

국내 소나무재선충병 발생 특성 분석: 2016~2018년 예찰데이터를 기반으로

심상택¹ · 이성희² · 이차영³ · 남영우^{3*}

¹산림청 산림보호국, ²한국임업진흥원 산림공간정보실, ³국립산림과학원 산림병해충연구과

Analysis of Occurrence Characteristics of Pine Wilt Disease in Korea based on Monitoring Data from 2016 to 2018

Sang Taek Sim¹, Seong-Hee Lee², Cha Young Lee³ and Youngwoo Nam^{3*}

¹Forest Protection Bureau, Korea Forest Service, Daejeon 35208, Korea

²Forest Geographic Information Division, Korea Forestry Promotion Institute, Seoul 07570, Korea

³Forest Insect Pests & Diseases Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 소나무재선충병의 발생 특성을 이해하는 것은 소나무재선충병의 피해 및 확산을 최소화하기 위한 방제전략 수립을 위해 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 기상 요인, 지리적 요인, 그리고 인위적 요인과 같은 환경 조건과 소나무재선충병 발생과의 관계를 분석하였다. 2016년 5월부터 2018년 4월까지 소나무재선충병 발생 자료와 자연적, 인위적 요인들을 포함한 다양한 환경 조건의 공간 자료들을 수집하였고, 소나무재선충병에 의한 고사목 발생 분수에 대한 환경 변수들의 상대적 기여도를 평가하였다. 총 17개의 자연적 요인과 인위적 요인 중에서 소나무재선충병 발생에 영향을 미치는 요인들을 확인한 결과 자연적 요인은 고도와 5~8월 기온이, 인위적 요인은 도로와 건물과의 거리가 소나무재선충병 감염고사목 발생분수와 밀접하게 연관이 있는 것으로 나타났다.

Abstract: Understanding the occurrence characteristics of pine wilt disease (PWD) is essential for determining a suitable strategy to minimize the damage caused by PWD. Thus, in this study, we characterized various environmental conditions, including meteorological factors, geographical factors, and artificial factors influencing the occurrence of PWD. The occurrence data of PWD from May 2016 to April 2018 and spatial data of various environmental factors, including natural and anthropogenic factors, were collected. We evaluated the relative contribution of the environmental variables on the number of dead pine trees by PWD. In this study, among the 17 natural and anthropogenic factors, the factors affecting the occurrence of dead trees by PWD were verified. The results showed that altitude and temperature from May to August, among natural factors, and distance to building and forest road among anthropogenic factors were the most influential factors on the occurrence of PWD.

Key words: pine wilt disease, pine wood nematode, *Monochamus saltuarius*, *Monochamus alternatus*

서론

소나무재선충병을 야기시키는 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle)은 원래 미

국, 캐나다 등 북미 지역에 분포하는 것으로 알려져 있다(Steiner and Buhrer, 1934; Knowles et al., 1983; Choi et al., 2017). 그러나 이 선충이 다른 나라로 침입하게 되는 경우 그 지역에 토착하고 있는 소나무류에 심각한 피해를 입히는 것으로 보고되고 있다(Cheng et al., 1983; Wingfield et al., 1984; Bergdahl, 1988; Mamiya, 1988; Yi et al., 1989; Dwinell, 1997; Son et al., 2006; Mota and Vieira, 2008). 일본의 경우 1905년에 최초 피해가 발견된 이후(Yano, 1913), 피해가 급속하게 확산되어 2018년 말을 기준으로 홋카이도를 제외한 전역으로 확산되었다(Kishi,

※ 본 논문은 심상택(2019)의 박사학위논문을 바탕으로 수정·보완하여 작성한 것임.

* Corresponding author

E-mail: orangmania99@korea.kr

ORCID

Youngwoo Nam  https://orcid.org/0000-0002-5450-9617

1995). 국내에서는 1988년 10월 부산에서 최초 발생하여 피해 발생지역이 지속적으로 확대되고 있으며(NIFoS, 2020), 일본, 한국뿐만 아니라 유럽 지역의 포르투갈 등에서도 소나무류에 심각한 피해를 주고 있다(Webster and Mota, 2008).

소나무재선충은 기주에서 다른 기주로 스스로 이동할 능력이 없기 때문에 매개충인 *Monochamus* 속의 하늘소류에 의존하여 새로운 기주로 이동하며, 따라서 소나무재선충병의 확산에는 매개충이 중요한 역할을 한다(Morimoto and Iwasaki, 1972; Kwon et al., 2018). 따라서 소나무재선충병의 발생 및 확산은 소나무재선충과 매개충에 생태적으로 영향을 주는 요인과 밀접하게 연관이 되어 있을 것이다. 그 중 기온은 소나무재선충과 매개충의 발육과 분포에 영향을 주기 때문에 소나무재선충병 발생과 확산에도 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Lu et al., 2005; Futai, 2008; Hirata et al., 2017). 북미와 일본에서는 소나무재선충과 그 매개충이 분포하는 지역 중 연평균기온이 20°C 이상인 지역에서 소나무재선충병이 발생한 것으로 보고되었다(Rutherford and Webster, 1987). 국내의 경우 소나무재선충 매개충인 솔수염하늘소의 북방한계온도는 연평균기온이 약 10 °C 이상, 북방수염하늘소의 남방한계온도는 연평균기온이 13.2 °C 이하로 보고되었다(Kwon et al., 2006). 소나무재선충병의 발생과 확산은 기온 외에 다양한 환경 요인의 영향을 받는데 강수량, 소나무 서식지의 지형, 경사, 표고 등 입지환경이 소나무재선충병의 발생에 있어 중요한 역할을 한다는 보고(Futai, 2008; Park et al., 2013)가 있다. 또한, 앞에서 언급한 자연적 요인뿐만 아니라 소나무재선충 매개충을 포함한 피해 고사목의 운반 등과 같은 인위적 요인의 영향에 대한 보고도 있다. Robinet et al.(2009)은 장·단거리 확산모델을 이용하여 중국의 소나무재선충병 확산과 관련하여 인위적 확산 영향 요인을 분석하였으며, 철도, 항만, 호수 및 인구 밀도가 소나무재선충병의 확산에 영향을 미친다고 보고하였다.

소나무재선충병의 국내 최초 발생 이후 지속적으로 방제한 결과, 피해 본수는 매년 감소하고 있지만 피해 면적은 여전히 증가하고 있는 추세이다(NIFoS, 2020). 소나무재선충병에 의한 소나무류 피해를 최소화하기 위해서는 소나무재선충병의 발생·확산 특성을 분석하여 위험이 높은 지역을 사전에 파악하고, 이를 바탕으로 피해의 발생과 확산을 방지하기 위한 선제적 노력이 필요할 것이다. 따라서 본 연구는 지속적으로 확산되고 있는 소나무재선충병의 발생특성 및 확산 영향요인을 분석하여 소나무재선충병에 대한 선제적이고 효과적인 방제전략 수립을 지원하기 위한 기본 자료를 제공하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

1. 자료의 수집 및 처리

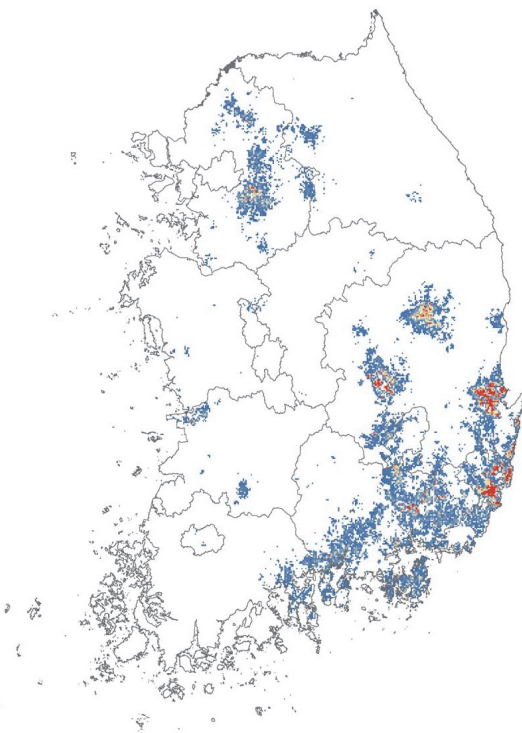
본 연구에서는 산림청에서 구축하여 운영하고 있는 산림재해통합관리시스템에 탑재된 소나무재선충 감염 고사목의 위치 좌표를 수집하였다. 2016년 이전 산림재해통합관리시스템을 통해 수집된 자료는 산림청의 소나무재선충병 고사목 발생본수에 대한 공식 통계자료 대비 고사목 좌표의 수가 2016년 이후 자료보다 상대적으로 적게 수집되어 정확한 분석을 위해 2016년 4월 이후의 자료를 활용하였다. 또한, 제주도는 지리적으로 독립된 섬이라는 특수성으로 인하여 데이터의 수집 및 분석대상에서 제외하였다. 소나무재선충병 발생에 영향을 미치는 요인은 크게 자연적인 요인과 사람의 활동에 따른 인위적인 요인으로 나누었다. 자연적 요인이라 매개충의 생활사에 따라 매개충의 활동과 산란 등에 영향을 미치는 기주 수목, 고도, 경사 등의 인자로, 인위적 요인은 사람의 다양한 활동과 관련이 있는 도로, 철도 등의 인위적인 이동을 인자로 구분하였다. 각 요인 별 자료수집현황은 Table 1과 같다.

자연적 요인인 임상정보는 산림청에서 제작하여 산림공간정보서비스를 통해 제공하고 있는 임상도(1:5,000)를 이용하였으며, 고도·경사도 및 방위와 같은 지형 정보들은 국토지리정보원에서 제작하여 국토정보플랫폼에서 제공하는 수치지형도에서 추출하였다. 수계정보는 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 물지도를 이용하였으며, 기온·풍향 및 일조시간 정보는 기상청에서 운영하는 기상자료개방포털에서 제공하는 전자기후도를 이용하였다. 산불피해지에 대한 위치정보는 산불발생 관련 대장을 산림청 산불방지과에서 입수하여 데이터베이스화하였으며, 혼중터미정보는 산림청 산림재해통합관리시스템에 탑재되어 있는 위치좌표를 추출하였다. 아울러 숲 가꾸기·간벌 등 벌채 관련 정보는 산림청에서 운영하는 국유림경영정보시스템과 사유림업무지원포털을 통해 관련 대장을 입수하여 전자도면으로 작성하였다.

인위적 요인과 관련된 고속도로·국도·지방도 및 주요 간선도로 등을 포함하는 도로망도와 철도망도는 국토지리정보원에서 운영하는 국토정보플랫폼에서 제공하는 자료를 이용하였다. 마을정보(주거지)는 단독주택·연립주택 및 아파트 등 건물을 말하며 환경부의 환경공간정보서비스에서 제공하는 전국 토지피복도를 이용하였다. 임도 정보는 산림청에서 제작하여 산림공간서비스에서 제공하는 임도망도를 이용하였으며, 소나무류 취급업체는 산림청 목재산업과 및 산림병해충방제과로부터 해당 대장을 입수하였으며, 항구정보는 국제식물검역인증원으로부터 비공간 데이터를 입수하였다.

Table 1. Type of variable, data source and data collection period.

Category	Factors	Source (management agency)	Data collection period
	No. of infected dead trees	산림재해통합관리시스템(산림청)	2016.5.~2018.4.
Natural	Forest physiognomy	산림공간정보서비스(산림청)	2019.1.
	Altitude	국토정보플랫폼(국토지리정보원)	2019.1.
	Slope	국토정보플랫폼(국토지리정보원)	2019.1.
	Orientation	국토정보플랫폼(국토지리정보원)	2019.1.
	Distance to river	국가수자원관리 종합정보시스템(한강홍수통계소)	2019.1.
	Mean Temp. from May to Aug.	기상자료개방포털(기상청)	2015~2017
	Wind direction from May to Aug.	기상자료개방포털(기상청)	2015~2017
	Duration of sunshine	기상자료개방포털(기상청)	2015~2018
	Distance to forest fire	(산림청 산불방지과)	2016
	Distance to fumigation pile	산림재해통합관리시스템(산림청)	2016
Anthropogenic	Distance to thinning forest	국유림경영정보시스템·사유림업무지원포털(산림청)	2015~2016 2014~2016
	Distance to road	국토정보플랫폼(국토지리정보원)	2019.1.
	Distance to rail	국토정보플랫폼(국토지리정보원)	2019.1.
	Distance to building	환경공간정보서비스(환경부)	2019.1.
	Distance to harbor	국제식물검역인증원	2019.1.
	Distance to forest road	산림공간정보서비스(산림청)	2019.1.
	Distance to pine tree handling facility	(산림청 목재산림과)	2019.1.

**Figure 1. Rasterized map based on the number of dead trees killed by pine wilt disease (1 km × 1 km).**

수집한 자료는 분석을 원활히 수행하기 위해 대표적인 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 중 하나인 ESRI사의 ArcMap version 10.5를 사용하여 전국을 1 km×1 km 격자 단위로 나누어 각 셀 안에 포함되는 소나무재선충병 피해고사목 본수를 계산하여 래스터화 하였다(Figure 1). 아울러 환경인자들 중 비공간 자료는 전자도면화 하였으며, 소나무재선충병 발생본수와 인자 간 관계를 분석하기 위하여 각 셀에 포함된 고사목의 발생좌표별 인자의 값을 추출하였다.

2. 자료 분석

소나무재선충병 발생본수에 대해 각 환경 인자별 분포 특성을 히스토그램으로 작성하여 확인하였다. 각 인자에 대해 Lilliefors 정규성 검정법(Conover, 1998)을 이용하여 정규성 검정을 실시한 결과, 모든 인자가 정규성을 갖지 못하여 Spearman 상관분석을 통해 인자 간 관계를 확인하였다. 또한, 소나무재선충병 발생본수와 관련하여 어떤 요인들이 더 영향을 미치는지 분석하기 위하여 R-Studio ver. 1.2.5033 프로그램을 사용하여 다중선형 회귀분석을 수행하였다(RStudio Team, 2015). 분석을 위해 종속변수는 소나무재선충병 피해고사목 발생본수로 선정하였고 독립변

수는 자연적인 요인과 인위적인 요인으로 구분하였으며, 자연적 요인은 임상, 고도, 경사도, 방위, 수계, 기온, 풍향, 일조시간, 산불피해지와와의 거리, 훈증터미와의 거리 및 벌채지와와의 거리로 총 11개 변수를 선정하였고, 인위적 요인은 도로와의 거리, 철도와의 거리, 마을과의 거리, 항구와의 거리, 임도와의 거리 및 소나무류 취급업체와의 거리로 총 6개 변수를 선정하였다. 독립변수 중 기후, 산불피해지, 훈증터미, 벌채지 관련 자료는 고사목이 발생 시점 이전의 자료를 사용하여 분석하였다.

결 과

소나무재선충병 감염고사목 발생본수는 소나무림에서

소나무재선충병 감염고사목이 가장 많았고, 다음으로 곰솔, 침활혼효림, 잣나무 숲으로 발생하였다. 고도별 분석 결과 소나무재선충병 감염고사목이 가장 많이 발생한 고도는 0~50 m 구간이었으며, 소나무재선충병 피해고사목의 대부분이 고도 300 m 이하에서 발생하였다. 소나무재선충병 감염고사목이 가장 많이 발생한 경사 범위는 4~6°였으며, 소나무재선충병 감염고사목은 5~8월 평균 기온이 23.8 °C에서 24.0 °C 사이일 때 가장 많이 발생하였다 (Figure 2). 또한, 소나무재선충병 감염고사목은 대부분 산불피해지로부터 40 km 이내에서 발생하였으며, 산불피해지로부터 8 km 이상인 지역에서는 감소하는 경향이 나타났다. 소나무재선충병 감염고사목은 훈증터미로부터 10 km 이내의 구간에서 가장 많이 발생하였고 벌채지로부터

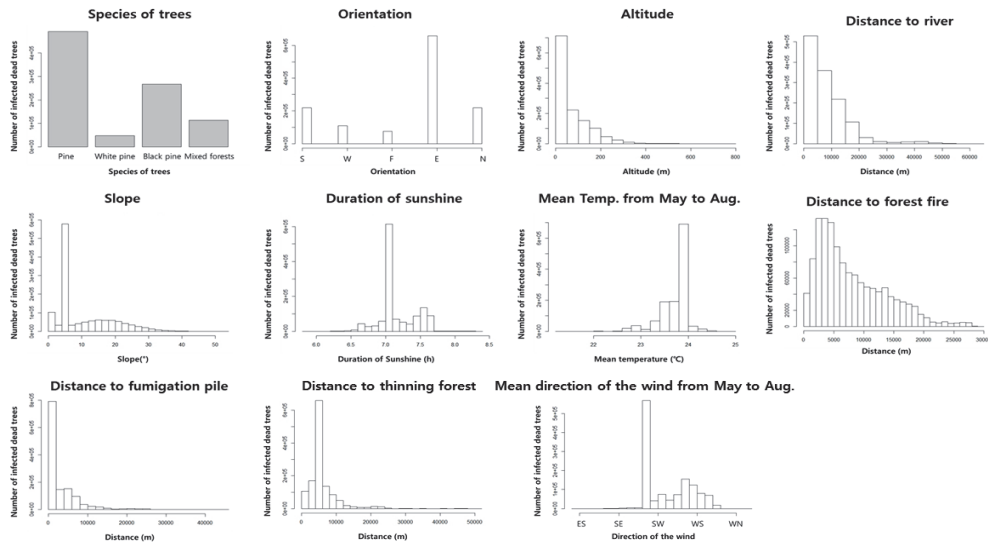


Figure 2. Characteristics of natural factors at the number of dead trees by pine wilt disease (Orientation; S: South, W: West, F, Flat area, E: East, N: North) (Direction of the wind; ES: East-south, 100°, SE: South-east, 150°, SW: South-west, 200°, WS: West-south, 250°, WN: West-north, 300°).

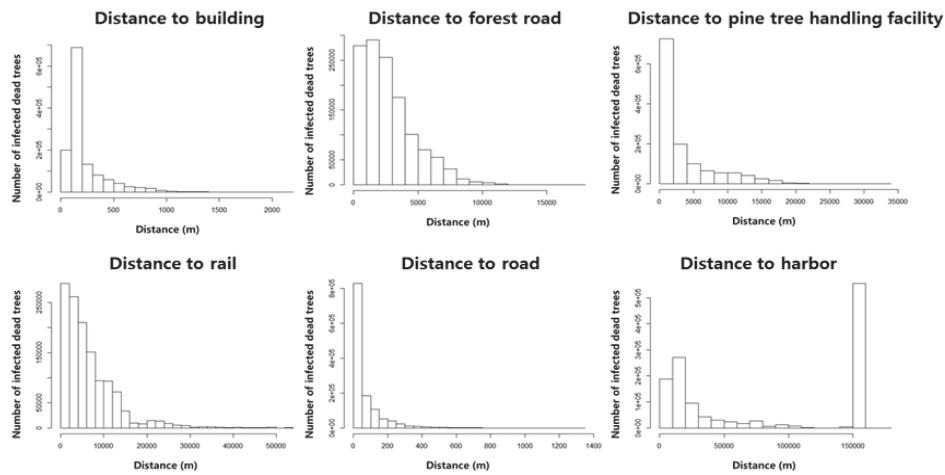


Figure 3. Characteristics of anthropogenic factors at the number of dead trees by pine wilt disease.

4 km부터 6 km 이내의 구간에서 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며, 대부분 도로에서부터 200 m 이내에 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 건물과의 거리가 1 km 이내의 지역에서 대부분의 소나무재선충병 감염고사목이 발생하였다. 그리고 임도 주변에서 소나무재선충병 감염고사목의 발생본수가 가장 많았고 소나무류 취급업체로부터의 2 km 이내에서 소나무재선충병 피해고사목이 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다(Figure 3).

소나무재선충병 감염고사목 발생본수와 자연적 요인 간 상관관계 분석 결과, 모든 인자 간 유의한 상관관계가 있

는 것으로 나타났다(Table 2). 인자별로는 고도와 경사도, 고도와 기온, 고도와 감염고사목, 경사도와 감염고사목, 기온과 감염고사목, 일조시간과 감염고사목 간에는 다소 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 아울러 고도와 벌채지, 수계와 일조시간, 기온과 일조시간, 산불피해지와 훈증더미 간에는 상대적으로 낮은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 인위적 요인 간 상관관계 분석 결과, 인자별로는 항구와 감염고사목 간 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났으며 그 다음으로 도로와의 거리, 건물과의 거리 순이었다(Table 3).

Table 2. Correlation matrix between PWD occurrence and natural factors.

	Altitude	Slope	Distance to river	Mean Temp. from May to Aug.	Duration of sunshine	Distance to forest fire	Distance to fumigation pile	Distance to thinning forest	No. of infected dead trees
Altitude	1.0000								
Slope	0.6546a	1.0000							
Distance to river	0.0720*	0.0030*	1.0000						
Mean Temp. from May to Aug.	-0.4643*	-0.1916*	-0.1618*	1.0000					
Duration of sunshine	0.1925*	0.0306*	0.2458*	-0.3821*	1.0000				
Distance to forest fire	0.0937*	0.1345*	0.0834*	0.0285*	0.0236*	1.0000			
Distance to fumigation pile	0.0560*	0.0613*	-0.0071*	-0.1097*	0.1097*	0.2522*	1.0000		
Distance to thinning forest	-0.2173*	-0.0507*	-0.0267*	0.1684*	0.0400*	0.0341*	0.1109*	1.0000	
No. of infected dead trees	0.6862*	0.4595*	0.1315*	-0.5084*	0.4997*	0.1432*	0.1966*	-0.0750*	1.0000

* Values with asterisk indicate a significant correlation at the 0.05 level.

Table 3. Correlation matrix between PWD occurrence and anthropogenic factors.

	Distance to road	Distance to rail	Distance to building	Distance to harbor	Distance to forest road	Distance to pine tree handling facility	No. of infected dead trees
Distance to road	1.0000						
Distance to rail	0.0667*	1.0000					
Distance to building	0.3726*	-0.0249*	1.0000				
Distance to harbor	-0.2518*	-0.0352*	-0.1465*	1.0000			
Distance to forest road	-0.0281*	-0.0845*	-0.0479*	-0.0043*	1.0000		
Distance to pine tree handling facility	-0.0139*	0.0033*	-0.0500*	0.1061*	0.1954*	1.0000	
No. of infected dead trees	0.3174*	0.0608*	0.2499*	-0.8269*	-0.0103*	-0.0865*	1.0000

* Values with asterisk indicate a significant correlation at the 0.05 level.

Table 4. Multiple linear regression results of occurrence of pine wilt disease.

Variable	Coefficient	S.D.	Variation Inflation Factor (VIF)	Standard partial regression coefficient	Significant level	
Species of trees	White pine				0.0000	
	Red pine	-79.9200	2.1050	6.8291	-0.0749	0.0000
	Black pine	-89.7500	2.2420	6.4078	-0.0765	0.0000
	Mixed forest	-85.0400	2.3250	3.6427	-0.0527	0.0000
Altitude	0.0408	0.0087	2.7002	0.0058	0.0000	
Slope	5.8900	0.0656	1.8454	0.0921	0.0000	
Orientation	-9.8780	0.6412	1.1516	-0.0125	0.0000	
Mean Temp. from May to Aug.	35.4500	1.8160	1.5167	0.0181	0.0000	
Wind direction from May to Aug.	2.8930	0.0255	3.1466	0.1520	0.0000	
Duration of sunshine	626.8000	2.2390	1.9567	0.2955	0.0000	
Distance to forest fire	0.0004	0.0001	1.1935	0.0046	0.0000	
Distance to fumigation pile	0.0092	0.0001	1.2219	0.0634	0.0000	
Distance to thinning forest	0.0005	0.0001	1.1676	0.0040	0.0000	
Distance to road	0.3467	0.0056	1.6409	0.0598	0.0000	
Distance to rail	-0.0003	0.0001	1.1941	-0.0031	0.0002	
Distance to building	0.2887	0.0029	1.8509	0.1031	0.0000	
Distance to harbor	-0.0018	0.0000	4.0080	-0.2284	0.0000	
Distance to forest road	0.0012	0.0002	1.1432	0.0044	0.0000	
Distance to pine tree handling facility	-0.0012	0.0001	1.2407	-0.0090	0.0000	
Constant term	-5559.0000	46.8400	-	-	0.0000	
Coefficient of determination (R^2)	0.4765		F=4648, df=18, 918751, $p<0.001$			

상관관계 분석에서 상관관계가 높은 독립변수들이 포함되어 있어 회귀분석을 실시하면서 다중공선성(multicollinearity)을 검토하였다. 분석 결과, 모든 인자에서 다중공선성에 문제가 없는 것으로 나타났다. 자연적 요인과 인위적 요인을 포함한 모든 요인에 대한 회귀분석결과, 17개 독립변수 중 수계와의 거리에 대한 요인은 통계적으로 유의하지 않아 제거되었고, 나머지 16개 독립변수는 소나무재선충병 확산에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, R^2 는 0.4765로 회귀방정식이 종속변수의 변화를 47.65% 설명하는 것으로 나타났다(Table 4). 소나무재선충병 감염고사목 발생분수와 관련하여 고도, 경사도, 기온, 풍향, 일조시간, 산불피해지, 훈증터미, 벌채지, 도로, 마을 및 임도는 정(+)의 영향을 미치는데 반해, 소나무, 곰솔, 침활 훈효립, 방위, 철도, 항구 및 소나무류 취급업체는 부(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표준편회귀계수 비교 결과 일조시간, 항구와의 거리, 풍향, 마을과의 거리, 경사도 순으로 소나무재선충병 발생분수에 영향을 주는 것으로 나타났다.

고찰

소나무재선충병 발생과 관여되는 인자들에 대해 발생특성을 분석한 결과, 소나무재선충병 감염고사목은 소나무림, 300 m 이하 고도, 4~6°의 낮은 경사도, 동쪽 사면에서 발생 분수가 높게 나타났다. 또한 5~8월 평균기온이 23.8~24.0 °C 범위, 남풍이 주로 불고 일조시간이 약 7~7.1 시간인 기후 조건에서 소나무재선충병 감염고사목이 주로 발생하였다. 또한, 건물, 도로, 소나무류 취급업체, 산불피해지, 훈증터미, 벌채지와 거리에 따른 소나무재선충 감염고사목 발생특성은 각 인자와 가까운 곳에서 감염고사목이 많이 발생하고, 멀어질수록 적게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 소나무재선충병 감염고사목 발생분수와 각 인자 간 다중회귀분석 결과, 17개의 관여 인자 중 수계와의 거리를 제외한 나머지 인자들의 영향이 상대적으로 유의하였으며 일조시간, 항구와의 거리, 풍향, 마을과의 거리, 경사도가 소나무재선충병 감염고사목 발생분수에 상대적으로 중요한 인자로 확인되었다.

본 연구 결과에서 임상별 소나무재선충병 감염고사목의 분포특성은 활엽수림을 제외한 모든 임분에서 피해가 발생하였지만, 임분 비율을 고려할 경우 소나무·곰솔림에서 소나무재선충병 피해가 큰 것으로 나타났다. 2015년 기준 임상별 산림면적이 소나무·곰솔림 24.7%, 잣나무림 2.7%, 침활혼효림이 26.9%임을 감안하면 소나무·곰솔림의 피해가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다(KFS, 2018). 이러한 결과는 잣나무림에서 소나무재선충병 감염고사목 발생비율이 높다고 보고한 Park et al. (2018)의 결과와는 상이하였으나 이는 선행연구의 연구범위가 경기도 지역에 국한되었기 때문으로 판단된다. 그리고, 다중회귀 분석결과에서는 소나무와 곰솔이 소나무재선충병 감염고사목 발생본수와 부의 상관관계가 있는 것으로 나타났으나 이는 잣나무림의 면적 비율 대비 발생본수가 상대적으로 많았기 때문에 기인한 결과로 사료된다. 고도와 경사도에 대한 소나무재선충병 감염고사목의 분포특성을 보면, 고도 0~50 m에서 가장 많이 발생하였으며, 소나무재선충병 감염고사목의 대부분이 고도 300 m 이하의 지역에 분포하였고 경사도의 경우도 경사 4~6° 사이에서 가장 많이 분포하고 있었으며, 40° 이상 지역에서는 피해고사목이 거의 분포하지 않았다. 이러한 결과는 소나무재선충병 피해 발생지의 80%가 고도 100 m 이하에서 71%가 경사도 10° 이하에서 발생하였다는 Kim(2006)의 경상북도 권역 내의 소나무재선충병 발생특성 분석 연구 결과와 유사하였다. Son et al.(2006), Park et al.(2018) 또한 소나무재선충병 발생과 고도가 높은 상관성이 있다고 보고하였다. 이러한 고도·경사도와 소나무재선충병 감염고사목 발생본수와의 관계는 기주수목의 고도나 경사도별 분포에 기인한 것일 수도 있다. 그러나 Cho et al. (2016)의 연구에서는 소나무재선충병 피해가 심했던 영덕군과 안동시의 고도·경사도별 소나무재선충병 감염 고사목의 발생비율은 기주수목의 분포 비율과 상이한 것으로 보고하였다. 따라서, 고도·경사도와 소나무재선충병 감염고사목 발생본수와의 관계는 기주수목의 분포보다는 고도나 경사도에 따른 기온의 변화에 의해 기인하는 것으로 판단되었다(Table 2).

기온은 소나무재선충과 매개충의 생리·생태에 중요한 인자로 알려져 있다(Kwon et al., 2006; Ohsawa and Akiba, 2014; Choi et al., 2017; Lee et al., 2017). 본 연구 결과에서는 매개충의 주 활동시기인 5~8월의 평균기온이 23.8~24.0 °C일 때, 소나무재선충병 감염고사목 발생본수가 가장 많은 것으로 나타났다. 유사하게 북미와 일본에서는 소나무재선충병이 연평균기온이 20 °C 이상인 지역에서 발생하였다고 보고하였으며(Rutherford and Webster, 1987), 일본에서는 연평균기온이 14 °C보다 높은 지역에서 소나무

재선충병 피해가 발생하였다고 보고하였다(Mamiya, 1988). 또한, Lee et al.(2017)은 국내 소나무재선충병의 초기발생지는 주로 연평균기온이 10~13 °C 사이인 기후적 특성을 보인다고 보고하였다. 그러나 국내 소나무재선충병 발생에는 소나무재선충, 매개충인 북방수염하늘소와 솔수염하늘소뿐만 아니라 온도에 영향을 받은 소나무류의 상태 또한 복합적으로 작용할 것으로 예상되므로 기주가 소나무재선충병 발생이나 확산에 미치는 영향에 대한 종합적이고 체계적인 연구가 필요할 것이다.

다음으로, 인위적 요인과 관련하여 도로, 건물, 임도, 철도, 소나무류 취급업체 및 항구와 거리가 멀어질수록 소나무재선충 감염목의 발생본수가 줄어드는 경향이 확인되었다. 2006년부터 2018년까지 소나무재선충병 신규 발생지에 대한 산림청 국립산림과학원의 역학조사 결과를 보면, 인위적 확산이 44.4%, 자연적 확산이 30.3%, 원인불명이 25.3%로 조사되었다. 따라서 이러한 결과는 소나무재선충병 발생은 자연적 요인뿐만 아니라 인간의 인위적 활동도 소나무재선충병의 발생 및 확산에 중요한 요인으로 작용한다는 것을 암시한다(Shin, 2008; Choi et al., 2017; Lee et al., 2017). 또한, Robinet et al.(2009)과 Choi et al. (2017)은 각각 중국과 국내에서 소나무재선충병 발생이 인구밀도와 관계가 있으며 인위적 요인이 소나무재선충병 확산과 밀접한 관계가 있다고 보고하였다. 특히, 소나무재선충병의 확산은 소나무재선충을 보유하고 있는 매개충이 내부에 존재하는 목재나 조경수의 이동이나 매개충 자체가 차량에 붙어서 이동하는 ‘히치하이킹’에 의해 이루어질 수 있으며(Choi et al., 2017), 이러한 소나무재선충병의 확산은 소나무재선충병의 피해 확산을 매우 가속화시키는 역할을 한다. 다만, 상관분석과 다중회귀분석 결과 상관계수와 회귀계수가 정(+)의 영향을 미치는 것으로 나타나 선행 연구결과와는 다르게 나타났는데, 이는 소나무재선충병 피해가 만연한 지역과 신규로 피해가 발생한 지역에서의 발생특성이 다른 것에 기인한 것으로 사료된다. 즉, 소나무재선충병 신규 발생지에서는 도로나 건물 주위에서 발생하지만 피해가 지속되면서 점점 더 도로나 건물에서부터 멀어지면서 감염고사목이 발생하기 때문이다. 유사하게 Park et al.(2018)은 경기도에서 연도별 도로 밀도와 신규감염목 위치의 관계를 분석한 결과, 소나무재선충병이 신규 발생 후 시간이 지남에 따라 도로로부터 먼 곳으로 확산되는 되는 경향을 보인다고 보고하였다. 따라서 소나무재선충병에 의한 감염고사목의 발생 특성은 소나무재선충병의 피해 이력과 피해 정도에 따라 다를 수 있음을 시사하므로 향후 신규 피해발생지와 피해가 만연한 지역을 구분하여 소나무재선충병 감염고사목의 발생 특성을 비교·분석할 필요가 있으며, 신규발생지의 경우 신

규 발생 후 시간의 경과에 따른 시계열 분석도 추가할 필요가 있을 것이다.

결론

본 연구는 소나무재선충병 감염고사목 발생에 미치는 17개의 자연적·인위적 요인에 대한 자료를 수집하고 이를 분석하여 소나무재선충병의 효과적이고 선제적인 예찰·방제를 위한 기초자료를 확보하고자 수행되었다. 자연적 요인과 관련하여 소나무재선충병 감염고사목은 소나무류, 300 m 이하 고도, 4~6°의 낮은 경사도, 동쪽 사면에서 발생 본수가 높게 나타났으며 5~8월 평균기온이 23.8~24.0 °C 범위, 남풍이 주로 불고 일조시간이 약 7~7.1시간 인 기후 조건에서 소나무재선충병 감염고사목이 주로 발생하였다. 인위적 요인으로 건물, 도로, 소나무류 취급업체, 산불피해지, 혼중터미, 벌채지와의 거리에 따른 소나무재선충 감염고사목은 각 인자와 가까운 곳에서 상대적으로 감염고사목이 많이 발생하고, 멀어질수록 적게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 소나무재선충병 감염고사목 발생 본수와 각 인자 간 다중회귀분석 결과, 17개의 관여 인자 중 수계와의 거리를 제외한 나머지 인자들의 영향이 유의한 것으로 나타났다. 향후 소나무재선충병의 선제적·맞춤형 방제전략 수립을 지원하기 위해서는 소나무재선충병 감염고사목을 지속적으로 모니터링하고, 소나무재선충병 발생 이력과 피해 정도를 구분하여 소나무재선충병 발생 특성을 분석하여야 할 것이다.

References

- Bergdahl, D.R. 1988. Impact of pinewood nematode in North America: Present and future. *Journal of Nematology* 20(2): 260-265.
- Cheng, H.R., Lin, M., Li, W. and Fang, Z. 1983. The occurrence of a pine wilting disease caused by a nematode found in Nanjing. *Forest Pest and Disease* 4(1): 1-5.
- Cho, H.-K., Choe, G.-S., Park, J.H. and Park, N.Y. 2016. Development of automated forest disease detection. Research report. Korea Forestry Promotion Institute, Seoul, pp. 46-48.
- Choi, W.I., Song, H.J., Kim, D.S., Lee, D.S., Lee, C.Y., Nam, Y., Kim, J.B. and Park, Y.S. 2017. Dispersal patterns of pine wilt disease in the early stage of its invasion in South Korea. *Forests* 8(11): 411.
- Conover, W.J. 1998. *Practical nonparametric Statistics*. 3rd edition. John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A.
- Dwinell, L.D. 1997. The pinewood nematode: Regulation and mitigation. *Annual Review of Phytopathology* 35: 153-166.
- Futai, K. 2008. Pine wilt in Japan: From first incidence to present, pp. 5-12. In: Zhao B.G., Futai, K., Sutherland, J.R. and Takeuchi, Y. (Eds.) *Pine Wilt Disease*. Springer, Tokyo, Japan.
- Hirata, A., Nakamura, K., Nakao, K., Kominami, Y., Tanaka, N., Ohashi, H., Takano, K.T., Takeuchi, W. and Matsui, T. 2017. Potential distribution of pine wilt disease under future climate change scenarios. *PLoS ONE* 12(8): e0182837.
- Kim, J.W. 2006. Occurrence status of pine wilt disease and ecological approaches for its prevention plan. *Gyeongbuk Development Research Papers* 5: 183-223.
- Kishi, Y. 1995. The pine wood nematode and the Japanese pine sawyer. Thomas Company Limited Minato-ku, Tokyo, Japan.
- Knowles, K., Beaublen, Y., Wingfield, M.J., Baker, F.A. and French, D.W. 1983. The pinewood nematode new in Canada. *Forestry Chronicle* 59: 40.
- Korea Forest Service (KFS). 2018. *Statistical yearbook of forestry*. No. 48. pp.78-162. Korea Forest Service, Daejeon, Republic of Korea.
- Kwon et al. 2006. Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* 95(5): 543.
- Kwon, H.J., Jung, J.K., Jung, C., Han, H. and Koh, S.H. 2018. Dispersal capacity of *Monochamus saltuarius* on flight mills. *Experimentalis et Applicata* 166(5): 420-427.
- Lee, C.M., Lim, T.H., Lee, S.M., Mun, I.S., Han, S.S. and Lee, D.W. 2015. Nematicidal and reproduction suppression activity of actinomyces isolates against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Korean Journal of Pesticide Science* 19(2): 141-150. (in Korean)
- Lee, D.S., Nam, Y., Choi, W.I. and Park, Y.S. 2017. Environmental factors influencing on the occurrence of pine wilt disease in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* 50(4): 374-380.
- Lu, Q., Wang, W., Liang, J., Yan, D., Jia, X. and Zhang, X. 2005. Potential suitability assessment of *Bursaphelenchus xylophilus* in China. *Forest Research Chinese Academy of Forestry* 18(4): 460-464.
- Mamiya, Y. 1988. History of pine wilt disease in Japan. *Journal of Nematology* 20(2): 219-226.
- Morimoto, K. and Iwasaki, A. 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, pp. 33-38. In: Zhao B.G., Futai, K., Sutherland, J.R. and Takeuchi, Y. (Eds.) *Pine Wilt Disease*. Springer,

- Tokyo, Japan.
- National Institute of Forest Science (NIFoS). 2020. Annual Report of Monitoring for Forest Insect Pests and Diseases in Korea. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Ohsawa, M. and Akiba, M. 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., Chung, Y.J. and Moon, Y.S. 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(1): 40-46.
- Park, W.H., Ko, D.W., Kwon, T.S., Nam, Y. and Kwon, Y.D. 2018. Analysis of pinewood nematode damage expansion in Gyeonggi province based on monitoring data from 2008 to 2015. *Journal of Korean Forest Society* 107(4): 486-496.
- Robinet, C., Roques, A., Pan, H., Fang, G., Ye, J., Zhang, Y. and Sun, J. 2009. Role of human-mediated dispersal in the spread of the pinewood nematode in China. *PLoS ONE* 4(2): e4646.
- RStudio Team. 2015. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA.
- Rutherford, T.A. and Webster, J.M. 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, pp. 26-32. In: Zhao B.G., Futai, K., Sutherland, J.R. and Takeuchi, Y. (Eds.) *Pine Wilt Disease*. Springer, Tokyo, Japan.
- Son, M.H., Lee, W.K., Lee, S.H., Cho, H.K. and Lee, J.H. 2006. Natural spread pattern of damaged area by pine wilt disease using geostatistical analysis. *Journal of Korean Forest Society* 95(3): 240-249.
- Steiner, G. and Buhner, E.M. 1934. *Aphelenchoides xylophilus* n. sp., a nematode associated with blue-stain and other fungi in timber. *Journal of Agricultural Research* 48(10): 949-951.
- Webster, J. and Mota, M. 2008. Pine wilt disease: global issues, trade and economic impact, pp. 1-3. In: Mota, M.M. and Vieira, P.R. (Eds) *Pine Wilt Disease: A Worldwide Threat to Forest Ecosystems*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Wingfield, M.J., Blanchette, R.A. and Nicholls, T.H. 1984. Is the pine wood nematode an important pathogen in the United States?. *Journal of Forestry* 82(4): 232-235.
- Yano, S. 1913. Investigation on pine death in Nagasaki prefecture. *Sanrin-Kouhou* 4: 1-14.
- Yi, C.K., Byun, B.H., Park, J.D., Yang, S.I. and Chang, K.H. 1989. First finding of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle and its insect vector in Korea. *Research Reports of the Korea Forestry Research Institute (Seoul)* 38: 141-149.

Manuscript Received : December 17, 2020

First Revision : March 12, 2021

Accepted : March 30, 2021