 수에 의한 AIC 값의 변화를 최소화한 AICc(Corrected AIC, second order AIC)를 사용하여 모델의 변수 중요성을 평가하였다(Aho *et al.*, 2014). 변수의 상대적 중요성을 평가하는 계산 과정은 R 프로그램 상에서 MuMin(Barton, 2016) package를 이용하였다. MuMin package는 모든 사용 변수에 대한 경우의 수만큼 선형 모델들을 만든 후, 최저 AICc를 가진 모델을 기준으로 주어진 AICc 범위( $\Delta\delta$ ) 내 모델들에서 사용된 변수와 그 유의성을 계산하는 R package이다.

## 결 과

소나무재선충병 초기 발생지 153개 지점 중 80%가 고도 200 m 이하에 위치하였으며, 300 m 이하의 저고도 지역이 전체의 90%였다. 또한 초기 발생지 중 90%가 경사도 30° 미만에 위치하였으며, 모든 초기 발생지는 경사도 40° 미만에 존재하였다. 전체 초기 발생지의 54%(82개지점)가 남동쪽(SE), 남쪽(S), 남서쪽(SW)에 위치하였다. 연평균기온은 10°C~13°C, 연강수량은 950 mm~1,300 mm 범위의 지역에 주로 분포하였다. 한편 전체 초기 발생지 중 85%가 건물로부터 5 km 이내, 95%가 도로로부터 200 m 이내에 위치하였다(Fig. 2).

소나무재선충병 초기 발생지는 비발생지에 비해 전체적으로 낮은 고도에 위치하였다( $t = -6.734, p < 0.001$ ). 경사각은 초기 발생지점들이 상대적으로 낮은 경사도에 위치하는 경향성을 보였으나 통계적으로는 유의하지 않았다( $t = -0.855, p = 0.392$ ). 방위는 비발생지에 비해 초기 발생지가 북쪽(N)보다 남쪽(S)에 상대적으로 많이 분포하였으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다( $\chi^2 = 38.372, p < 0.001$ ). 연평균기온은 상대적으로 초기 발생지점들에서 높았으나( $t = 4.675, p < 0.001$ ), 연강수량은 초기 발생지와 비발생지 간 큰 차이를 보이지 않았다( $t = 0.728, p = 0.467$ ). 초기 발생지로부터 건물 및 도로까지의 거리는 모두 비발생지에 비해 더 가까웠다(건물:  $t = -4.889, p < 0.001$ , 도로:  $t = -4.178, p < 0.001$ )(Fig. 3).

AICc를 이용해 모델 내 변수의 상대적 중요성을 분석한 결과, 최저 AICc가 359.82로 나타났으며, AICc 범위를 +2까지 했을 경우( $\Delta\delta = 2$ ) 전체 6개 선형 모델이 선택되었다. 해당 모델들을 분석한 결과, 고도, 경사도, 그리고 도로

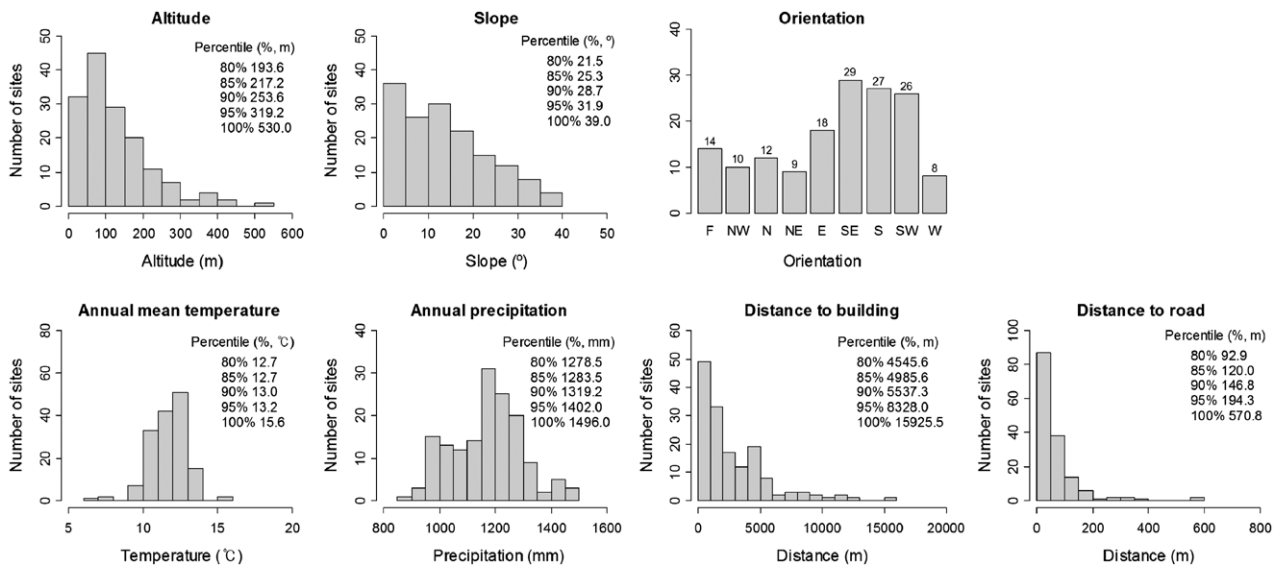


Fig. 2. Characteristics of environmental variables at the occurrence sites of pine wilt disease. F: flat area, NW: northwest, N: north, NE: northeast, E: East, SE: southeast, SE: southeast, SW: southwest, and W: west orientation.

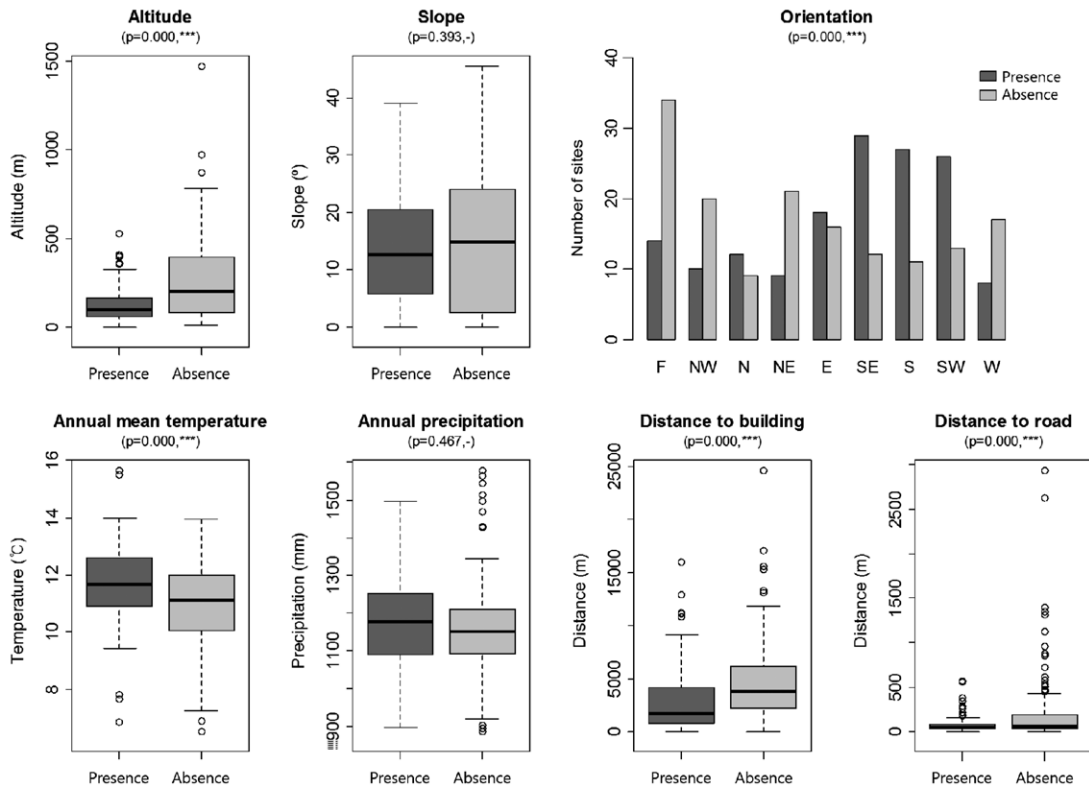


Fig. 3. Differences of environmental variables between occurrence sites and pseudo-absence sites of pine wilt disease. Pseudo-absence sites were selected randomly from the area where pine wilt disease did not occurred. T-test was conducted on six variables (altitude, slope, annual precipitation, annual mean temperature, distance to building, and distance to road), and chi-squared test was conducted on orientation. Boxplots show outlier, a range of variable, 75% quartile, median, 25% quartile. P: presence, and A: absence.

**Table 1.** Relative importance of variables for determining presence or absence for pine wilt disease using AICc. Minimum AICc was 359.82 and six models was included in AICc range ( $\Delta\delta = 2, 359.82-361.82$ ).

Variables	Estimate	Adjusted SE*	Average p-value	Number of models	Relative importance
Altitude	$-6.111 \times 10^{-3}$	$1.343 \times 10^{-3}$	<0.001	6	1.00
Slope	$6.071 \times 10^{-2}$	$1.641 \times 10^{-2}$	<0.001	6	1.00
Distance to road	$-3.917 \times 10^{-3}$	$1.393 \times 10^{-3}$	0.005	6	1.00
Distance to building	$-5.082 \times 10^{-5}$	$5.296 \times 10^{-5}$	0.337	4	0.67
Orientation	$3.526 \times 10^{-2}$	$1.036 \times 10^{-1}$	0.734	2	0.26
Annual precipitation	$7.039 \times 10^{-5}$	$4.044 \times 10^{-4}$	0.862	1	0.12
Annual mean temperature	$6.537 \times 10^{-3}$	$4.542 \times 10^{-2}$	0.886	1	0.11

\*SE: Standard error

까지의 거리가 6개 모델에 모두 선택되었고, 통계학적으로 유의한 차이를 보였다( $p < 0.001$ ) (Table 1). 건물까지의 거리는 4개의 모델에서 유효한 인자로 선정되었다.

## 토의 및 결론

소나무재선충병 초기 발생지의 환경 특성을 분석한 결과, 초기 발생지와 비발생지 사이에 고도, 방위, 연평균기온, 도로와의 거리, 건물과의 거리가 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 초기 발생지는 지형적으로는 상대적으로 저고도(300 m 이하), 낮은 경사도(30° 이하), 남쪽 사면에 위치하였다. 그리고 기후 조건은 연평균기온이 10°C~13°C 범위에서 주로 분포하였다. 또한 비발생지에 비해 상대적으로 건물과 도로에 가깝게 위치하고 있었다. 한편 AICc를 이용한 판별 분석모델을 통한 변수의 중요성을 평가한 결과, 소나무재선충병 발생 여부에 고도, 경사도, 도로까지 거리가 상대적으로 중요한 변수로 작용함을 보였다. 이러한 결과는 Kim(2006)이 수행한 경상북도 권역 내의 소나무재선충병 발생지 특성 분석 연구 결과와도 유사한 것이다. Kim(2006)은 피해 발생지의 80%가 고도 100 m 이하에, 71%가 경사도 10° 이하에, 75.5%가 퇴적암에 위치하였다고 하였다.

소나무재선충병 발병에 있어 온도와 고도, 경사도가 주요한 원인으로 다수의 연구에서 보고되었다(Rutherford and Webster, 1987; Akema and Futai, 2005; Kim, 2006; Pérez *et al.*, 2008; Mota *et al.*, 2009; Boyd *et al.*, 2013; Ohsawa and Akiba, 2014). 한편, 온도와 관련되어 소나무재선충병은 연평균기온이 20°C 이상에서 발병한다고 보고 되었으며(Rutherford and Webster, 1987; Ohsawa and Akiba, 2014), 일본에서 연평균기온이 14°C보다 높은 지역에서 소나무 재선충병이 확산된다는 보고가 있다(Mamiya, 1988). 또한 연평균기온 15°C를 기준으로 소나

무재선충병 발생의 잠재적 분포영역을 전 지구범위에서 평가한 연구 결과도 있다(Hirata *et al.*, 2017). 그러나 우리나라에서 소나무재선충병의 초기 발생지는 주로 연평균기온이 10°C~13°C 사이에 위치하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 국내 소나무재선충병 발생 하한 온도가 10°C로 생각된다는 주장을 뒷받침해 준다(Kwon *et al.*, 2006).

한편, 연강수량이 비록 초기 발생지와 비발생지 비교에서는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나, 소나무재선충병이 부산에서 처음 발생하여 주변으로 확산되어 많은 피해가 발생하고 있는 영남지역은 우리나라 다른 지역에 비해 상대적으로 강수량이 적은 반면 온도는 상대적으로 높은 지역이다. 이러한 특성은 가뭄으로 인한 수분 스트레스가 소나무 등의 생장에 직접적인 영향을 끼쳐 소나무의 저항성을 감소시키고, 소나무재선충에 대한 민감성을 높이는 결과를 초래한다는 선행 연구 결과와 부합할 수 있다(Mamiya, 1983; Ikeda, 1996; Miki *et al.*, 2001; Akema and Futai, 2005; Park *et al.*, 2013).

그러나, 기온 및 강수량이 소나무재선충병 발생에 중요한 인자로 작용하지만 소나무재선충병 발생에 미치는 온도 조건에 대한 결과가 매우 다양하므로 온도가 소나무재선충병 발생 및 확산에 미치는 영향에 대한 종합적 연구가 필요하다(Rutherford and Webster, 1987; Mamiya, 1988; Kwon *et al.*, 2006; Ohsawa and Akiba, 2014). 또한 강수량에 따른 수분 스트레스가 소나무재선충병 발생에 미치는 영향에 대한 직접적인 연구는 부족하며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

건물 및 도로와의 거리는 비발생지에 비해 초기 발생지에서 보다 짧았다(Fig. 3). 건물 및 도로는 인간 활동을 반영해 주는 것으로 소나무재선충병 발생은 자연환경적 요인뿐 아니라 인간 활동도 중요한 요인으로 작용한다는 것을 제시해 준다(Mota and Vieira, 2008; Shin, 2008). 중국에서는 소나무재선충병 발생이 인구 밀도와 연관이 있어 인간 활동에 기인한 인자들이 소나무재선충병 확산에 주요한 역

할을 한다고 보고된 바 있다(Robinet *et al.*, 2009). 특히 우리나라에서는 대다수의 소나무재선충병 신규 피해지가 고속도로 주변에 위치하고 있는데, 이는 다양한 형태의 인간 활동으로 인해 소나무재선충병 피해지로부터 외부로 반출된 피해목 또는 매개충에 의한 소나무재선충병 확산으로 추측된다(KFRI, 2009). 한편, 우리나라에서 다른 지역에 비해 영남지역에서 소나무재선충병 피해발생이 많은 것은 기후적인 영향뿐만 초기 발생지부터 가깝다는 지리적 특성과 도로 및 도시 발달 등의 영향도 반영된 것으로 보인다.

소나무재선충병의 확산은 매개충 자체의 이동력, 바람 등에 의한 이동으로도 이루어지지만 이들에 의한 확산은 대부분 중단거리 내에서의 확산이며, 인간 활동에 의한 확산은 더 멀리 떨어진 장거리 확산에 영향을 미치는 것으로 보인다. 즉 인간 활동으로 인해 야기되는 소나무재선충병의 확산은 주로 신규 피해지를 유발하며 소나무재선충병의 피해발생지의 확산을 매우 가속화시키는 역할을 한다.

본 연구에서는 국내 광역시 및 특별시, 도 단위에서의 소나무재선충병 초기발생지를 대상으로 소나무 그 분포 파악을 확인하고 소나무재선충병 초기 발생에 대한 중요 환경 요인을 확인하였다. 소나무재선충병으로 인한 피해 지역 및 방제 면적이 꾸준히 증가하는 현 상황에서 본 연구 결과는 예찰 및 항공방제 등을 통한 소나무재선충병 방제 구역에 대한 선택과 집중 및 방제 효율 증가에 기여할 것으로 기대된다. 또한 앞으로 소나무재선충병에 대한 선제적 방제 전략을 수립하기 위해서는 본 연구 결과를 바탕으로 전 국토를 대상으로 한 소나무재선충병의 잠재적 피해 발생 위험도 평가가 진행되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 국립산림과학원 연구개발사업 및 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(FTIS 2017042 B10-1723-CA01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## REFERENCES

- Aho, K., D. Derryberry and T. Peterson. 2014. Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology* **95**(3): 631-636.
- Akema, K. and K. Futai. 2005. Ectomycorrhizal development in a *Pinus thunbergii* stand in relation to location on a slope and effect on tree mortality from pine wilt disease. *Journal of Forest Research* **10**: 93-99.
- Barton, K. 2016. Multi-Model Inference. R package version 1.15.6.
- Boyd, I.L., P.H. Freer-Smith, C.A. Gilligan and H.C. J. Godfray. 2013. The consequence of tree pests and diseases for ecosystem services. *Science* **342**: 1235773. DOI: 10.1126/science.1235773
- Futai, K. 2008. Pine wilt in Japan: From first incidence to present, p. 5-12. *In: Pine Wilt Disease* (Zhao, B.G., K. Futai, J.R. Sutherland and Y. Takeuchi, eds.). Springer, Tokyo.
- Hijmans, R.J., S. Phillips, J. Leathwick, J. Elith and M.R.J. Hijmans. 2017. Package 'dismo'. *Circles*, 9, 1.
- Hirata, A., K. Nakamura, K. Nakao, Y. Kominami, N. Tanaka, H. Ohashi, K.T. Takano, W. Takeuchi and T. Matsui. 2017. Potential distribution of pine wilt disease under future climate change scenarios. *PLoS ONE* **12**(8): e0182837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182837>
- Ikeda, T. 1996. Responses of water-stressed *Pinus thunbergii* to inoculation with avirulent pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*): water relations and xylem histology. *Journal of Forest Research* **1**(4): 223-226.
- Kim, J.W. 2006. Occurrence status of pine wilt disease and ecological approaches for its prevention plan. *Gyeongbuk Development Research Papers* **5**: 183-223.
- Kiyohara, T., K. Suzuki and H. Hashimoto. 1975. Population dynamics of *Bursaphelenchus lignicolus* at the early stage after inoculation. *Transactions of the Annual Meeting of the Japanese Forestry Society* **86**: 299-300.
- Korea Forest Research Institute (KFRI). 2009. Study for Ecological Traits of Pine Wilt Disease. Korea Forest Research Institute, Seoul.
- Korea Forest Research Institute (KFRI). 2011. Breakout History of Pine Wilt Disease in Korea Viewing at the Photographs. Korea Forest Research Institute, Seoul.
- Korea Forest Service. 2016. Statistical Yearbook of Forestry 2016, Korea Forest Service, Dajeon.
- Kwon, T.S., J.H. Lim, S.J. Sim, Y.D. Kwon, S.K. Son, K.Y. Lee, Y.T. Kim, J.W. Park, C.H. Shin, S.B. Ryu, C.K. Lee, S.C. Shin, Y.J. Chung and Y.S. Park. 2006. Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* **95**(5): 543.
- Lu, Q., W.D. Wang, J. Liang, D.H. YAN, X.Z. JIA and X.Y. ZHANG. 2005. Potential suitability assessment of *Bursaphelenchus xylophilus* in China. *Forest Research Chinese Academy of Forestry* **18**(4): 460.
- Mamiya, Y. 1983. Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Annual Review of Phytopathology* **21**(1): 201-220.
- Mamiya, Y. 1988. History of pine wilt disease in Japan. *Journal of Nematology* **20**(2): 219-226.
- Miki, N., K. Sakamoto, T. Nishimoto, K. Yoshikawa and Y. Hada. 2001. Relationship between the incidence of pine wilt disease and the drainage area. *Journal of Forest Re-*

- search **6**(3): 181-186.
- Morimoto, K. and A. Iwasaki. 1972. Role of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) as a vector of *Bursaphelenchus lignicolus* (Nematoda: Aphelenchoididae). *Journal of the Japanese Forestry Society* **54**(6): 177-183.
- Mota, M.M. and P.C. Vieira. 2008. Pine wilt disease in Portugal, p. 33-38. *In: Pine Wilt Disease* (Zhao, B.G., K. Futai, J.R. Sutherland and Y. Takeuchi, eds.). Springer, Tokyo.
- Mota, M.M., K. Futai and P. Vieira 2009. Pine wilt disease and the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, p. 253-274. *In: Integrated Management of Fruit Crops Nematodes* (Ciancio, A. and K. Mukerji, eds.). Springer, Dordrecht.
- Ohsawa, M. and M. Akiba. 2014. Possible altitude and temperature limits on pine wilt disease: the reproduction of vector sawyer beetles (*Monochamus alternatus*), survival of causal nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*), and occurrence of damage caused by the disease. *European Journal of Forest Research* **133**(2): 225-233.
- Park, Y.S., Y.J. Chung and Y.S. Moon 2013. Hazard ratings of pine forests to a pine wilt disease at two spatial scales (individual trees and stands) using self-organizing map and random forest. *Ecological Informatics* **13**: 40-46.
- Pérez, G., J.J. Díez, F. Ibeas and J.A. Pajares. 2008. Assessing pine wilt disease risk under a climate change scenario in Northwestern Spain, p. 269-282. *In: Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (Bravo, F., V. LeMay and R. Jandl, eds.). Springer, Cham.
- Robinet, C., A. Roques, H. Pan, G. Fang, J. Ye, Y. Zhang and J. Sun. 2009. Role of Human-Mediated Dispersal in the Spread of the Pinewood Nematode in China. *PLoS ONE* **4**(2): e4646.
- Rutherford, T.A. and J.M. Webster. 1987. Distribution of pine wilt disease with respect to temperature in North America, Japan, and Europe. *Canadian Journal of Forest Research* **17**(9): 1050-1059.
- Shin, S.C. 2008. Pine wilt disease in Korea, p. 26-32. *In: Pine Wilt Disease* (Zhao, B.G., K. Futai, J.R. Sutherland and Y. Takeuchi, eds.). Springer, Tokyo.
- Webster, J. and Mota, M. 2008. Pine wilt disease: global issues, trade and economic impact, p. 1-3. *In: Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems* (Mota, M.M. and P. Vieira, eds.). Springer, Dordrecht.
- Yano, S. 1913. Investigation on pine death in Nagasaki prefecture. *Sanrin-Kouhou* **4**: 1-14.
- Yi, C.K., B.H. Byun, J.D. Park, S.I. Yang and K.H. Chang. 1989. First finding of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle and its insect vector in Korea. *Research Reports of the Forestry Research Institute (Seoul)* **38**: 141-149.
- Zhao, B.G., K. Futai, J.R. Sutherland and Y. Takeuchi (Eds.). 2008. *Pine Wilt Disease*. Springer, Tokyo.