

소나무재선충 고사목 제거에 따른 산림훼손 보고¹

홍석환² · 이수동^{3*}

Report on Forests Damaged Due to Cutting Trees Infected by Pine Wilt Disease¹

Suk-Hwan Hong² · Soo-Dong Lee^{3*}

요 약

소나무재선충병에 대한 다양한 방제방법에도 고사목은 해마다 급격히 증가하고 있다. 그러나 현 방제방법 문제에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 재선충 확산 방지를 위해 가장 널리 쓰이는 방법은 병의 매개충인 솔수염하늘소 유충 폐사를 위한 감염목 훈증처리방법이다. 본 연구는 산림 내 소나무재선충 감염목 훈증처리지역에서 훼손 정도를 확인하고자 경상남도 밀양시 일대에 100m²의 조사구 32개소를 설치하여 근원단면적과 수관단면적을 분석하였다. 훼손되지 않은 수목에서 도출한 근원단면적과 수관단면적의 회귀식(침엽수: $R^2=57.4$, 낙엽활엽수: $R^2=63.8$)을 바탕으로 훼손된 수목의 수관단면적을 유추하였다. 분석결과 수관단면적을 기준으로 재선충감염목은 18.7%이었으며 재선충과 무관하게 베어진 수목은 35.5%에 달했다. 소나무류의 경우 8.4%가 재선충과 관계없이 훼손되었으나 참나무류를 포함한 낙엽활엽수류는 훼손비율이 62%에 달했다. 소나무재선충 방제를 위한 훈증처리작업에 따른 아교목층 낙엽활엽수의 무분별한 제거는 산림의 온도저감, 습도조절 등 공익적 기능을 저하할 우려가 높았다.

주요어: 솔수염하늘소, 훈증처리, 산림천이

ABSTRACT

Despite various control methods for pine wilt disease, the disease has been increasing at an alarming rate every year in Korea. Still there is a lack of research on the problems of the current methods used to curb the disease. One main method to control pine wilt disease is fumigation for eliminating the larva of the pine sawyer beetle (*Monochamus alternatus*) which is known as the vector insect for pine wilt disease. We surveyed and analyzed the amount of destroyed uninfected trees in the fumigated area by studying 32 survey plots (100 m²) in Miryang city. The destroyed trees' crown area was estimated by induced regression between root collar area and crown area of the remaining trees (coniferous tree: $R^2=57.4$, deciduous broad-leaved tree: $R^2=63.8$). According to the analysis results, the infected trees (cut trees) were 18.7% and cut trees which were not infected were 35.5% of the total tree population of the study area on the basis of total crown area. In case of pine trees, 8.4% of uninfected trees were cut off but 62% of uninfected deciduous broad-leaved trees including *Quercus* spp. were affected and damaged during the fumigation process. Since these broad-leaved trees dominate the sub-canopy layer of the forest, this indiscriminate interruption of broad-leaved trees has the adverse effect of depriving the public benefits such as shadow, a cooler weather, controlling humidity, etc.

KEY WORDS: PINE SAWYER BEETLE(*Monochamus alternatus*), FUMIGATION, FOREST SUCCESSION

1 접수 2015년 4월 21일, 수정(1차: 2015년 5월 29일, 2차: 2015년 8월 4일), 게재확정 2015년 8월 5일
Received 21 April 2015; Revised (1st: 29 May 2015, 2nd: 4 August 2015); Accepted 5 August 2015
2 부산대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Pusan Nat'l Univ., Miryang 50463, Korea
3 경남과학기술대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, GNTECH, Jinju 52725, Korea
* 교신저자 Corresponding author: E-mail: ecoplan@gntech.ac.kr

서론

소나무재선충병이 한국에 상륙한 1988년 이후 약 30년이 되어가면서 감염지역 면적은 지속적으로 확장되고 있으며 피해를 막기 위한 노력 또한 필사적임에도 불구하고 2014년에도 100만주 이상 피해목이 발생하는 등 그 속도가 증가하고 있고 이에 따라 방제면적 및 방제비용 또한 증가하고 있다. 2014년 10월 말 기준으로 소나무재선충에 의한 고사목은 총 802만 본이며 현재 70개 지자체에서 피해가 진행중이다(KFS, 2014). 재선충 확산방지를 위한 방제방법으로는 항공 및 지상 약제살포와 수간주사, 감염목에 대한 훈증처리 방법이 주로 쓰이고 있다. 이 중 감염목의 훈증처리 방법은 감염목 내 소나무재선충병 매개체인 솔수염하늘소 유충을 효과적으로 폐사시키기 위해 월동기, 즉 봄철 유충이 우화하기 전까지인 4월 말까지 피해고사목을 절단하여 농약을 주입하고 비닐로 밀봉하는 방법이다. 이러한 방법으로 처리된 감염목은 2013년 한 해에만 218만 본에 달한다(KFS, 2014).

국내에서 훈증처리를 위해 사용하는 약제는 살충제인 메탐소듐액제인데, 감염목을 벌목하여 일정 길이로 잘라 축적한 후 약제를 주입하고 주로 방수포를 씌워서 처리하게 된다. 감염목 처리과정에서는 처리목 도복으로 인한 의도적·비의도적 도미노효과로 주변목이 훼손되는데(Sakamoto *et al.*, 1995) 주변수목 피해원인으로는 작업자의 원활한 이동을 위한 인위적 훼손·벌채목 도복에 따른 훼손, 벌채목의 세분 및 축적을 위한 이동작업을 용이하게 하기 위한 훼손, 축적처리구 마련을 위한 공간확보 등 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 감염목 처리는 자연스럽게 해당지역의 생태량을 감소시키게 된다(Sakamoto *et al.*, 1995). 현재 우리나라에서는 재선충 방제작업으로 인해 발생하는 주변수목 훼손에 관한 연구는 보고된 바 없으며 생태적 측면에서의 연구는 거의 진행되지 않은 실정이다.

본 연구는 소나무재선충 피해지역 훈증처리를 위한 작업시 실제 발생하고 있는 주변수목 훼손실태를 정량적으로 파악하고자 하는데 1차적 목적이 있으며 이의 결과를 바탕으로 인위적으로 발생하는 2차 피해에 관한 논의를 진행하고자 하는데 그 목적이 있다.

연구방법

2014년 현재 소나무재선충 피해가 극심한 지역은 제주도와 경상남도에 집중적으로 분포하고 있으며 경남지역의 경우 서부보다는 동부에서 피해가 심각한 것으로 확인되고 있다(KFS, 2014). 본 조사는 소나무재선충 피해가 극심한

지역 중 하나인 경상남도 밀양시 일대를 대상으로 하였다.

조사는 재선충 방제로 인해 제거되는 수목의 개체수와 근원단면적, 수관단면적의 정량적 분석을 통해 인위적 훼손 정도를 파악하고자 하였다. 훼손 수목 개체수의 경우 교목층과 아교목층을 모두 조사한 결과로 개체수는 수목의 규격에 따른 숲에서의 영향력 등을 제대로 파악할 수 없는 한계를 안고 있었다. 이러한 문제를 보완하기 위해 수목의 크기에 따른 숲에서의 영향력 분석이 필요하였는데, 이를 위해 수종별 근원단면적과 수관단면적을 계산하여 비교하였다.

식생조사는 재선충에 감염된 소나무림 내에서 훈증처리가 이루어진 지역을 대상으로 하였는데, 2014년 겨울부터 2015년 봄까지 최근에 작업이 이루어진 지역을 대상으로 하였다. 각 조사구는 크기 10m×10m (100㎡)으로 설정하고 조사구 내에는 이번 겨울에 작업한 훈증무덤이 최소 1개소 이상 포함되도록 설정하였다. 조사구는 총 32개소를 설치하여 조사하였다.

현장조사는 조사구 내 출현하는 수고 2m 이상, 근원직경 3cm 이상의 교목층 및 아교목층에 생육하는 모든 수목의 수종 및 근원직경, 수관폭의 매목조사를 실시하였다. 산림생태계 매목조사 시 흉고직경을 측정하는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 훼손된 수목의 조사를 위해 수목규격의 조사를 근원직경으로 설정하였다. 근원직경 조사는 지면에서 30cm 높이에서 실시하되 지면과 인접하여 절단이 이루어진 수목은 절단높이에서 측정하였다. 수관폭의 경우 한 수목의 수관 장축과 단축의 두 길이를 조사한 후 두 길이에 따른 타원면적을 수관면적으로 계산하여 적용하였다.

식생조사에서는 훈증처리를 위해 제거된 감염목을 포함하여 작업과정에서 훼손된 훼손목, 최근 숲가꾸기 또는 다른 이유에서 제거된 제거목을 함께 조사하였는데 이들 수목의 경우 관목층 수목을 배제하기 위해 근원직경 3cm 이상 수목만을 조사하였고 층위구분은 하지 않았다. 조사구 내에서 인위적으로 제거된 수목 중 소나무재선충에 감염되어 제거된 감염목은 지면까지의 수피를 모두 인위적으로 제거한 흔적이 있어 명확히 구분할 수 있었으나 작업과정에서 훼손된 훼손목과 기타 다른 이유에서 제거된 제거목은 구분이 모호한 경우가 많으며 제거된 시기를 명확히 판단하기 어려웠다. 이에 제거된 수목의 수피가 제 형태로 남아있는 경우에 한해 조사하였으며, 제거된 후 시간이 경과하여 수피가 일부 이탈하거나 목질 일부가 썩는 등의 상태를 보이는 수목은 조사에서 제외하였다. 제거목의 경우 수종구분이 불확실한 경우가 많아 수종이 확인되는 경우 수종명을 기록하였으며 수종이 모호한 경우 소나무류, 참나무류, 기타 낙엽활엽수류로 구분하여 조사하였다. 수피가 남아있는 경우에 한해 조사를 하였으므로 참나무류와 기타 낙엽활엽수류의 구분은 용이하였다.

식생조사자료를 토대로 각 조사구의 수종별 제거실태를 정량적으로 살펴보기 위해 제거작업 이전과 이후의 식생유형별 근원단면적을 계산하였다. 아울러 산림의 기후조절 관점에서 숲의 온도와 습도를 조절하는 능력은 수목의 수관 크기가 아닌 실질적인 광합성이 일어나는 잎의 면적, 즉 수관 크기가 중요하므로 조사구 내 수관피복면적을 계산하였다. 우리나라 산림생태계 조사에서 수종별 상대적 우세 비교는 일반적으로 Curtis and McIntosh(1951)의 중요치(Importance Value)를 수관층위별로 가중치를 달리하여 교목층과 아교목층 관목층을 3:2:1의 비율로 계산하는 평균상대우점치(Park, 1985)를 계산하나, 본 연구에서는 층위구분이 불가능하므로 수종별 근원단면적 비율로 우점정도를 살펴보았다.

근원단면적은 현장조사자료를 바탕으로 산정할 수 있으

나 수관이 이미 잘려나간 훼손목의 수관피복면적을 구하기 위해서는 제거된 수목의 수관단면적을 추정할 필요성이 있었다. 제거된 수목의 수관단면적 추정은 조사지 내 훼손되지 않은 수목의 근원직경과 수관단면적 간 회귀분석을 실시하여 도출된 회귀식을 바탕으로 제거목의 수관단면적을 계산하여 적용하였다. 보다 정확한 추정을 위해 침엽수와 활엽수의 회귀식을 별도로 산정하여 적용하였다. 통계분석은 SPSS 21.0 프로그램을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 개체수

조사구별 출현개체수는 조사구별로 평균 약 23개체가 있었

Table 1. Individual number of remained and destroyed trees each survey plot

No.	<i>Pinus</i> spp.			<i>Quercus</i> spp.		Other deciduous tree		Total		
	Remained	Destroyed	Fumigated	Remained	Destroyed	Remained	Destroyed	Remained	Destroyed	Fumigated
1	5	7	1	3	5	15	7	23	19	1
2	3	2	-	2	6	3	14	8	22	-
3	2	2	6	2	6	2	3	6	11	6
4	8	-	2	1	3	8	4	17	7	2
5	1	3	-	5	6	1	2	7	11	-
6	1	1	-	9	7	7	6	17	14	-
7	10	10	1	-	8	10	-	20	18	1
8	3	3	5	3	8	3	6	9	17	5
9	2	7	2	1	1	1	1	4	9	2
10	5	8	3	1	3	-	5	6	16	3
11	1	3	2	4	10	2	-	7	13	2
12	1	-	1	6	1	2	8	9	9	1
13	1	-	6	5	1	2	-	8	1	6
14	13	3	-	-	-	1	3	14	6	-
15	5	9	2	1	2	4	10	10	21	2
16	2	4	9	-	4	-	5	2	13	9
17	3	-	2	7	7	-	-	10	7	2
18	6	1	1	5	8	3	6	14	15	1
19	1	1	4	-	2	1	3	2	6	4
20	1	3	3	-	4	3	11	4	18	3
21	-	-	2	-	7	-	10	0	17	2
22	2	-	1	2	8	2	1	6	9	1
23	6	1	-	1	3	5	4	12	8	-
24	8	-	1	1	3	-	2	9	5	1
25	3	-	1	4	4	1	4	8	8	1
26	7	-	2	-	5	5	4	12	9	2
27	3	1	2	4	4	2	6	9	11	2
28	7	-	3	-	8	1	3	8	11	3
29	1	1	2	1	8	3	4	5	13	2
30	2	-	2	-	-	2	13	4	13	2
31	2	-	5	2	5	10	4	14	9	5
32	5	-	1	3	10	-	2	8	12	1
Ave.	3.8	2.2	2.3	4.9	3.1	4.7	9.1	9.1	11.8	2.3

으며 이 중 소나무류는 약 8개체, 참나무류가 약 8개체, 기타 낙엽활엽수류가 14개체 정도로 출현하였다. 재선충에 감염되어 제거된 수목은 조사구당 평균 2.3개체이였으며 가장 많은 곳은 9개체이였다. 소나무재선충과 관계없이 훼손된 수목은 조사구 평균 소나무류가 2.2개체, 참나무류가 3.1개체, 기타 낙엽활엽수류가 9.1개체로 상대적으로 낙엽활엽수류의 훼손이 많음을 확인할 수 있었다. 그러나 단순 개체수는 앞서 언급한 바와 같이 해당 숲에서 수목의 지위를 객관적으로 판단할 수 없는 관계로 추가적인 분석이 필요하였다.

2. 근원단면적

조사대상지 내에 남아있는 수목과 감염목, 훼손목의 조사 결과를 바탕으로 조사구별 수목의 근원단면적을 계산하였

다(Table 2). 총 수목의 근원단면적 합계는 평균 4,428.4cm² 이였으며 가장 적은 조사구(2,059.8cm²)와 가장 많은 조사구(9,246.5cm²)는 약 4.5배 차이를 보였다. 조사구별 수목의 수관단면적과 감염목의 수관단면적(r=0.71), 혼중더미 개소수(r=0.62)는 밀접한 양(+)의 상관관계를 보여 단위면적당 단면적이 클수록 소나무재선충의 피해정도가 더 큰 것으로 나타났다. 향후 이러한 특성 조사는 전국적인 샘플 채취를 통해 추가적으로 밝혀야 할 것으로 판단된다.

혼중더미를 최소 1개소 이상 포함하는 32개 조사구에서 소나무혼중목이 발견되지 않은 조사구가 5개소 있었는데, 이 지역은 제거목 기부 위에 혼중더미를 조성한 것으로 추정되었다. 혼중더미는 조사구별로 상이하였는데 100m² 면적에 최대 9개소의 혼중더미가 조성된 곳이 있었다.

감염에 의해 처리된 수목을 포함하여 곰솔과 소나무, 리

Table 2. Root collar area and ratio of each tree type

No.	Root collar area(cm ²) / Ratio(%)									Fumigation pile
	Pinus spp.		Fumigated tree		Quercus spp.		Other deciduous tree		Total	
1	1,876.1	40.2	615.4	13.2	2,026.1	43.4	151.1	3.2	4,668.7	1
2	2,053.6	53.8	-	-	1,309.4	34.3	451.4	11.8	3,814.4	4
3	759.1	14.4	3,500.3	66.6	815.8	15.5	184.4	3.5	5,259.6	4
4	2,081.0	64.0	757.5	23.3	121.7	3.7	292.8	9.0	3,253.0	1
5	759.1	16.6	-	-	3,762.5	82.0	65.1	1.4	4,586.7	1
6	141.3	3.4	-	-	3,419.5	82.9	566.0	13.7	4,126.8	1
7	6,869.6	87.8	615.4	7.9	215.9	2.8	125.6	1.6	7,826.5	2
8	1,257.5	24.2	2,372.3	45.6	1,267.8	24.4	300.6	5.8	5,198.2	1
9	1,664.2	57.0	960.8	32.9	266.9	9.1	26.7	0.9	2,918.6	5
10	1,763.1	43.6	1,168.1	28.9	1,026.8	25.4	85.6	2.1	4,043.6	5
11	921.6	17.0	1,635.9	30.2	2,826.1	52.1	40.8	0.8	5,424.4	2
12	78.5	1.3	854.9	13.8	3,958.7	63.8	1,311.0	21.1	6,203.1	2
13	490.6	8.0	4,396.0	72.1	1,200.2	19.7	10.2	0.2	6,097.0	5
14	3,498.8	98.6	-	-	-	-	50.3	1.4	3,549.1	2
15	2,961.0	76.3	455.3	11.7	92.7	2.4	369.7	9.5	3,878.7	2
16	780.3	15.2	3,644.0	70.9	610.7	11.9	107.5	2.1	5,142.5	1
17	678.2	24.8	533.8	19.6	1,518.2	55.6	-	-	2,730.2	2
18	2,658.1	65.7	854.9	21.1	380.0	9.4	149.9	3.7	4,042.9	5
19	616.3	6.8	8,350.0	92.1	32.2	0.4	64.3	0.7	9,062.8	9
20	2,198.0	23.8	6,293.3	68.1	88.7	1.0	666.5	7.2	9,246.5	6
21	-	-	2,574.8	89.2	105.2	3.6	207.2	7.2	2,887.2	9
22	830.5	40.3	706.5	34.3	437.2	21.2	85.6	4.2	2,059.8	3
23	2,978.3	86.1	-	-	121.7	3.5	361.1	10.4	3,461.1	1
24	3,123.5	81.4	490.6	12.8	146.8	3.8	76.9	2.0	3,837.8	2
25	1,654.0	33.8	854.9	17.5	2,331.5	47.7	46.4	0.9	4,886.8	1
26	2,344.8	74.6	510.3	16.2	117.8	3.7	171.9	5.5	3,144.8	2
27	1,118.6	46.3	693.9	28.7	283.4	11.7	317.9	13.2	2,413.8	3
28	2,496.3	61.6	1,311.0	32.3	176.6	4.4	70.7	1.7	4,054.6	3
29	688.5	19.9	1,765.5	51.1	597.3	17.3	403.5	11.7	3,454.8	3
30	729.3	26.4	799.1	29.0	-	-	1,231.7	44.6	2,760.1	3
31	314.0	8.6	2,073.2	56.5	826.6	22.5	458.4	12.5	3,672.2	6
32	1,497.0	37.4	201.0	5.0	2,270.3	56.7	35.3	0.9	4,003.6	4
Ave.	1,621.3	36.6	1,530.9	34.6	1,011.0	22.8	265.2	6.0	4,428.4	3

기다소나무 등 소나무류가 차지하는 비율은 32개 조사구에서 평균 71.2%로 대부분 소나무우점림으로 판단할 수 있었으며 감염목 비율이 34.6%, 비감염목 비율이 36.6%로 조사구 내에서 감염목 비율과 비감염목 비율이 거의 유사하였다. 그러나 앞서 언급하였듯이 처리된 감염목 그루터기가 혼중터미 내부에 있을 경우 계산되지 않으므로 감염목의 비율은 측정치보다 높겠으며 아울러 소나무류림이 차지하는 비율 또한 보다 높았을 것이다. 참나무류가 차지하는 비율은 22.8%이었으며 참나무류를 제외한 낙엽활엽수 비율은 6.0%에 불과하여 상대적으로 높지는 않았다.

3. 수관단면적

훼손수목에 대한 수관단면적 추정식 계산을 위해 32개 조사구에서 조사된 훼손되지 않은 모든 수목을 대상으로 근원직경과 수관단면적 간 회귀분석을 실시하였다. 도출된 소나무류의 회귀식은 58.8%의 설명력을 보였으며 낙엽활엽수의 설명력은 63.8%로 두 집단 모두 매우 높은 설명력을 보여 훼손되어 근원직경만 측정할 수 있었던 수목의 수관단면적 추정에 활용하였다. 도출된 수식은 아래와 같다.

$$1) CCA = 0.199R^2 + 0.014R - 2.868$$

$$2) DCA = 0.007R^2 + 0.685R + 1.031$$

(CCA: crown area of coniferous trees (m²), DCA: crown area of deciduous trees (m²), R: collar diameter (cm))

훼손수목은 위에서 도출된 회귀식을 통해 수관단면적을 산정한 후 훼손되지 않은 수목의 수관단면적과 합하여 조사구별 전체 수관단면적과 식생유형별 비율을 분석하였다.

조사구별 수관단면적은 훼손수목을 포함하여 전체 수목의 수관단면적이 조사구 면적인 100m²에 미치지 못하는 조사구가 3개소 있었으며 평균은 약 175m²이었다. 수관단면적 추정 결과 감염목 처리이전의 경우 대부분 조사지가 교목층을 포함하여 아교목층까지 층위구조가 안정되게 형성된 지역이었음을 추정할 수 있었다.

본 분석에서 중요하게 바라봐야 할 것은 감염되어 혼중처리한 수목을 포함하여 소나무류가 차지하는 근원단면적 평균은 70%를 넘었으나 전체 수관단면적 비율은 38.3%인 반면 참나무류가 차지하는 비율은 이보다 조금 높아 39.0%, 기타 낙엽활엽수가 차지하는 비율은 22.7%에 해당한다는 것이다. 달리 말하면 참나무류와 기타 낙엽활엽수의 경우 교목층보다는 아교목층에 형성되어 있는 수목들이 훨씬 많은 비율을 차지한다는 의미이다. 이는 일반적인 소나무림의 천이경향인 참나무류림으로의 천이진행과 궤를 같이 한다.

4. 훼손정도

훼손수목과 유지되고 있는 수목의 비율을 소나무류와 참나무류, 참나무류를 제외한 기타 낙엽활엽수로 나누어 수관단면적 비율을 분석하였다(Table 4). 훼손정도에서도 소나무류와 낙엽활엽수류의 차이가 크게 나타나고 있었는데, 소

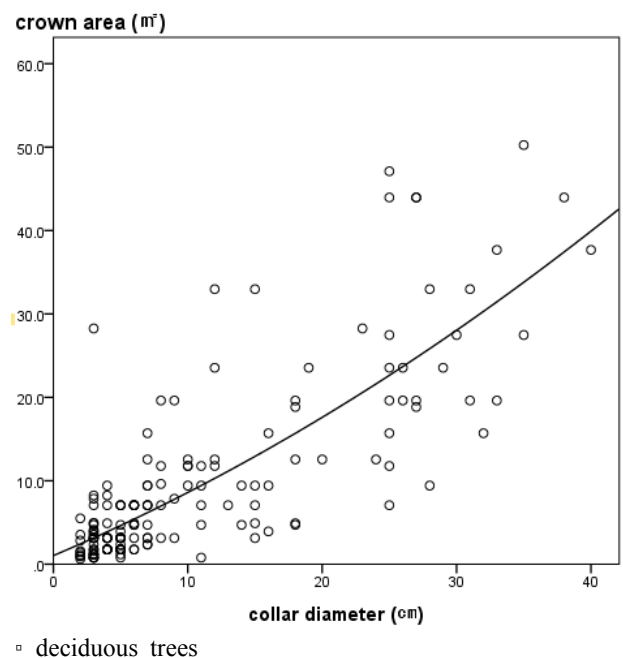
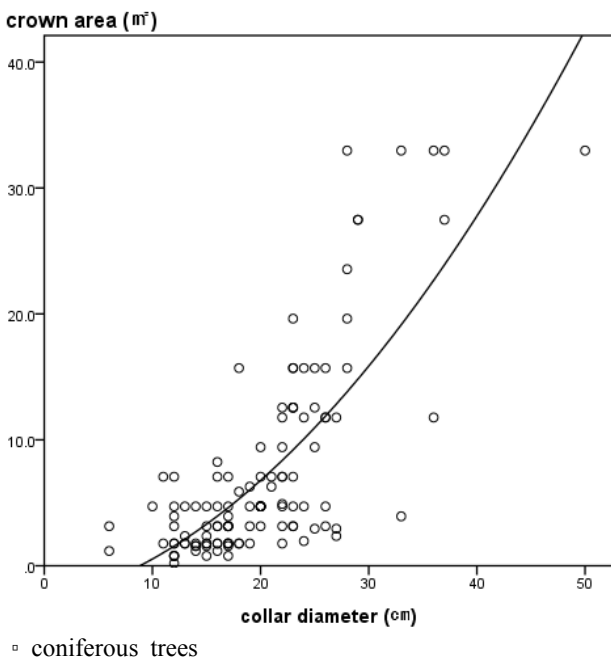


Figure 1. Statistical dispersion between collar diameter and crown area

Table 3. Crown area and ratio of each tree type

No.	Crown area(cm ²) / Ratio(%)								
	Pinus spp.		Fumigated tree		Quercus spp.		Other deciduous tree		Total
1	32.2	14.1	13.7	6.0	114.0	50.2	67.5	29.7	227.3
2	40.8	20.4	-	-	82.0	41.1	76.9	38.5	199.8
3	17.3	7.3	72.9	30.9	106.7	45.2	39.2	16.6	236.0
4	53.4	38.2	16.3	11.7	18.6	13.3	51.4	36.8	139.7
5	24.7	8.4	-	-	256.5	87.1	13.2	4.5	294.4
6	7.1	2.6	-	-	198.9	73.9	63.2	23.5	269.2
7	169.9	62.1	13.7	5.0	39.6	14.5	50.4	18.4	273.6
8	14.8	7.0	50.7	24.1	94.6	45.1	49.8	23.7	209.8
9	32.0	48.5	21.0	31.7	8.8	13.3	4.3	6.5	66.1
10	32.1	27.1	24.5	20.7	40.0	33.8	21.7	18.3	118.3
11	12.1	5.5	35.8	16.1	163.9	73.8	10.2	4.6	222.0
12	4.7	2.0	18.9	8.2	116.9	50.6	90.4	39.1	231.0
13	2.9	1.8	95.4	57.3	59.4	35.7	8.6	5.2	166.4
14	42.3	66.8	-	-	-	-	21.1	33.2	63.4
15	61.2	39.2	9.2	5.9	14.9	9.5	71.0	45.4	156.2
16	8.0	5.2	78.6	51.1	43.8	28.5	23.2	15.1	153.6
17	4.5	2.4	10.9	5.9	169.7	91.7	-	-	185.2
18	72.4	35.9	18.9	9.4	72.8	36.1	37.6	18.6	201.7
19	16.2	7.5	176.3	81.9	8.5	4.0	14.2	6.6	215.1
20	34.5	12.4	133.7	48.1	19.3	6.9	90.2	32.5	277.7
21	-	-	53.7	41.7	28.7	22.3	46.4	36.0	128.8
22	28.3	25.7	15.7	14.3	50.5	45.9	15.6	14.2	110.0
23	86.3	59.2	-	-	20.2	13.9	39.3	26.9	145.8
24	48.7	54.2	10.9	12.1	17.9	19.9	12.3	13.8	89.7
25	8.0	6.4	18.9	15.1	80.1	64.0	18.0	14.4	125.1
26	84.2	57.4	10.5	7.2	24.0	16.4	27.9	19.0	146.7
27	49.5	32.1	14.2	9.2	41.7	27.1	48.7	31.6	154.1
28	53.6	40.1	27.9	20.9	37.9	28.4	14.1	10.5	133.4
29	27.5	15.3	39.1	21.8	67.5	37.6	45.6	25.4	179.6
30	9.4	6.9	17.3	12.7	-	-	109.6	80.4	136.3
31	2.0	1.0	44.3	21.9	74.4	36.7	81.9	40.4	202.6
32	19.8	13.7	3.9	2.7	112.3	77.7	8.5	5.9	144.6
Ave.	34.4	19.6	32.7	18.7	68.3	39.0	39.7	22.7	175.1

나무류의 경우 소나무재선충에 감염되어 훈증처리를 위해 절단한 비율이 전체 소나무의 45.2%를 차지하였고 기타 다른 이유에서 훼손된 수목의 비율은 8.4%로 상대적으로 매우 낮았다. 반면 참나무류와 낙엽활엽수의 훼손정도를 살펴보면 참나무류가 61.4%, 기타 낙엽활엽수가 62.6%의 훼손율을 보였다. 이는 조사구 내 생육하고 있는 수목이 소나무재선충 감염목 처리를 전후하여 최근 1년여 사이에 약 2/3 정도가 인위적으로 잘려졌다는 것을 의미한다.

참나무류나 낙엽활엽수류 훼손비율이 소나무류에 비해 매우 높게 나타난다는 것은 감염목 처리를 위해 작업하는 과정에서 일반적으로 나타날 수 있는 도미노현상에 의한 수목의 훼손으로 보기에 무리가 따르다. 일반적인 도미노현상에 의한 것일 경우 훈증터미 개소수 및 훈증 소나무의 수관단면적 등이 훼손된 수목의 수관단면적과 밀접한 관련

성을 보여야 하나 이들간의 상관관계는 통계적으로 인정되지 않았다. 이러한 결과는 작업과정 또는 기타 다른 산림관리 과정에서 참나무류를 포함한 낙엽활엽수의 제거가 빈번하게 일어나고 있음을 의미하는 것이다.

조사구별 전체 수관단면적을 기준으로 살펴봤을 때, 훈증목의 수관단면적이 차지하는 비율 추정은 18.7%에 불과하였으나 훈증과 관계없이 훼손된 수목의 수관단면적은 35.5%로 훈증목 수관단면적의 약 2배에 달했고 소나무류를 제외한 낙엽활엽수의 훼손비율은 32.4%로 대부분 훼손수목은 낙엽활엽수로 확인되었다. 이는 조사구 면적인 100m²의 약 62%를 피복하는 면적에 해당하는 수치로 100m²당 평균 62m²의 수관이 재선충과 무관하게 훼손되었다고 볼 수 있었다.

어떤 방식으로든 산림의 관리는 토양에 간섭을 일으켜 일반적으로 토양침식을 증가시킨다(MacDonald and Stednick,

Table 4. Destroyed crown area ratio (%) of each tree type

No.	<i>Pinus</i> spp.			<i>Quercus</i> spp.		Other deciduous tree	
	live	destroyed	fumigated	live	destroyed	live	destroyed
1	45.4	24.8	29.8	79.2	20.8	62.9	37.1
2	42.3	57.7	-	65.1	34.9	6.1	93.9
3	19.1	0.1	80.8	53.0	47.0	54.6	45.4
4	76.6	-	23.4	4.2	95.8	63.8	36.2
5	79.4	20.6	-	74.4	25.6	29.6	70.4
6	100.0	-	-	62.9	37.1	55.9	44.1
7	71.6	20.9	7.5	-	100.0	100.0	-
8	14.7	7.9	77.4	45.6	54.4	26.8	73.2
9	33.0	27.5	39.5	55.8	44.2	27.2	72.8
10	30.8	25.9	43.3	49.1	50.9	-	100.0
11	6.6	18.8	74.7	21.7	78.3	100.0	-
12	19.9	-	80.1	96.0	4.0	8.7	91.3
13	3.0	-	97.0	78.3	21.7	100.0	-
14	93.7	6.3	-	-	-	44.7	55.3
15	55.5	31.5	13.0	21.1	78.9	23.5	76.5
16	7.5	1.8	90.7	-	100.0	-	100.0
17	29.2	-	70.8	65.2	34.8	-	-
18	79.3	-	20.7	53.1	46.9	34.0	66.0
19	3.7	4.7	91.6	-	100.0	12.5	87.5
20	19.6	0.9	79.5	-	100.0	20.0	80.0
21	-	-	100.0	-	100.0	-	100.0
22	64.3	-	35.7	23.3	76.7	65.4	34.6
23	93.9	6.1	-	15.5	84.5	60.5	39.5
24	81.8	-	18.2	26.4	73.6	-	100.0
25	29.8	-	70.2	84.3	15.7	21.8	78.2
26	88.9	-	11.1	-	100.0	28.1	71.9
27	64.7	13.0	22.3	55.5	44.5	27.4	72.6
28	65.7	-	34.3	-	100.0	22.3	77.7
29	41.3	-	58.7	17.4	82.6	49.1	50.9
30	35.3	-	64.7	-	-	32.9	67.1
31	4.2	-	95.8	52.8	47.2	81.9	18.1
32	83.6	-	16.4	58.7	41.3	-	100.0
Ave.	46.4	8.4	45.2	38.6	61.4	37.4	62.6

2003). 특히, 식생피도 감소는 높은 토양침식을 유발하게 된다(Zhou *et al.*, 2006). 재선충 방제와 관계없이 훼손되는 수목에 의한 35.5%의 수관단면적 축소는 지표유출수 및 토양침식의 급격한 증가를 가져올 것으로 예상되며 이는 산림의 2차 피해와 연관될 것이다.

5. 고찰

일반적으로 숲에서의 충에 의한 피해는 건조나 오염에 의한 스트레스에 의해 나타나는데, 사람이 유도한 순림지역에서 훨씬 강하게 나타나게 된다(Richardson *et al.*, 2007). 이러한 위협에서 벗어나고자 종다양성이 풍부한 자연림으로의 전환을 유도하는 관리방식은 이미 세계적인 추세이며 재선충 피해를 가장 많이 본 나라인 일본에서도 이미 1960

년대부터 자연림으로의 전환을 실천하고 있다(Fujihara, 1996). 소나무재선충은 인위적으로 관리된 소나무 순림의 자연림으로의 천이속도를 빠르게 유도하는데(Fujihara, 1996; Fujihara *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2011) 본 조사결과 이러한 자연적 안정화가 진행되는 숲에서 아교목층의 낙엽 활엽수가 제거되면서 인위적인 방해가 일어나는 것으로 확인되었다. 현재의 재선충 방제작업 중 발생하는 의도적·비의도적 낙엽활엽수의 제거는 산림지역의 식생피복면적을 축소하여 표토유실을 포함한 산사태 위험성을 높일 수 있으며 산림식생이 사라짐으로 인해 발생하는 온도상승과 토양 건조화를 촉진시킬 가능성이 높다.

소나무재선충의 확산은 온도(Rutherford *et al.*, 1990), 토양습도(Suzuki and Kiyohara, 1978)를 포함한 기후의 급변화 및 이에 따른 매개충의 급격한 증가(Togashi *et al.*, 1992;

Yoshimura *et al.*, 1999; Takasu *et al.*, 2000)에 원인이 있음이 다양한 연구를 통해 밝혀지고 있다. 기후변화가 전세계의 가장 중요한 환경이슈임을 감안할 때 산림의 기후조절능력은 산림의 가장 중요한 기능 중 하나로 인식되고 있다. 그러나 모든 산림이 높은 효과를 보이는 것은 아니다. 산림 유형에 따른 기후조절 능력에 대해 14년간 스위스 전역의 숲을 대상으로 한 von Arx *et al.* (2012)의 연구결과 저지대 낙엽활엽수림은 주변 오픈스페이스에 비해 여름철 낮시간 동안 약 2°C 이상 낮은 것으로 확인되었으며 반면 소나무림은 주변 오픈스페이스와 비교하여 0.4°C 정도 낮았고 뜨겁고 건조한 날씨일 경우에는 오히려 주변 오픈스페이스에 비해 온도가 미세하게나마 높아지는 것을 밝힌 바 있다. 공중습도는 저지대 낙엽활엽수림이 주변 오픈스페이스에 비해 여름철 습도를 6% 정도 높게 유지하는 것으로 확인된 반면 소나무림은 주변 오픈스페이스보다 2% 정도 습도가 낮은 것으로 조사되었다. 이상의 결과를 바탕으로 낙엽활엽수림의 기후조절능력은 여름철, 해발고가 낮을수록 더 큰 것으로 나타나고 있고 기후변화에 따른 소나무림의 쇠퇴 가능성은 매우 높아지게 된다고 하였다. 우리나라의 경우 세계적 추세보다 훨씬 빠르게 평균온도가 상승하고 있는 상태로 KFS(2014)는 한반도 기후변화에 의해 소나무림의 세력권이 매우 빠르게 축소됨을 기정사실화 하고 있다.

이상의 연구결과를 바탕으로 할 경우 소나무림의 급격한 쇠퇴 원인은 단순히 재선충의 확대가 아닌 급격한 기후변화에 기인한다 할 수 있다. 이는 재선충이 사라진다고 하더라도 기후변화에 기인되는 다른 병해충에 의해 소나무림이 현재와 같이 유지된다는 것은 불가능함을 말한다. 소나무림의 쇠퇴를 완화할 수 있는 가장 좋은 방법은 숲의 기후조절능력을 강화시켜 온도상승과 건조화를 최대한 억제하는 것이 될 것이다.

현 시점에서 자연은 인위적으로 관리되고 있는 소나무림을 낙엽활엽수림으로 변화시키면서 숲의 기후조절능력이 강화되는 방향으로 유도한다고 볼 수 있는데 소나무림에서, 특히 재선충에 의한 피해가 발생한 지역에서 낙엽활엽수의 제거는 이를 인위적으로 방해하는 것으로 볼 수 있다. 소나무림의 낙엽활엽수림으로의 안정화된 천이는 주변산림의 전체적 온도와 습도의 조절능력 강화를 통해 역설적으로는 소나무림을 한반도에서 더욱 오랫동안 유지할 수 있는 환경을 만드는 것으로도 해석할 수 있다. 우리나라 재선충 감염 지역이 참나무류림으로의 천이속도가 더욱 빨라질 것이라는 Yun *et al.*(2006)의 연구 또한 이를 뒷받침한다. Wu *et al.* (2005)은 중국에서 황산송(*Pinus massoniana*)과 곰솔(*Pinus thunbergii*) 우점림을 대상으로 한 연구에서 소나무재선충에 의한 피해 소나무림은 숲의 기능이 쇠퇴하지 않으며 소나무 순림과 혼효림지역 모두에서 종풍부도와 종다양

도가 매우 높게 증가하는 것으로 밝혔으며 특히 혼효림지역에서 이러한 특성이 매우 강하게 나타남을 밝힌 바 있다.

기후변화에 따른 소나무림 쇠퇴는 종다양도가 높은 낙엽활엽수림으로 변화하는 과정이며 숲의 기후조절능력을 향상시키는 과정으로 해석해야 할 것이다. 재선충 감염지역의 방제작업은 이러한 긍정적 과정을 방해한다는 관점에서 새롭게 바라봐야 할 것이다. 이에 현재 진행하고 있는 재선충 방제작업에 대해 보다 거시적 관점에서 바라보고 대안을 찾아야 할 것이다.

REFERENCES

- Fujihara, M, Y. Hada and G. Toyohara(2002) Changes in the stand structure of a pine forest after rapid growth of *Quercus serrata* Thunb. For Ecol Manag 170:55-65
- Fujihara, M.(1996) Development of secondary pine forests after pine wilt disease in western Japan. J Veg Sci 7:729-738
- Korea Forest Service(KFS)(2014) Annual trannd report of forest and forestry. KFS. 696pp (in Korean)
- MacDonald, L.H. and J.D. Stednick(2003) Forests and water: a state-of-the-art review for Colorado. Colorado Water Resources Research Institute, 65 pp.
- Park, I.H.(1985) A study on forest structure and biomass in Baegwoonsan Natural Ecosystem. Ph. D Thesis of Seoul National Univ. 42pp. (in Korean with English abstract)
- Richardson, D.M., P.W. Rundel, S.T. Jackson, R.O. Teskey, J. Aronson, A. Bytnerowicz, M.J. Wingfield and Ş. Proches (2007) Human impacts in pine forests: past, present, and future. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 38: 275-297.
- Rutherford, T.A., Y. Mamiya and J.M. Webster(1990) Nematode-induced pine wilt disease: factors influencing its occurrence and distribution. For. Sci. 36: 145-155.
- Sakamoto, K., N. Fujikawa, K. Yoshikawa and K. Chiba(1995) Stand structure and dynamics of *Pinus densiflora* forests damaged by pine wilt disease in the southern part of Okayama Prefecture. Journal of the Japanese Society Revegetation Technology 21:109-116.
- Suzuki, K. and T. Kiyohara(1978) Influence of water stress on development of pine wilting disease caused by *Bursaphelenchus lignicolus*. Eur. J. For. Path. 8, 97-107.
- Takasu, F., N. Yamamoto, K. Kawasaki, K. Togashi, Y. Kishi, and N. Shigesada(2000) Modeling the expansion of an introduced tree disease. Biol. Inv. 2, 141-150.
- Togashi, K., K. Nakamura, and F. Takahashi(1992) An index of susceptibility of pine stands to pine wilt disease. Appl. Entomol. Zool. 27, 341-347.

- von Arx, G., M. Dobbertin and M. Rebetez(2012) Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural & Forest Meteorology* 166: 144-155.
- Wu, R., Y. Chen, Z. Chen, X. Lin and D. Liang(2005) Effect of *Bursaphelenchus xylophilus* disease on vegetation succession in different types of pine forest
- Yoshimura, A., K. Kawasaki, F. Takasu, K. Togashi, K. Futai and N. Shigesada (1999) Modeling the spread of pine wilt disease caused by nematodes with pine sawyers as vector. *Ecology* 80:1691-1702.
- Yu, M., X. Xu and P. Ding(2011) Economic loss versus ecological gain: the outbreaks of invaded pinewood nematode in China. *Biol Invasions* 13: 1283-1290.
- Yun, S.L., D.J. Seo, J.H. Lee, C.K. Lee and J.K. Kim(2006) Vegetation change at the damage area of pine wilt disease. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 40(4): 5-12. (in Korean with English abstract)
- Zhou, Z.C., Z.P. Shangguan and D. Zhao(2006) Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China. *Ecological Modelling* 198(1-2): 263-268.