

## 소나무재선충 인공접종에 의한 해송묘목의 병 발달 및 수분함량 변화

윤준혁<sup>1</sup> · 우관수<sup>1\*</sup> · 문일성<sup>2</sup> · 구영본<sup>1</sup> · 이도형<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림유전자원부, <sup>2</sup>국립산림과학원 남부산림연구소, <sup>3</sup>영남대학교 산림자원학과

### Change of Water Content and Disease Development on *Pinus thunbergii* Seedlings Inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus*

Jun-Hyuck Yoon<sup>1</sup>, Kwan-Soo Woo<sup>1\*</sup>, Yil-Seong Moon<sup>2</sup>, Yeong-Bon Koo<sup>1</sup> and Do-Hyung Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-847, Korea

<sup>2</sup>Southern Forest Research Center, Korea Forest Research Institute, Jinju 660-300, Korea

<sup>3</sup>Department of Forest Resources, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

**요 약:** 본 연구는 국내산 4년생 해송을 대상으로 소나무재선충을 인공접종하여 나타나는 병징의 발달과 묘목 내 수분함량 및 선충밀도의 변화를 조사 및 분석하여 소나무재선충에 의한 생리적 변화과정 구명에 사용될 수 있는 기초 자료로 활용하고자 수행되었다. 소나무재선충 인공접종 후 20일을 기점으로 외부적으로 잎의 변색 그리고 내부적으로 접종 부위 위·아래의 목부 건조 및 수 갈변 현상이 나타났다. 그러나 접종 후 10일에 대조구 묘목과 접종묘의 목부 및 피층의 건조상태는 차이를 나타내어 목부 건조는 접종 후 10일 경부터 진행이 되고 있음을 알 수 있었다. 소나무재선충 밀도는 접종 후 5일과 10일 사이에서 소폭의 증가를 보였으나 외부적 또는 내부적 피해증상이 나타난 10일과 20일 사이에서는 급격한 증가를 보였다. 소나무재선충 접종 후 시간이 경과함에 따라 감염묘의 줄기수분함량 및 당년생 잎과 줄기의 상대수분함량은 꾸준히 감소하였다. 소나무재선충의 개체 수가 증가함에 따라 줄기수분함량, 당년생 가지 및 잎의 상대수분함량이 유의적으로 감소하여, 소나무재선충 증식은 병 발달 및 수체내 목부의 수분건조 현상과 밀접한 상관관계를 보이지만 묘목의 고사와 함께 재선충 번식이 현저히 줄어드는 것으로 나타났다.

**Abstract:** This study was carried out to provide basic information on physiological changes of 4-year-old seedlings of *Pinus thunbergii* inoculated with pine wood nematodes by analyzing changes of symptom development, stem and needle water content and nematode populations in stem. Twenty days after inoculation, needles were discolored as an external symptom, and xylem drying and pith browning occurred at the above and below of the inoculation sites as an internal symptom. However, xylem drying began to occur 10 days after inoculation, which was determined by the difference in drying status of xylem and cortex between control and inoculated seedlings. Although population of pine wood nematode increased from 5 to 10 days after inoculation, it has increased dramatically from 10 to 20 days after inoculation when both internal and external symptoms appeared. As the time passed by after inoculation with pine wood nematodes, water content of stem and relative water content in current needles and branch gradually decreased. As the number of nematodes increases, water content of stem and relative water content of current needles and branches decreased significantly. There was a positive relationship between the number of nematodes and xylem drying and/or disease development, but the number of nematodes rapidly decreased as seedlings become severely diseased.

**Keywords :** *Pinus thunbergii*, pine wood nematode, water content, xylem drying

## 서 론

소나무재선충병은 세계적으로 가장 심각한 소나무류 병

해 중 하나이며, 동아시아와 북아메리카, 유럽 등지에서 계속적인 피해가 보고되고 있다(Ichihara 등, 2000; Tan 등, 2005). 국내에서는 1988년 부산에서 최초로 발생된 이후 급격하게 증가하여 소나무(*Pinus densiflora*), 해송(*Pinus thunbergii*) 및 일부 잣나무(*Pinus koraiensis*)에 피해를 주

\*Corresponding author  
E-mail: woo9431@forest.go.kr

며 전국적으로 확산되었으나 최근 몇 년간 다소 소강상태를 보이고 있는 실정이며, 2005년 기준 그 피해 면적은 7,811 ha에 이른다(국립산림과학원, 2006). 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhrer) Nickle)은 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)가 소나무류의 신초를 후식하는 과정에서 기주목으로 이동하게 되며, 감염된 소나무류는 병징이 빠르게 확산된다. 소나무재선충이 증식할 수 있는 최적조건 하의 재선충에 감염된 묘목은 대략 30일 내에 외형적인 피해증상이 나타난다(Tan 등, 2001). 소나무재선충에 감염된 기주목은 외형적으로 침엽이 시들거나 잎이 변색되며(국립산림과학원, 2006), 내부적으로는 선충의 활동에 대한 반응으로 휘발성 물질이 분비되어 목부의 삼투압이 감소되면서 수분상승이 차단되고 가도관의 색전증(embolism)을 초래하게 된다. 또한 색전증으로 인해 발생하는 수분스트레스는 병 증상을 급속도로 진전시키며 잎의 수분포텐셜 및 광합성 감소를 초래하여 결국 나무를 고사시킨다(Kuroda, 1991; Ikeda와 Kiyohara, 1995; Kuroda, 2004). 한편, 해송은 일본에서 가장 감수성이 높은 수종이며(Kuroda, 2004), 국내에서도 많은 수의 해송이 소나무재선충병 감염에 노출되어 있다. 국내의 소나무재선충과 소나무류에 대한 기주목의 생리적 변화에 대한 연구는 미진한 실정이며, 특히 소나무재선충에 감수성이 가장 강한 것으로 알려진 해송의 병 감염에서 고사까지의 묘목 내 수지나 수분 변화에 관한 보고가 거의 없다. 따라서 본 연구는 국내산 해송묘목을 대상으로 소나무재선충을 인공접종한 후 나타나는 초기 병징의 발달과 묘목 내 수분함량 및 선충밀도의 변화를 조사·분석하여 소나무재선충 감염에 따른 생리적 변화과정 구명에 사용될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시수종

실험에 사용된 해송(*P. thunbergii*)은 국립산림과학원 산림유전자원부에서 파종 및 양묘된 4년생 묘목을 사용하였으며, 묘목의 평균 근원경은  $10.47 \pm 1.4$  mm, 평균 묘고는  $41.48 \pm 7.9$  cm 였다. 포지에서 양묘되고 있는 묘목 중, 곤충 또는 외부환경에 의한 외관상 피해가 없는 묘목을 화분에 이식한 후 실외에서 활착된 건강한 개체만을 선발하여 접종하기 4주 전에 온실에 처리별로 옮겨 환경에 적응하도록 하였으며, 조사기간 동안 온도를 측정하였고 평균온도는  $28 \pm 9.8^\circ\text{C}$  였다. 실험에 사용된 묘목은 재선충 접종 15분, 대조구 15분으로 총 30분이 소요되었다. 실험에서 시행된 모든 관찰 및 측정은 인공접종 후 5, 10, 20, 30, 60일에 각각 3분씩 수확하여 조사

하였다.

### 2. 접종용 선충 및 인공접종

소나무재선충은 피해 극심지인 경상남도 진주시에서 발견된 소나무 피해목에서 원목표본을 채취하여 잘게 파편으로 만든 뒤 Baermann funnel법으로 분리하였으며(Ayoub, 1980), PDA(potato dextrose agar)배지에서 배양된 *Botrytis cinerea* Pers. 균에 소나무재선충 현탁액 100  $\mu\text{L}$  씩 도말하여 항온기에서  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 10일간 증식시켰다. 인공접종은 2007년 9월 7일 산림유전자원부 온실에서 묘목 주간의 하단에 mess로  $1.0 \times 0.5$  cm로 상처를 낸 후, 멸균된 솜을 끼워 넣고, 소나무재선충 현탁액을 micropipette로 묘목 당 10,000마리/50  $\mu\text{L}$  씩 접종하였다. 또한 수분 손실과 2차 감염을 방지하기 위해 parafilm으로 감아주었다. 대조구에는 동일한 방법으로 멸균수를 접종하였다.

### 3. 병 진전 관찰

소나무재선충 침입에 의한 묘목의 내외적 병 진전을 관찰하기 위하여 내부적으로는 접종부위 상하 약 3cm 부위를 절단하여 횡단면 상에서 수지 건조(resin drying), 목부 건조(xylem drying), 수 갈변(pith browning) 등을 관찰하였으며 침엽의 피해정도는 전체 침엽에 대한 피해증상으로 나타나는 변색(needle yellowing)된 침엽의 비율을 조사하였다. 특히 수지 및 목부 건조는 횡단면에서 완전 건조상태를 시각적으로 확인 후(필요시 목재 조직을 눌러 확인) 자료에 포함시켰다.

### 4. 소나무재선충 밀도 조사

소나무재선충 침입에 의한 묘목의 내외적 병 진전에 따른 묘목 내 소나무재선충 밀도 변화를 관찰하기 위하여 각 측정일별로 접종 및 대조구 묘목을 각 3분씩 선발하여 Baerman funnel 법으로 48시간 후에 분리하고(Ayoub, 1980) 광학현미경(Olympus BHS, 15 $\times$ 20배)으로 검경하였다. 소나무재선충의 밀도는 각 샘플 건중량(g) 당 소나무재선충의 마리수로 나타내었다.

### 5. 수분함량 측정

소나무재선충 침입에 의한 묘목의 내외적 병 진전에 따른 수분함량의 변화를 관찰하기 위하여 줄기 수분함량의 경우, 침엽과 뿌리를 제거한 주간을 전정가위로 조각내어 섞고 무작위로 0.5 g을 선발하여  $80^\circ\text{C}$ 에서 48시간 동안 건조하였다. 상대수분함량은 당해 새롭게 형성된 가지와 침엽을 대상으로 각각 0.2 g 씩 선발하여 수돗물에 24시간 동안 침지시켜 수분포화중량을 계산하였고 건중량은 줄기 수분함량의 방법과 동일하게 시행하였다. 계산식은 다

음과 같다(Tan 등, 2005).

$$\text{줄기수분함량(\%)} = \frac{\text{샘플 생중량} - \text{샘플 건중량}}{\text{샘플 생중량}} \times 100$$

$$\text{상대수분함량(\%)} = \frac{\text{샘플 생중량} - \text{샘플 건중량}}{\text{샘플 수분포화중량} - \text{샘플 건중량}} \times 100$$

6. 통계분석

처리간의 평균 차이는 SAS 8.0을 이용하여(SAS Institute Inc., 1999) 5% 유의수준에서 t-test로 비교하였으며, 각각의 조사항목 간에 상관분석을 실시하였다.

결 과

1. 소나무재선충 접종 후 병징 관찰

4년생 해송 묘목에 소나무재선충을 인공접종한 후 묘목의 병 진전을 관찰한 결과, 접종 후 14일 째에 접종목 한 본의 2년생 잎이 변색되는 피해증상이 나타났다(Figure 1). 그 후 접종 20일째, 당년생 잎을 포함하여 33.3%의 잎 변색률을 보였으며(Figure 2), 접종 후 52일을 기점으로 측정일인 60일째 접종목은 모두 고사하였다. 대조구 묘목은 외부적으로 잎의 변색 및 시들음 등의 증상을 나타내지 않았다.

접종부위 위·아래 약 3 cm 부분을 절단한 횡단면에 손으로 압력을 가해 수지 및 목부 건조를 관찰한 결과, 접종 후 20일부터 3분 모두 목부에서 수액이 베어 나오지 않았으며 수는 갈색으로 변색 되었는데, 이와 같은 증상은 접종 후 60일 까지 지속되었다(Figure 2). 수지의 완전한 건조는 접종 후 30일에 한 본이 접종부위 위쪽 3 cm 부분에서 나타나 목부건조 및 수 갈변보다 다소 늦게 나타나는 것을 알 수 있었다(Figure 2). 한편, 접종 후 10일째 접종목 횡단면을 손으로 눌렀을 때 피층과 목부 부위에서 수액이 조금 베어 나오는 정도였으나 대조구 묘목에서는 절



Figure 1. Disease symptom (yellowing) on a *Pinus thunbergii* seedlings at 14 days after artificial inoculation with *Bursaphelenchus xylophilus*.

단과 동시에 압력을 가하지 않아도 수액이 베어 나왔다(Figure 3).

2. 소나무재선충 접종 후 선충밀도 변화

소나무재선충 밀도는 접종 후 30일 까지 꾸준히 증가하였고, 최고의 밀도를 보인 접종 후 30일의 평균 선충수는 샘플(g) 당 약 2,000 마리로 조사되었다(Figure 4). 또한 목부건조, 수 갈변, 엽 변색 등의 피해증상이 집중적으로 나타나기 시작한 접종 후 10일과 20일 사이에 가장 큰 폭으로 증가하였다. 한편, 접종 후 60일의 소나무재선충 밀도는 접종 후 30일에 비하여 절반수준으로 감소하였다. 대조구의 해송 묘목에서 소나무재선충을 분리한 결과, 소나무재선충은 없었다.

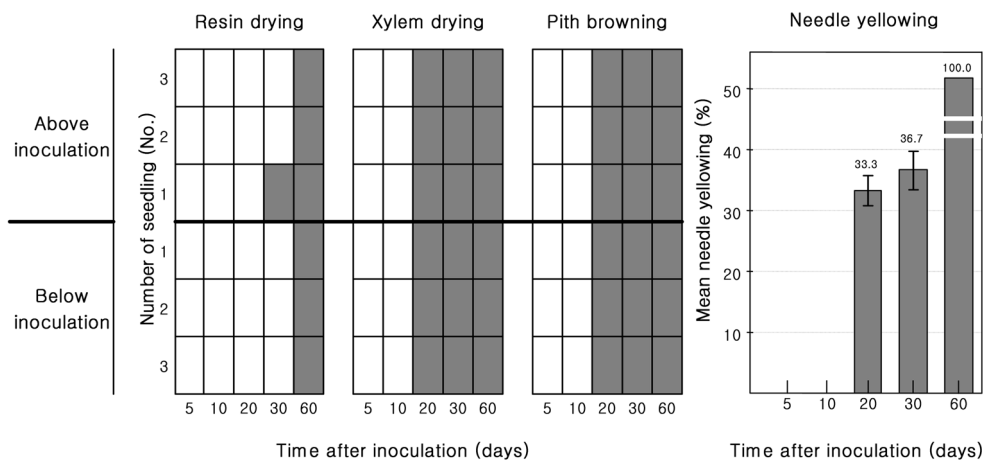


Figure 2. Disease development on *Pinus thunbergii* seedlings inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus*. White block : No disease development, grey block : Disease development. Error bars are the mean±SD of three replicates.

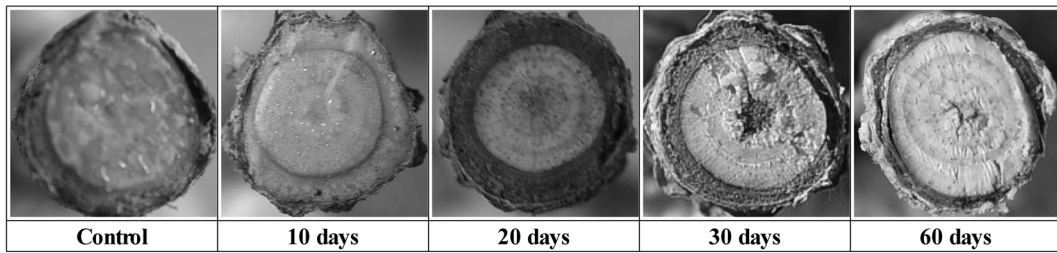


Figure 3. Disease development (resin drying, xylem drying, and pith browning) in a cross-sectioned main stem after artificial inoculation with *Bursaphelenchus xylophilus*.

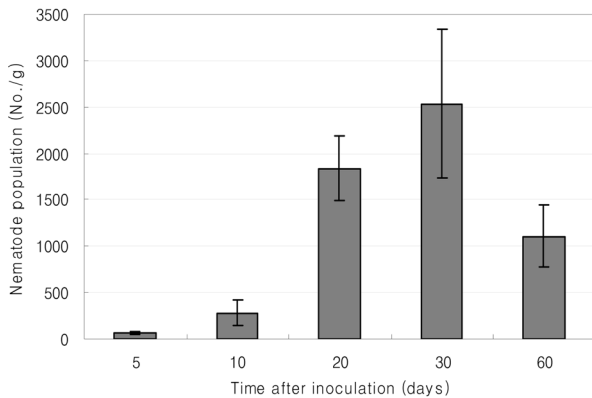


Figure 4. Change of nematode population in stem of *Pinus thunbergii* inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus*. Error bars are the mean±SD of three replicates.

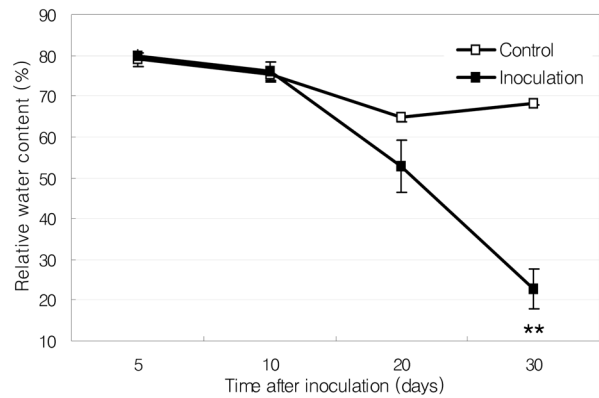


Figure 6. Change of stem relative water content in current year branches of *Pinus thunbergii* seedlings inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus* and sterile water (control). Error bars are the mean±SD of three replicates. \*\* indicate significance at 1% level.

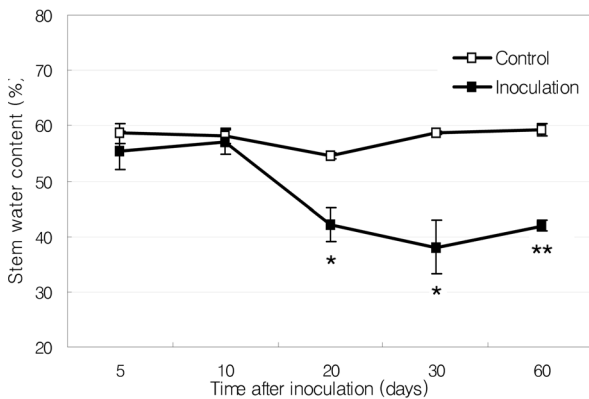


Figure 5. Change of stem water content in *Pinus thunbergii* seedlings inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus* and sterile water (control). Error bars are the mean±SD of three replicates. \* and \*\* indicate significance at 5% and 1% levels, respectively.

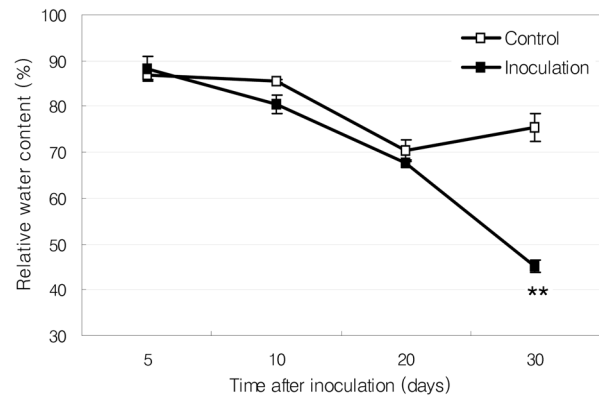


Figure 7. Change of needle relative water content in current year branches of *Pinus thunbergii* seedlings inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus* and sterile water (control). Error bars are the mean±SD of three replicates. \*\* indicate significance at 1% level.

### 3. 소나무재선충 접종 후 수분함량 변화

소나무재선충 접종목 줄기에서의 수분함량은 접종 후 10일까지는 대조구와 비교하여 차이를 보이지 않았으나 접종 후 20일( $p < 0.05$ ), 30일( $p < 0.05$ ), 60일( $p < 0.01$ )에 대조구와 접종목 간의 수분함량은 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(Figure 5). 대조구 묘목 줄기의 수분함량은 시간 경과에 따라 큰 폭의 변화 없이 일정한 수준을 유지한 반면, 소나무재선충 접종목 줄기의 수분함량은 30일까

지 꾸준히 감소하는 경향을 나타내었다.

소나무재선충 접종목과 대조구 묘목의 당년생 가지와 잎을 대상으로 상대수분함량을 측정된 결과, 소나무재선충 접종목은 접종 후 10일을 기점으로 시간 경과에 따라 꾸준히 감소하는 경향을 보였다(Figures 6, 7). 특히, 접종목은 10일과 30일 사이에 상대수분함량의 급격한 감소를 보였고, 접종 후 30일에 당년생 가지( $p < 0.01$ )와 잎( $p < 0.01$ )

**Table 1. Correlation coefficient among traits measured in *Pinus thunbergii* seedlings inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus*.**

	D	H	BD	SWC	SRWC	LRWC	NTN
Days [D]	-						
Height [H]	0.1503	-					
Basal diameter [BD]	0.0319	0.5983*	-				
Stem water content [SWC]	(0.3308)	(0.5706)*	(0.2424)	-			
Stem relative water content [SRWC]	(0.9448)***	(0.6028)*	(0.2608)	0.7646**	-		
Leaf relative water content [LRWC]	(0.9797)***	(0.5157)	(0.0742)	0.7756**	0.9449***	-	
Nematode Number [NTN]	0.3414	0.1242	(0.1758)	(0.5292)*	(0.8076)**	(0.7935)**	-

Values in parentheses are minus (-). \*, \*\* and \*\*\* indicate significance at 5%, 1% and 0.1% levels, respectively.

의 상대수분함량은 대조구와 통계적 유의차가 인정되었다. 한편, 접종 후 시간 경과에 따라 대조구 묘목의 당년생 가지와 잎의 상대수분함량은 각각  $72.92 \pm 6.6\%$ 와  $79.52 \pm 7.9\%$  수준을 유지하여 큰 변화를 보이지 않은 반면, 접종 후 5일부터 30일까지 소나무재선충 접종목 상대수분함량은 당년생 가지에서 56.89%와 잎에서 43.17%로 큰 폭으로 감소하였다. 따라서 소나무재선충을 접종한 해송 묘목에서의 당년생 가지와 잎의 상대수분함량은 접종 초기에 비해 약 2~3배 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 측정인자들 간의 상관분석

소나무재선충 접종목에 대한 측정인자들 간의 상관분석 결과(Table 1), 당년생 가지와 잎의 상대수분함량은 시간의 경과와 음(-)의 상관관계를 나타내어( $p < 0.001$ ), 접종 후 시간의 경과에 따라 상대수분함량은 지속적으로 감소한 것으로 나타났다. 또한 묘목 내에서 분리된 소나무재선충의 밀도는 줄기의 수분함량( $p < 0.05$ ), 당년생 가지( $p < 0.01$ ) 및 잎의 상대수분함량( $p < 0.01$ )과 음(-)의 상관관계를 보여, 소나무재선충의 밀도증가가 수분함량의 감소에 영향을 주는 것으로 나타났다.

## 고 찰

해송 4년생 묘목은 소나무재선충 인공접종 후 20일을 기점으로 접종 부위 위·아래 목부가 완전히 건조한 상태가 되었고 수 갈변, 잎의 변색 등을 보여 내·외부적 피해 증상이 유사한 시점에서 나타났다. 그러나 접종 후 10일에 대조구 묘목과 접종목의 목부와 피층의 건조상태는 차이를 나타내어 소나무재선충이 해송묘목에 침입한 이후 목부 건조는 접종 10일 후부터 진행이 되고 있음을 알 수 있었다. Kuroda(1991)는 선충활동에 의한 반응으로 유조직에서 휘발성물질이 생산되어 가도관의 진공현상을 유도한다고 하였으며, Tan 등(2001)은 소나무재선충이 증식할 수 있는 최적조건 하의 소나무재선충 감염 묘목은 대략 30일 내에 외형적인 피해증상이 나타난다고 보고하였다. 또한 Kuroda(2004)는 소나무재선충병 초기단계에 의

부적인 피해증상이 나타나기 전에 내부적으로 생리적 반응이 먼저 발생한다고 하였다. 따라서 위의 보고와 본 실험 결과를 종합해 볼 때, 소나무재선충 접종 후, 외부 피해증상이 나타나기 전 묘목 내에서 선충활동에 의한 반응으로 목부의 수분상태가 변화한다는 것을 알 수 있었다.

인공접종을 통해 기주목으로 침입한 소나무재선충은 접종 후 30일까지 지속적으로 증가하였다. 그러나 각 측정일별 소나무재선충의 증가량은 차이를 보였다. 특히, 접종 후 5일과 10일 사이의 선충밀도는 소폭의 증가를 나타냈지만 외부적 또는 내부적 피해증상이 나타난 10일과 20일 사이에서는 급격한 증가를 보였다. Fukuda(1997)가 소나무재선충병의 발달을 초기단계와 진행단계의 2단계로 구분하여 관찰한 결과, 소나무재선충의 묘목 내 밀도는 초기단계에서는 큰 증가추세를 보이지 않다가, 진행단계에 이르러 급속한 증가를 나타내었다고 보고하였다. 따라서 소나무재선충은 기주목 내로 침입한 후 초기에 일정기간 동안 증가를 하지 않다가 적절한 환경에 따라 급속한 성장을 하여 차대를 이뤄가는 것으로 사료된다. 소나무재선충 접종 후 60일의 선충밀도를 측정된 결과, 접종 후 30일에 비해 절반수준으로 감소하였는데, 이와 같은 결과는 소나무재선충의 급격한 증가로 인해 서식환경이 제한을 받았거나 묘목 내의 수분조건에 따른 영향이라 판단된다. Kuroda(2004)는 소나무재선충의 서식에 적합하지 않은 환경 하에서는 개체수가 감소한다고 보고하였다.

소나무재선충 접종 후 시간이 경과함에 따라 감염목의 줄기수분함량 및 당년생 잎과 줄기의 상대수분함량은 꾸준히 감소하였으며, 이는 소나무재선충에 의한 기주목의 수분결핍 증상을 나타낸 보고들(Ikeda와 Kiyohara, 1995; Kuroda, 2004)과 동일한 경향을 나타내었다. 한편, Tan 등(2005)은 해송묘목에 소나무재선충을 인공접종한 결과, 외부적 피해가 나타나기 전에 수분함량이 줄어들었다고 보고하였고, Melakeberhan 등(1991)은 소나무재선충을 고농도로 구주소나무 묘목에 접종한 결과 3일 후 수분포텐셜의 감소를 나타내었다고 보고하였다. 본 실험 결과, 수분함량은 꾸준한 감소를 보였지만 대조구 묘목과 차이를 나타낸 것은 접종 후 20일과 30일이었다. 따라서 기주목내

수분함량은 소나무재선충의 밀도, 기주목의 수종 및 연령, 온도 등의 처리요인 및 환경에 따라 감소 시기가 상이한 것으로 판단된다.

본 실험 결과, 접종 후 소나무재선충의 개체 수가 증가함에 따라 줄기수분함량, 당년생 가지 및 잎의 상대수분함량은 유의적으로 감소함을 보여, 접종목 내에서의 소나무재선충 증식은 묘목내 목부의 수분건조 현상과 밀접한 상관관계를 나타내었다. 따라서 소나무재선충의 침입과 개체 수 증가로 인한 묘목 내 생리적 변화가 재선충 접종목 고사의 원인인 것으로 판단된다. 그러나 본 실험은 온실이라는 제한된 환경과 4년생 해송묘목을 사용하여 관찰하였기 때문에 자연환경의 성숙목에서의 생리적 변화에 대한 연구가 요구된다. 본 실험 결과, 감염목 내 생리적인 변화는 소나무재선충이 기주목을 고사시키는 기작과 밀접한 관련이 있으리라 생각되고 외부적 피해증상이 나타나기 전 단계에서 내부적으로 생리적 변화가 일어나기 때문에 소나무재선충병의 진단과 기주목의 생리적 변화 관계에 대한 부가적 연구가 요구된다.

## 인용문헌

1. 국립산림과학원. 2006. 소나무재선충병 바로 알기. 연구자료 제274호. 20pp.
2. Ayoub, S.M. 1980. Plant nematology, an agricultural training aid. NemAid Pub. California. 195pp.
3. Fukuda, K. 1997. Physiological process of the symptom development and resistance mechanism in pine wilt disease. Journal of Forestry Research 2: 171-181.
4. Ichihara, Y., Fukuda, K. and Suzuki, K. 2000. Early

- symptom development and histological changes associated with migration of *Bursaphelenchus xylophilus* in seedling tissues of *Pinus thunbergii*. Plant disease 84: 675-680.
5. Ikeda, T. and Kiyohara, T. 1995. Water relations, xylem embolism and histological features of *Pinus thunbergii* inoculated with virulent and avirulent pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Journal of Experimental Botany 46: 441-449.
  6. Kuroda, K. 1991. Mechanism of cavitation development in the pine wilt disease. European Journal of Forest Pathology 21: 82-89.
  7. Kuroda, K. 2004. Inhibiting factors of symptom development in several Japanese red pine (*Pinus densiflora*) families selected as resistant to pine wilt. Journal of Forestry Research 9: 207-224.
  8. Melakeberhan, H., Torvonen, P.M.A., Vidaver, W.E., Webster, J.M. and Dube, S.I. 1991. Effect of *Bursaphelenchus xylophilus* on the water potential and water-splitting complex of photosystem of *Pinus sylvestris* seedlings. Physiological and Molecular Plant Pathology 38: 83-91.
  9. SAS Institute Inc. 1999. SAS/STAT User's Guide, Release 8.0 edition. SAS Institute Inc, Cary, North Carolina.
  10. Tan, J.J., Wu, H.P., Yang, R.Z. and Chen, Y. 2001. Effect of light on the latent period of pine wood nematode disease. Plant Quarantine 15: 136-137.
  11. Tan, J.J., Ye, J.R., Wu, X.Q., Zhu, Y.F. and Li, Y. 2005. A study on disease development and early diagnosis of pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, infection of Japanese black pine. Nematology 7(4): 481-485.

(2008년 6월 17일 접수; 2008년 11월 10일 채택)