

경기도의 소나무재선충병 피해 확산 양상 분석: 2008 ~ 2015년 예찰 데이터를 기반으로

박완혁¹ · 고동욱^{2*} · 권태성³ · 남영우³ · 권영대⁴

¹국민대학교 산림자원학과, ²국민대학교 산림환경시스템학과,

³국립산림과학원 산림병해충연구과, ⁴경기산림환경연구소

Analysis of Pinewood Nematode Damage Expansion in Gyeonggi Province Based on Monitoring Data from 2008 to 2015

Wan-Hyeok Park¹, Dongwook W. Ko^{2*}, Tae-Sung Kwon³,

Youngwoo Nam³ and Young Dae Kwon⁴

¹Department of Forest Resources, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

²Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

³Forest Insect Pests and Disease Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

⁴Gyeonggi Forest Environment Research Center, Osan-si 18118, Korea


요약: 경기도 지역의 소나무재선충병은 2007년 광주에서 최초 보고된 이래 급속도로 확산되어 큰 피해를 일으키고 있다. 경기도 지역 소나무재선충병의 매개충은 남부지방과 달리 북방수염하늘소(*Monochamus saltuarius*)이며 주요 감염목은 소나무가 아닌 잣나무이기 때문에 확산 양상이 다르게 나타날 수 있다. 이에 따라 매개충의 생태적 차이, 잣나무의 소나무재선충병 진단 등의 연구가 진행되고 있으나 확산 양상의 정확한 파악에 관한 연구는 여전히 미비한 수준이다. 이 연구에서는 경기산림환경연구소가 조사한 2008년부터 2015년까지의 신규 감염목 예찰 데이터를 기반으로 확산 현황과 전년도 감염목과의 최단거리의 변화와, 이러한 양상이 수치표고모형, 임상도, 도로 네트워크 등과 보이는 공간적 관계를 분석하였다. 이를 통해 소나무재선충병의 발생 위치와 환경인자 간의 관계를 살펴보고자 하였다. 신규 감염목의 수는 2008년에는 13본이었으나 급격히 증가하여 2013년에는 2,954본을 기록하였으며, 2014년 2,938본, 2015년 2,986본으로 유지되고 있다. 감염목 시군 수는 2012년에 6개 시군에서 2013년 11개, 2014년에 15개 시군으로 증가하였다. 감염목 가운데 잣나무의 비율은 2013년에 89.5%, 2014년에 83.4%, 2015년에 89.8%로 나타났다. 2011-2012년 이후 전년도 감염목과의 거리는 빠르게 감소하고 있으며, 2013년과 2014년 사이에는 평균 거리가 전년도에 비해 크게 감소하여 577 m, 2014년과 2015년 사이에는 666 m로 나타났다. 감염목 위치의 고도는 2009년 이후 전반적으로 증가하여 2014년에 최댓값인 565 m에 이르렀다가 2015년에는 평균값, 중앙값, 최댓값이 모두 낮아졌다. 도로와의 거리는 전반적으로 지속적인 증가 양상을 보이고 있다. 이 연구에서 얻은 감염목 분포의 공간적 분석은 효율적인 소나무재선충병 방제 전략을 수립하는데 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: Pine wilt disease (PWD) in Gyeonggi province was first detected in Gwangju in 2007, and ever since has caused extensive damage. Insect vector and host tree in Gyeonggi province are *Monochamus saltuarius* and *Pinus koraiensis*, respectively, which are different from the southern region that consist of *Monochamus alternatus* and *Pinus densiflora*. Consequently, spread and mortality characteristics may be different, but our understanding is limited. In this research, we utilized the spatial data of newly infected trees in Gyeonggi province from 2008 to 2015 to analyze how it is related to various environmental and human factors, such as elevation, forest type, and road network. We also analyzed the minimum distance from newly infected tree to last year's closest infected tree to examine the

* Corresponding author

E-mail: dwko@kookmin.ac.kr

ORCID

Dongwook W. Ko  <https://orcid.org/0000-0002-6944-0261>

dispersal characteristics based on new outbreak locations. Annual number of newly infected trees rapidly increased from 2008 to 2013, which then stabilized. Number of administrative districts with infected trees was 5 in 2012, 11 in 2013, and 15 in 2014. Most of the infected trees was *Pinus koraiensis*, with its proportion close to 90% throughout the survey period. Mean distance to newly infected trees dramatically decreased over time, from 4,111 m from 2012 to 2013, to approximately 600 m from 2013 to 2014 and 2014 to 2015. Most new infections occurred in higher elevation over time. Distance to road from newly infected trees continuously increased, suggesting that natural diffusion dispersal is increasingly occurring compared to human-influenced dispersal over time.

Key words: GIS, spatial analysis, *Monochamus saltuarius*, *Pinus koraiensis*, Korean pine forest

서 론

소나무재선충병은 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*) 이 소나무류(*Pinus* spp.)에 가해하여 일으켜 단기간에 말라죽게 하는 병이다. 소나무재선충은 스스로 다른 나무로 이동할 수 없으므로 매개충인 솔수염하늘소류(*Monochamus* spp.)가 감염목에서 성충으로 우화할 때 매개충의 기문으로 침투하여 매개충의 탈출 이후 미감염목을 가해할 때 생기는 상처를 통해 전파된다(Dwinell et al., 1989).

국내에는 1988년 부산 금정산 지역에서 처음 발견된 이래 급속도로 퍼져 2000년에는 1,677 ha였던 피해면적이 2004년에는 4,961 ha, 2005년에는 7,811 ha로 늘어났다(Yi et al., 1989; Korea Forest Service, 2005). 이후 「소나무재선충병 방제특별법」(2005년 5월 31일 공포, 9월 1일 이후 시행)을 제정, 시행하는 등 법정부적 노력을 기울여 피해면적은 2006년 7,871 ha, 2007년 6,855 ha, 2008년 6,015 ha, 2009년 5,633 ha로 감소하였다(Korea Forest Service, 2009). 하지만 2011년부터 다시 피해 면적이 급증하여 2013년에는 피해면적이 11,550 ha로 전년도 대비 219% 증가하였다(Korea Forest Service, 2015).

경기도 지역에서는 2006년 12월 광주시에서, 2008~2009년에는 남양주시와 포천시에서 발견되었으며, 2011년에는 용인시와 성남시로 확산되었다. 현재 감염시군은 16개에 달하는 것으로 보고되고 있다(Korea Forest Service, 2017). 대부분의 방제는 매개충의 발생과 확산을 방지하는 것에 중점을 두고 있으며 이에 따라 매개충의 매개능력 및 생활사 등의 생태적 특성에 대한 연구가 진행되고 있다(Korea Forest Research Institute, 2013).

소나무재선충병의 효율적인 방제를 위해서는 정확한 확산의 양상을 파악하고 아직 감염목이 광범위하게 확산되지 않은 지역인 선단지를 적극적으로 관리하는 것이 중요하다. 이에 따라 소나무재선충병 감염목 확산의 현황 파악 및 확산양상과 환경인자간의 관계에 관한 연구가 수행되어 왔다. Kim et al.(2001)은 부산시 지역을 대상으로 1995년부터 2000년까지 촬영한 Landsat TM 영상과 AWS 현지기상관측자료를 이용하여 소나무재선충병 감

염목의 피해 확산을 분석하고 기상인자와의 상관성을 분석하였는데, 5월은 최고기온($R=0.48$), 6월은 평균풍속($R=-0.66$), 그리고 7월에는 강수량($R=0.94$)이 피해목 발생현황 자료와 가장 상관성이 높다는 결과를 보였다. Son et al.(2006)은 부산시 대변항 지역에서 항공사진 판독을 통해 획득한 감염목의 위치좌표를 이용하여, 감염목의 위치가 경사, 수계로부터의 거리, 고도로부터 영향을 많이 받는 것으로 평가하였다. 그러나 위 연구들은 소규모 면적에서 이미 고사한 소나무를 대상으로 하고 있어 장거리 확산을 포함한 대단위 면적에서의 매개충의 동적인 확산 양상을 분석하는데 한계를 보인다.

또한 경기도 지역의 소나무재선충병의 매개충과 기주는 남부지방과 차이가 있어 확산양상이 다르게 나타날 수 있다. 남부지방의 매개충은 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)인데 반해 경기도 지방의 주요 매개충은 북방수염하늘소(*Monochamus saltuarius*)이며, 기주는 남부지방은 소나무(*Pinus densiflora*)가 대부분이지만 경기도 지역은 잣나무(*Pinus koraiensis*)인 경우가 많다. 잣나무는 소나무와 달리 병의 발현이 늦어 감염 당년에 바로 고사하지 않을 수도 있다(Korea Forest Research Institute, 2007a). 이로 인해 조기 발견이 어려워 감염목이 급격히 확산된 이후에야 신규발생지가 확인되는 경우가 있다. 2006년 12월 광주시 초월면에서 소나무재선충병이 최초로 발견되었을 때 발생 본수는 이미 297본에 달했으며(Korea Forest Research Institute, 2011), 2013년 양평군과 연천군이 신규감염지로 파악된 것도 각각 164본, 111본의 감염목이 확인된 이후였다(Korea Forest Service, 2013).

소나무재선충의 전파에는 목재의 이동과 같은 인간의 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 소나무재선충병 감염목을 불법으로 이용하여 설치한 울타리와 목재 팔레트에서 매개충인 솔수염하늘소의 서식흔 및 침입공과 탈출공이 발견된 사례가 있으며(Chung, 2002), 2006년과 2007년에 걸쳐 광주시와 남양주시, 포천시에서 발생한 소나무재선충병은 인위적인 전파에 의한 것으로 추정되고 있다(Korea Forest Research Institute, 2011). 경남지방을 대상으로 한 연구에서는 인구밀도가 높을수록 소나무재선충병의

연간 확산속도가 빠른 것으로 나타났다(Song et al., 2015). 중국의 경우, 철도를 따라 항만으로부터 111~339 km 떨어진 곳으로까지 전파되었으며, 인구밀도가 확산에 미친 기여도가 87%에 이른다고 보았다(Robinet et al., 2009). Von der Lippe and Kowarik(2007)은 종자운반차량의 이동과정에서 적재된 종자가 이탈, 확산되는 현상에 대한 연구를 통해 식물 종의 침입이나 유입을 통한 종 다양성의 변화에 교통수단에 의한 장거리 확산이 큰 영향을 미치는 것으로 보았다. 따라서 목재 운반과정, 또는 산림을 통과하는 차량으로부터 매개충이 이탈하여 새로운 확산원이 될 가능성이 있다. 그러므로 소나무재선충병의 확산양상은 매개충의 자연적 비산에 의한 확산과 더불어 교통수단 등 인위적인 원인에 의한 다양한 원인을 고려하여야 할 것이다(Suarez et al., 2001, Togashi and Shigesada, 2006).

이처럼 경기도 지역 소나무재선충병의 확산 특성은 매개충, 기후, 환경 인자에 따라 그 특성이 남부지방과 상이하게 나타날 수 있기 때문에, 예찰 자료의 분석을 통해 확산 속도와 거리 등의 공간적 특성을 이해하고 확산에 영향을 미치는 환경 요인을 분석하는 것은 효과적인 방제에 매우 중요하다.

이에 따라 이 연구에서는 경기도 지역의 초기 예찰 자료를 활용하여 소나무재선충병 신규 감염목 발생의 양상과 공간적 특성을 살펴보고, 신규 감염목 발생과 고도, 임상, 도로 등 주요 확산환경인자와의 관계를 분석하였다. 확산의 공간적 특성을 시계열적으로 분석하기 위해서 2008년부터 2015년까지 연도별 신규 감염목의 위치 정보에 기반한 발생 현황과 신규 감염지로의 확산 거리의 변화, 단거리 및 장거리 확산 거리 변화를 분석하였다. 신규감염목 발생과 관련된 환경 속성을 알아보기 위해서는 발생 위치의 고도, 임상 특성, 도로로부터의 거리와 도로 밀도의 특성이 시간이 지남에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

이 연구에서는 최근 소나무재선충의 피해가 심각하게 나타나고 있는 경기도 지역을 대상으로 2008년부터 2015년까지의 소나무재선충병의 확산양상을 분석하였다. 경기도는 동경 127°51' ~ 126°22', 북위 36°53' ~ 38°17'에 걸쳐 있으며 전체 면적은 1,182,550 ha이다. 경기도의 최고 해발고도는 1,468 m (가평군 화악산)이지만, 전체 면적의 96%가 해발 500 m 미만에 분포한다. 연평균기온은 12.3°C이며 연간 강수량은 1,240 mm이다(Gyeonggi Province

Government, 2015). 경기도 내 산림의 면적은 577,118 ha이며 산림율은 약 49%이다. 활엽수림의 면적은 193,970 ha(33.3%)이며 침엽수림의 면적은 178,383 ha(30.6%)이다. 침엽수 가운데 잣나무림의 면적은 60,775 ha, 소나무림의 면적은 10,651 ha이며 전체 침엽수림 면적의 34.1%, 6.0%를 각각 차지하고 있다(Korea Forest Service, 2015).

2. 소나무재선충병 감염목 데이터의 수집 및 분석

본 연구는 경기산림환경연구소가 2008년부터 2015년까지 소나무재선충병 예찰 조사를 통해 작성한 신규 감염목 데이터를 활용하였다. 경기도 각 시군 및 경기산림환경연구소의 예찰조사원들이 소나무재선충병으로 의심되는 고사목에 대해서 현미경으로 1차 검경 후 DNA분석을 통해 재선충 감염 여부를 확인하여 감염된 시료에 대해서 기록된 채취지점의 GPS정보를 감염목의 위치로 기록하였다. 신규 감염목 위치 데이터의 오류를 수정하고 정리한 후 연도별 신규감염목의 위치를 ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013)를 활용하여 도식화하고 공간적으로 분석하였다.

3. 환경 인자 공간 데이터의 수집

분석에 사용된 환경인자 중 고도정보는 30 m 해상도의 DEM을 이용하였다. 임상정보는 국립산림과학원에서 제작한 제4차 수치임상도(Korea Forest Research Institute, 2009)를 이용하였으며, 이를 기반으로 소나무재선충병 감염목의 위치와 임상의 관계를 분석하였다. 경기도에서 소나무재선충병 감염목이 존재하는 임상 속성은 11가지로, Table 5와 같다. 차량과 도로가 확산에 미친 영향 정도를 살펴보기 위하여 국토교통부에서 제공하는 표준노드링크(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015)를 이용하여 1) 감염목으로부터 도로까지의 거리와 2) 감염목으로부터 1 km 반경 내의 도로 밀도를 기반으로 소나무재선충병 신규 감염목 위치와의 관계를 분석하였다.

4. 신규감염목 위치의 시계열자료에 따른 확산 패턴의 공간 분석

소나무재선충 감염목간의 연도별 확산 양상을 분석하기 위하여 연도별로 신규 감염목으로부터 전년도 감염목과의 직선 최단거리를 계산하고, 최단거리의 분포를 분석하였다. 확산거리의 분포 특성이 많은 짧은 거리(단거리 확산)와 드물지만 매우 긴 거리(장거리 확산)로 이루어진 편향성이 매우 크다는 점을 감안하여 평균값 뿐 아니라 최솟값, 중앙값, 최댓값을 모두 계산하고, 추가로 1 km 마다의 확산거리별 누적 비율을 계산하여 전년도 감염목으로부터의 거리에 따라 신규감염목의 누적비율이

어떻게 변화했는지를 연도별로 분석하였다.

결과 및 고찰

5. 신규감염목 발생과 환경 요인과의 관계

신규감염목과 환경요인과의 관계를 알아보기 위해서는 소나무재선충병 감염목 데이터와 DEM을 중첩하여 연도별로 발생위치의 고도를 분석하였다. 임상분포와의 공간적 관계 분석에는 4차 임상도를 사용하였으며, 임상 유형을 1) 활엽수림(broadleaf forest), 2) 혼효림(mixed forest), 3) 비산림(non-forest), 4) 기주 외 침엽수림(conifer), 5) 소나무림(red pine forest), 6) 잣나무림(Korean pine forest)으로 나누어 매년 신규 감염목의 임상 유형별 분포를 분석하였다. 임상도는 감염될 수 있는 소나무와 잣나무의 분포를 나타내는 동시에 매개충의 먹이자원이 되므로 매개충의 서식지 질을 결정하는데 중요한 인자가 될 것이므로, 소나무재선충병의 정착에 영향을 미칠 것으로 예상하였다. 도로와 차량을 통한 인위적인 확산 영향을 살펴보기 위한 자료로는 국토부 표준노드링크에 기반하여 1) 각 감염목으로부터 도로까지의 거리를 계산하고, 2) 신규 감염목으로부터 반경 1 km 이내의 도로 밀도를 ArcGIS의 line density로 계산하여 사용하였다. 기술통계 산출에는 통계 패키지 R (R Development Core Team, 2010)을 이용하였다.

1. 연도별 확산 양상

남부지방의 경우 1988년 최초 발생된 이래 10년 가량 큰 피해를 일으키지 않다가 2000년이 되면서 폭발적으로 증가하였으나 중부지방은 2007년에 경기도 광주에서 최초로 감염목이 보고된 이후 급격히 확산되어 2013년에 매우 빠른 속도로 증가하는 양상을 보였다(Korea Forest Service, 2017). 경기도 지역 재선충병의 확산은 2012년까지 남양주와 광주, 성남을 중심으로 한정되었으나, 2012년에 포천으로 퍼져나가며 2013년부터 경기도 전역에 걸쳐 감염목의 수가 크게 증가하였다(Figure 1). 신규 감염목의 수는 시간이 지남에 따라 급격하게 증가하는 추이를 보였다. 신규 감염목 수는 2008년 이후 2013년까지 연평균 296%씩 증가하여 2013년에는 2,954본을 기록하였고, 이후 2014년에는 2,938본, 2015년에는 2,986본으로 비슷한 수준으로 유지되고 있다. 감염목이 발생한 행정구역을 살펴보면 2008년까지는 발견 시군 수가 3개로 유지되다가 2011년 4개 시군, 2012년 5개 시군, 2013년에는 11개로 급증하였고, 2014년에 15개 시군으로 유지되고 있다(Table 1). 전체 10,624개의 감염목 데이터 가운데 7,024개의 감염목의 수종이 기록되어 있었으며, 기록된 수종은 잣나무와 소나무뿐이었다. 잣나무의 비율은 2013년에 89.5%, 2014년에 83.4%, 2015년에 89.8%로 꾸준히 높게

Table 1. Annual number of newly infected trees.

Cities	Year									(Unit : trees)
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Gwangju	-	37	70	141	497	1,025	875	842	3,487	
Namyangju	13	36	13	169	223	321	819	731	2,325	
Yongin	-	-	-	76	124	375	214	431	1,220	
Seongnam	-	3	4	85	155	116	580	248	1,191	
Pocheon	-	-	-	-	100	540	99	351	1,090	
Yangpyeong	-	-	-	-	-	166	68	122	356	
Yeoncheon	-	-	-	-	-	256	21	6	283	
Yangju	-	-	-	-	-	77	138	67	282	
Anseong	-	-	-	-	-	56	25	65	146	
Hanam	-	-	-	-	-	21	17	43	81	
Gapyeong	-	-	-	-	-	1	6	64	71	
Yeoju	-	-	-	-	-	-	49	3	52	
Icheon	-	-	-	-	-	-	10	6	16	
Uiwang	-	-	-	-	-	-	13	3	16	
Pyeongtaek	-	-	-	-	-	-	4	4	8	
Total	13	76	87	471	1,099	2,954	2,938	2,986	10,624	
Rate of increase		485%	14%	441%	133%	169%	-1%	2%		

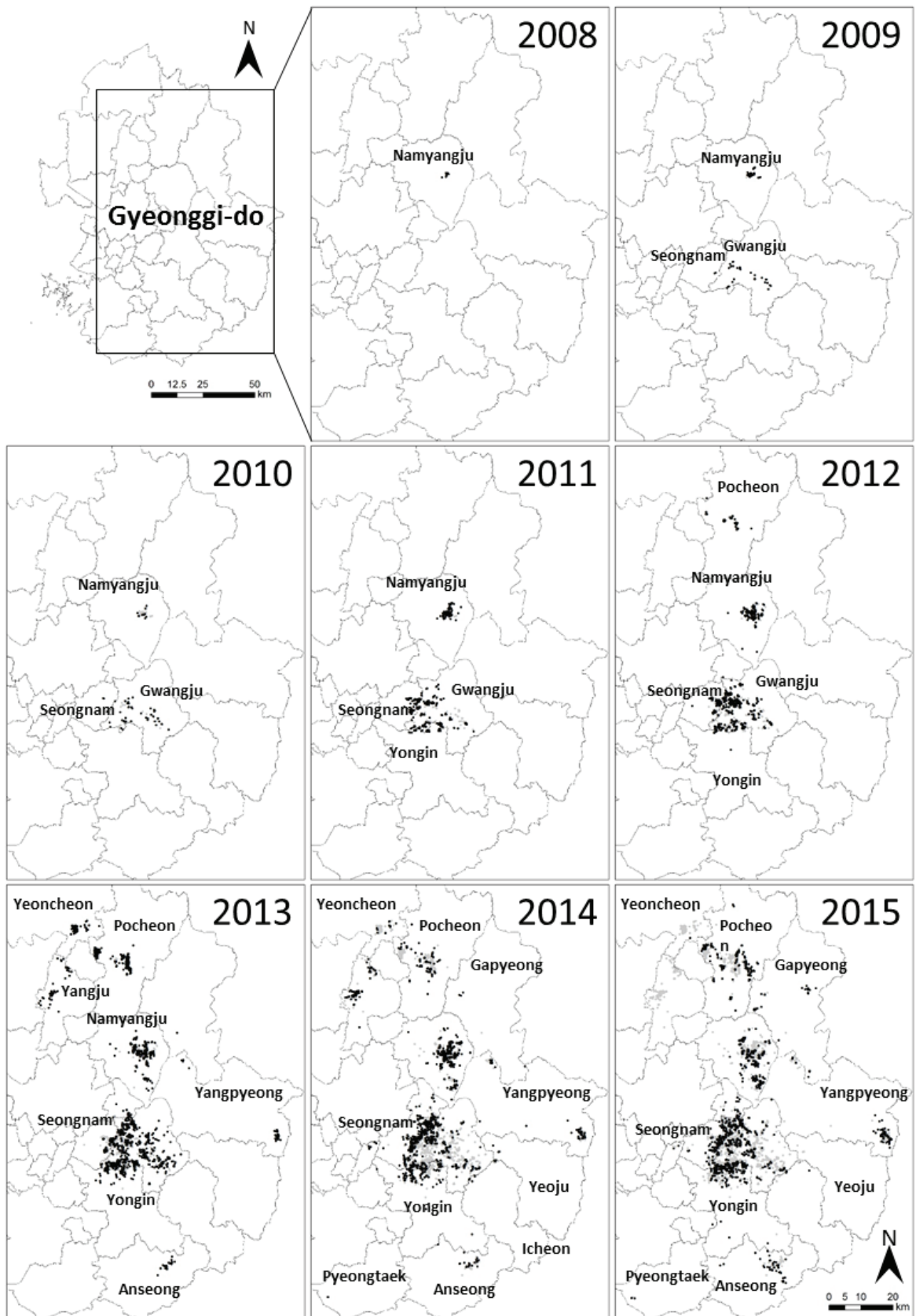


Figure 1. Distribution of new pinewood nematode infected trees from 2008 to 2015 in Gyeonggi Province.

Table 2. Minimum distance between newly and previously infected trees.

Year	n	min (m)	median (m)	mean (m±SD)	max (m)
2008~2009	76	46	26,670	16,830±15,429	35,540
2009~2010	87	1	640	917±920	4,323
2010~2011	471	22	676	893±774	4,030
2011~2012	1,099	0	371	3,003±7,787	36,060
2012~2013	2,954	0	444	4,111±8,932	37,330
2013~2014	2,938	0	293	577±1,743	42,438
2014~2015	2,986	1	274	666±1,345	14,972

Table 3. Cumulative proportion of new pinewood nematode infections across distance classes.

(Unit : %)

Year (n)	Range (km)												
	0.1	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
2013 (2,954)	16.5	38.5	52.6	66.5	76.1	78.1	80.7	81.0	81.4	81.7	87.9	89.9	90.0
2014 (2,938)	25.6	50.4	69.8	90.8	96.5	97.3	98.2	98.9	99.0	99.1	99.1	99.2	99.3
2015 (2,986)	15.0	53.2	67.7	85.8	94.4	96.1	97.3	98.1	99.0	99.0	99.2	99.3	99.3

나타났다. 연도별 발생 양상의 공간적 분포를 자세히 살펴보면 2008년부터 2011년까지는 남양주시 중심부와 광주시의 서남쪽을 중심으로 밀도가 높아지다가, 2012년에 포천시로 장거리 확산이 일어난 후, 2013년 이후 인근 지역으로 감염이 광범위하게 확산되는 모습을 보인다 (Figure 1). 2013년 이후 양평군 동쪽으로 신규감염목이 발견됨에 따라 강원도 원주시, 횡성군, 홍천군 등 인접 지역으로의 추가 확산에 영향을 미칠 것으로 추정된다.

2. 전년도 감염목과의 거리

신규감염목으로부터 전년도 감염목까지의 최단 거리는 2008~2009년의 경우 평균이 16,830 m, 최댓값은 35,540 m로 매우 크게 나타났는데, 이는 부분적으로는 경기도 광주의 경우, 이미 2006년 말에 소나무재선충병 감염목이 보고되었으므로 예찰 이전에 존재했으나 예찰을 피한 감염목 때문인 것으로 추정된다. 2009~2010년, 2010~2011년의 최단거리는 평균 약 900 m, 최댓값 4,000 m 정도로 크게 짧아졌다 (Table 2). 2011~2012년과 2012~2013년을 살펴보면 최댓값이 크게 증가하여 36 km를 웃도는데, 이는 기존 연구에서 보고된 자연적인 확산 거리보다 훨씬 큰 것으로, 아마도 경기 북부에서 매개충의 자연적 확산 뿐 아니라 도로와 차량을 통한 인위적 요인의 영향을 크게 받았기 때문인 것으로 추정된다. 2013~2014년에

는 경기도 평택시 남서부로의 확산으로 인해 최댓값이 크게 상승하였고, 2014~2015년에는 가평군 동부로 약 15 km를 뛰어넘는 확산이 최댓값으로 기록되었다. 확산 거리 분포가 편향되어 있는 점을 감안하여 평균 대신 중앙값을 살펴보면 2009년 이래 300~600 m 수준으로 유지되었음을 볼 수 있다 (Table 2). 이와 같이 확산거리의 최댓값은 일관되게 높는데 반해 중앙값은 매우 짧은 특성은 차량과 도로로 인한 장거리 확산과 경기도 상당 지역에 소나무재선충병이 비병징 감염목의 형태나 예찰이 어려운 지역에 이미 널리 분포함으로 인한 단거리 확산이 동시에 활발하게 발생하기 때문인 것으로 추정된다.

특정 거리마다 전년도 감염목으로부터의 최단거리 누적 비율을 살펴보면 기존 감염목으로부터 1 km 이내에서 발생한 감염목의 비율이 2013년 66.5%에서 2014년과 2015년에는 각각 90.8%와 85.8%로 급증하는데, 이는 적극적인 예찰과 제거에도 불구하고 발견되지 않은 비병징 감염목이 이미 널리 확산되어 단거리 확산이 활발하게 발생했기 때문으로 추정된다 (Figure 1, Table 3). 한편 경기도의 확산 거리가 경상남도에 비해 컸다 (Song et al., 2015). 본 연구의 최단거리 누적비율은 경남에서 90%의 확산이 1 km 이내에서 발생한 결과와 비슷하게 나타났다. 그러나 최단거리 평균값은 경남에서 약 300 m인 것과 비교해 본 연구에서는 첫 해를 제외하여도 최소 577 m (2013~

2014년)에서 최대 4,111 m (2012~2013년)로 나타났다. 도로와 차량에 의한 장거리 확산 효과의 영향을 가급적 배제하기 위해 분석 대상을 5,000 m 이내의 확산으로 제한한 추가 분석에서도 2012~2013년의 평균 확산거리가 587 m로 나타나 중부지방의 소나무재선충병 확산거리가 남부지방에 비해 더 크게 나타났다.

이와 같이 본 연구 대상 지역에서의 확산이 남부지방에 비해 빠른 원인이 명확하게 밝혀진 바는 없으나, 매개충인 솔수염하늘소류의 비행특성과 기주의 분포특성의 영향을 고려할 수 있다. 솔수염하늘소의 비행능력은 제한적이며, 충분한 먹이자원이 존재할 경우 활발한 비행을 하지 않는다고 알려져 있다(Togashi and Shigesada 2006). 따라서 남부지방의 주요 기주인 소나무가 연속적으로 분포되어 있는 것에 비해서 중부지방 잣나무의 분포가 가평군과 포천시를 중심으로 편재되어 있다는 점은 확산속도에 영향을 미칠 수 있겠으나, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한 경기도가 남부지방에 비해서 도로와 인구가 집중되어 있어 차량 이동에 의한 인위적인 매개충의 장거리확산이 보다 더 빈번하게 발생할 수 있다는 점도 고려할 수 있다.

3. 고도에 따른 소나무재선충병 감염목의 분포

연도별 신규 감염목의 고도 변화를 살펴보면 시간이 지날수록 신규발생지의 최소 고도는 2008년에 기록한 146 m이래 꾸준한 감소추세를 보여 2014년에 3 m를 기록한 이후 소폭 증가하여 2015년에는 25 m를 기록하였다. 최대고도는 2008년 343 m이래 증가추세를 보였으며 2013년에 기록된 587 m 이후 다소 감소하였으나, 이는 절대적인 한계선이기 때문이라고 보기는 어렵고, 오히려 장기적으로 기후변화와 같은 요인으로 인해 더 높은 고도로 전파될 가능성도 있다(Hellmann et al., 2008). 즉, 최소 고도는 감소하고 최대 고도는 증가하면서 전체 신규 발생 고도대가 확장하는 양상을 보였다(Table 4). 평균

고도는 예찰이 시작된 2008년에는 232 m, 2009년에는 173 m, 2010년에는 121 m로 감소하였으나, 2011년에는 155 m, 2012년에는 162 m로 다시 상승하여 2014년에 170 m를 기록한 후 다시 166 m로 소폭 감소하였다(Table 4). 다만 예찰 초기의 조사가 체계적으로 이루어진 것이 아니라 제한적으로 이루어졌다는 점을 감안하여 해석에 유의해야 할 것이다. 2007년에 발생한 남양주시 최초의 감염목은 남양주 천마산에서 잣나무림에서 발견된 것으로, Korea Forest Research Institute(2011)는 유입원을 특정할 수 없으나 인위적인 것으로 추정하였다.

4. 임상에 따른 소나무재선충병 감염목 분포

신규 감염목 위치의 임상을 분석한 결과, 전기간에 걸쳐 소나무림의 비중은 극히 적었으며, 잣나무림, 침엽수림, 활엽수림, 혼효림, 비산림에서 골고루 나타났다(Figure 2). 전체 기간에서 활엽수림은 2011년에 31.4%를 차지한 이후 꾸준히 20% 이상의 비율로 발병 임상의 큰 비중을 차지하였다. 비산림의 비율은 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 잣나무림은 2009년에 15.8%, 2010년 21.8% 등 10% 이상의 수준을 계속 유지하고 있다. 소나무림에서는 2012년 처음 발생한 이래 1% 미만의 미비한 비율을 보였다.

결과적으로 감염목 위치의 임상은 주된 기주인 잣나무림이 아닌 경우가 더 많았다(Table 5). 잣나무 감염목이 가장 많이 발견된 임상은 비산림(31.3%)이었으며, 활엽수(21.3%), 침엽수(18.8%), 혼효림(12.7%) 등이 그 뒤를 따랐다. 소나무 감염목이 가장 많이 발견된 임상은 활엽수림(50.0%)이었고, 비산림(19.1%), 혼효림(13.0%) 등이 그 뒤를 따랐다. 잣나무 감염목이 잣나무 임상에서, 소나무 감염목이 소나무 임상에서 발견된 경우는 각각 1.4%와 15.4%로 상당히 낮았다. 이는 초기 감염목이 인간 활동이 빈번하게 발생하는 숲 가장자리 등에서 발생하거나, 기타 임상에 산재한 개별목에서 발생하는 경우가 더 많기

Table 4. Elevational distribution of newly infected trees.

Year	n	min. (m)	median (m)	mean (m±SD)	max. (m)
2008	13	146	228	232±55	343
2009	76	72	147	173±76	344
2010	87	55	110	121±43	268
2011	471	56	143	155±63	427
2012	1,099	43	143	162±80	533
2013	2,954	14	135	146±65	587
2014	2,938	3	159	170±77	563
2015	2,986	25	155	166±73	502

Table 5. Overall proportion of forest types where new infected trees occurred.

Forest type	<i>P. densiflora</i> infection		<i>P. koraiensis</i> infection	
	Trees	Percentage (%)	Trees	Percentage (%)
Broadleaf forest	458	50.0	1,303	21.3
Mixed forest	119	13.0	775	12.7
Non-forest	175	19.1	1,909	31.3
Conifer	110	12.0	1,147	18.8
Red pine forest	13	1.4	32	0.5
Korean pine forest	41	4.5	942	15.4
Total	916	100.0	6,108	100.0

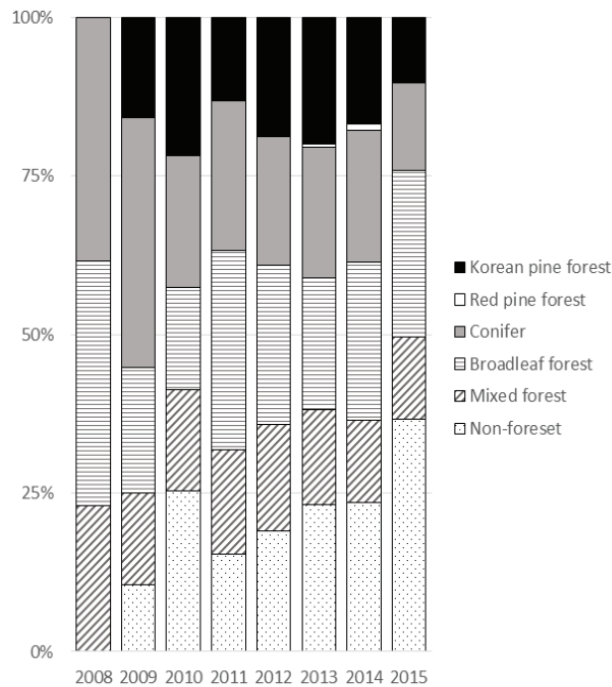


Figure 2. Annual proportion of forest types where new infected trees occurred

때문인 것으로 추정된다. 한편 우점 수종에 기반한 임상도를 사용하여 감염목 위치 임상 분석을 수행할 경우 의도하지 않았던 결과가 나타난 경우는 선행연구에서도 찾아볼 수 있었다. 중국을 대상으로 한 연구에서도 기주가 있는 것으로 기록된 곳에서 소나무재선충병이 발생한 경우는 전체의 54%에 그치는 것으로 나타나 임상정보를 모형에서 제외하였다(Robinet et al., 2009). 부산시 기장군 대변리를 대상으로 한 연구에서도 연구지역 대부분이 소나무 임상으로 구성되었기 때문에 임상 자체를 분석에서 제외하였다(Son et al., 2006). 결과적으로 비산림을 포함한 다양한 임상에 산발적으로 분포한 소나무와 잣나무 개별목에서의 신규감염이 매우 큰 비중을 차지하고 있는

것으로 볼 수 있으며, 이같은 특성은 향후 소나무재선충병 분석에서 유의해야 할 필요가 있다.

5. 소나무재선충병 확산과 도로와의 관계

도로로부터 감염목까지의 최소거리를 살펴보면 2008년부터 2015년까지 최솟값은 0~2 m로 매우 근접하게 유지되었다. 반면 최댓값을 살펴보면 2008년에 1,033 m를 기록한 이래 2009년에는 1,819 m로 증가하였다가 2010년에 1,553 m로 감소하였으나 이듬해 2,329 m로 크게 증가하였고 이후로도 크게 증가하는 추세를 보였다. 또한, 최댓값의 증가량에 비해 평균과 중앙값의 증가량은 훨씬 적은데, 이는 신규 감염목 발생위치가 지속적으로 도로

Table 6. Distance from road to newly infected trees.

Year	n	min (m)	median (m)	mean (m±SD)	max (m)
2008	13	1	240	393±306	1,031
2009	76	2	275	312±300	1,819
2010	87	2	227	319±210	1,553
2011	471	0	241	285±263	2,329
2012	1,099	0	272	351±310	2,479
2013	2,954	0	287	369±362	2,329
2014	2,938	0	296	386±348	2,377
2015	2,986	0	331	442±403	2,801

Table 7. Road density of newly infected area.

Year	min (m/km ²)	median (m/km ²)	mean (m/km ² ±SD)	max (m/km ²)
2008	2,892	3,177	3,333±147	4,019
2009	1,881	3,148	3,125±821	5,289
2010	1,879	2,897	3,246±763	7,533
2011	1,028	3,234	3,184±1,059	8,929
2012	544	2,973	3,147±1,095	7,960
2013	173	2,175	2,383±1,073	7,602
2014	182	2,945	3,146±1,159	8,347
2015	179	2,065	2,445±1,129	8,822
Gyeonggi	-	1,161	2,302±1,565	10,410

가까운 곳에서 발생하는 동시에 시간이 지남에 따라 점차 도로 먼 곳으로도 널리 확산되고 있음을 보여준다(Table 6).

연도별로 도로 밀도와 신규감염목 위치의 관계를 분석하였으며 경기도 전체의 도로밀도 통계와 비교하였다. 2008년의 최솟값이 2,892 m/km²였으며 이후 점차 감소하는데, 이는 점차 도로 밀도가 적은 깊은 산림으로 확산되기 때문이다. 최댓값은 2011년부터 2013년 사이에 소폭 감소하였지만 전체적으로 증가하는 추세를 보인다. 이는 소나무재선충병이 깊은 산림으로 확산되는 동시에 도로가 많은 곳에서도 꾸준히 발생하고 있음을 시사한다. 또한 경기도 전체의 도로 밀도 평균값과 중앙값보다 감염목이 있는 곳의 도로 밀도 평균값과 중앙값이 높은 것으로 나타났다(Table 7). 이는 소나무재선충병의 신규 지역으로의 확산에 도로가 중요한 요소로 작용하고 있으며, 차량을 통한 새로운 감염지로의 확산의 가능성을 제시한다.

결론

2008년부터 기록된 경기도 지역의 소나무재선충병 예찰 데이터를 기반으로 신규 감염목의 발생량 추이, 전년

도 감염목으로부터의 거리 분포를 분석하여 2008년부터 2015년까지의 확산 양상을 살펴보고 환경 자료와 함께 공간분석을 실시하였다. 2008년부터 기록된 신규 감염목의 수는 2013년까지는 급격하게 증가하였고 2014년부터는 2,950본 내외로 유지되는 양상을 보였다. 감염목 중 잣나무의 비율은 평균 85% 이상으로 나타났다. 전년도 감염목으로부터 신규 감염목까지의 평균거리는 2013년에 4,111 m, 2014년에 577 m, 2015년에 666 m로, 경남지역에서 보고된 약 300 m (Song et al., 2015)보다 높게 나타났다. 5 km 이내의 자료만을 대상으로 하여도 평균 527 m로 나타나 경남에 비해 경기도의 소나무재선충병 확산 거리가 큰 것으로 나타났다. 신규 감염목이 기록된 최고 고도는 2013년까지 증가 추세를 보이며 587 m를 기록한 이후 다소 감소하였다. 경기도의 소나무재선충병 확산은 비교적 최근 발생하기 시작하였으므로 이와 같은 결과가 매개충이나 감염원의 서식지 한계 특성과 연관되어 있는지는 명확하지 않다. 따라서 기후변화로 인해 더 높은 고도로 소나무재선충병이 확산할 것인지는 분명하지 않다. 연구대상지에서 모든 감염목이 잣나무와 소나무였음에도 불구하고 신규발생목 위치가 소나무림으로

분류된 임장에서 발생한 경우는 매우 적었으며 잣나무림에서도 20% 정도의 감염목만이 기록되었다. 이는 산발적으로 분포하는 잣나무와 소나무 개별목에서 발생하는 비율이 매우 높으며, 이에 따라 임상도에 전적으로 의존하는 예찰이나 방제의 효과가 제한적일 수 있음을 시사한다.

감염목 위치와 도로와의 관계를 살펴보면, 감염목 위치의 도로 밀도 평균과 중앙값이 경기도 전체보다 높아 도로가 소나무재선충병 확산에 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다. 또한 신규감염목이 도로 인근에서 지속적으로 발생하는 동시에 시간이 지남에 따라 도로로부터 먼 곳으로 확산이 되고 있음을 보여주고 있다. 도로 밀도와의 관계를 살펴보면 최솟값이 줄어드는 추세를 보이고 있어 최초 감염은 도로 인근에서 시작되지만 점차 도로 밀도가 낮은 산림 지역으로 깊숙이 확산되고 있음을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2017R1A2B4010460)과 국립산림과학원 위탁연구과제(FE0702-2016-01-2017) ‘비병징 감염목과 장거리 확산 특성을 반영한 소나무재선충병 확산 모형의 개발’의 지원으로 이루어진 것임.

References

- Chung, Y.J. 2002. The occurrence and spread of pine wilt disease in Korea. Korea Research Group of Tree Protection 7: 1-9.
- Clark, P.J. and Evans, F.C. 1954. Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. Ecology 35(4): 445-453.
- Dwinell, L.D. and Nickle, W.R. 1989. An Overview of the Pine Wood Nematode Ban in North America. General Technical Report. SE-55. USDA, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. Asheville, North Carolina, U.S.A. pp. 20.
- Gyeonggi Province Government. 2015. Statistical yearbook of Gyeonggi. Gyeonggi Province Government. Suwon, Korea. pp. 1006.
- Hellmann, J.J., Byers, J.E., Bierwagen, B.G. and Dukes, J.S. 2008. Five potential consequences of climate change for invasive species. Conservation biology 22(3): 534-543.
- Kim, H.S. 2015. Treatment for pine wilt disease, is it safe?. Issue & Diagnosis. No. 194. Gyeonggi Research Institute. Korea. pp. 27.
- Kim, J.B., Jo, M.H., Oh, J.S., Lee, G.J., Park, S.J. and Um, H.H. 2001. Temporal and Spatial Correlation Analysis of *Bursaphelenchus xylophilus* Damaged Area and Meteorological Factors using GIS and Satellite Images. The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology: 49-52.
- Korea Forest Research Institute. 2007a. Damage characteristics of pinewood nematode in Korean pine forest. Forest science news. 07-01. Seoul, Korea. pp. 12.
- Korea Forest Research Institute. 2007b. Ecology and prevention strategy of pinewood nematode. Forest science news. 07-22. Seoul, Korea. pp. 32
- Korea Forest Research Institute. 2009. the 4th Digital forest type map. Forest science news. 09-15. Seoul, Korea. pp. 8.
- Korea Forest Research Institute. 2011. Pine wilt disease outbreak history in Korea with photograph. Research material 445. Seoul, Korea. pp. 125.
- Korea Forest Research Institute. 2013. A study on ecological characteristics and natural enemy utilization of pinewood nematode. Seoul, Korea. pp.140
- Korea Forest Service. 2005. Statistical yearbook of forestry, Korea Forest Service Daejeon, Korea. pp. 462.
- Korea Forest Service. 2009. Statistical yearbook of forestry, Korea Forest Service Daejeon, Korea. pp. 495.
- Korea Forest Service. 2013. Special measures to prevent the pine wilt disease in Gyeonggi province, Korea: pp. 19.
- Korea Forest Service. 2015. Statistical yearbook of forestry, Korea Forest Service. Daejeon, Korea: pp. 440.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2015. Standard Node Link. <http://nodelink.its.go.kr/>. (2016. 5. 16).
- Moon, I.S. 2007. Analysis on cause of occurrence pine wilt disease in Korean pine forest. Korea Research Group of Tree Protection. 12. 27-33.
- R Development Core Team. 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>. (2016. 5. 16).
- 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. 10.
- 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 Korea Forest Society 95(3): 240-249.
- Song, H.J., Choi, W.I. and Nam, Y.W. 2015. Analysis on annual spreading speed of pine wilt disease in Yeongnam area. Korean Society of Applied Entomology Conference Abstract Book 2015(10): 151.
- Suarez, A.V., Holway D.A. and Case, T.J. 2001. Patterns of Spread in Biological Invasions Dominated by Long-

- Distance Jump Dispersal: Insights from Argentine Ants. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98(3): 1095-1100.
- Takasu, F., Yamamoto, N., Kawasaki, K., Togashi, K., Kishi, Y. and Shigesada, N. 2000. Modeling the expansion of an introduced tree disease. *Biological Invasions* 2: 141-150.
- Togashi, K. and Shigesada, N., 2006. Spread of the pinewood nematode vectored by the Japanese pine sawyer: modeling and analytical approaches. *Population Ecology* 48(4): 271-283.
- Von der Lippe, M. and Kowarik, I. 2007. Long-Distance Dispersal of Plants by Vehicles as a Driver of Plant Invasions. *Conservation Biology* 21: 986-996.
- 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 Buhrer) Nickle and its insect vector in Korea. *Research Reports of the Forestry Research Institute* 38: 141-149.

Manuscript Received : May 10, 2018

First Revision : October 22, 2018

Accepted : October 23, 2018