



# 소나무재선충병 예방나무주사가 천공성 해충 발생에 미치는 영향

이상명<sup>1</sup> · 정영학<sup>1</sup> · 이동운<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>(주)에스엠바이오비전, <sup>2</sup>경북대학교 곤충생명과학과, <sup>3</sup>경북대학교 질병매개무척추동물연구소

## Effect of Nematicide Trunk Injections for Pine Wilt Disease Prevention on Occurrence of Boring Insects

Sang-myeong Lee<sup>1</sup>, Young-hak Jeong<sup>1</sup> and Dong-woon Lee<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>SM Biovision Co., Jinju, Korea

<sup>2</sup>Department of Entomology, and <sup>3</sup>Research Institute of Invertebrate Vector, Kyungpook National University, Sangju, Korea

(Received Jul. 29, 2024. Revised Aug. 14, 2024. Accepted Aug. 15, 2024)

**Abstract** Trunk injection is commonly used as a method to prevent pine wilt disease caused by the pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). Pine wilt disease is known to cause the most serious damage to pine trees in Korea. This study investigated the effects of trunk-injected agents, abamectin and emamectin benzoate, for the pine wood nematode on the occurrence of boring pests including pine wood nematode vectors. This study investigated species and density of boring insects living in the oviposition trees felled after trunk injection on Gonrido Island in Tongyeong, Gyeongsangnam-do. The island is a natural habitat for the pine wood nematode, with no difference in the density of its vector insect, *Monochamus alternatus*. In the spawning-attracting trees injected with abamectin, vector insects appeared up to two years after trunk injection. However, vectors and other boring insects (*Cryphalus fulvus* or *Sipalinus gigas gigas*) were not detected in trees treated with emamectin benzoate alone or in combination with insecticide. With abamectin treatment, wood rot of the oviposition-attractant trees occurred one year after trunk injection. However, rotting did not occur in treatments with emamectin benzoate, even after a two year period following trunk injection. After emamectin benzoate injection into the trunk, no vector insects were detected in the dead pine trees. Therefore, it can be concluded that emamectin benzoate can be used to control pine wood nematodes more effectively than abamectin.

**Keywords:** Abamectin, emamectin benzoate, *Monochamus alternatus*, suitable oviposition tree, vector

## 서론

소나무재선충병은 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*) 감염목으로부터 병원체인 소나무재선충을 새로운 기주로 하늘소류가 매개하여 전파, 확산시키는데 우리나라에서는 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)와 북방수염하늘소(*M. saltuarius*)가 주요 매개충이다(Shin, 2008). 이들 중 솔수염하늘소는 우리나라를 비롯하여 일본과 중국에서 소나무재선충의 주 매개충으로 알려져 있는데(Akikawa, 2008) 우리나라에서는 남부지방에 주로 분포하고 있다(Kwon et al., 2006).

솔수염하늘소는 대부분 1년 1세대를 경과하지만 임지의

미기상 조건이나 지역에 따라 2년 1세대를 경과하는데 고사목의 목질부에서 월동한 유충은 우화 후 살아 있는 나무의 어린 가지의 수피를 갉아 먹고 생활하다가 우화 20일경부터 고사목이나 쇠약목에 입으로 수피에 상처를 내고 줄기나 굵은 가지에 산란한다(Lee and Jeong, 1997).

소나무재선충병 방제는 기주식물과 병원체인 소나무재선충, 매개체인 하늘소류의 순환관계를 단절시키면 되는데 피해목을 벌채하여 혼중하거나 파쇄, 소각하는 방법은 소나무재선충과 매개충 모두를 대상으로 하는 방제방법이며 예방나무주사의 경우 소나무재선충이나 매개충의 방제를 목적으로 하고 있다(Kamata, 2008). 이들 중 예방나무주사는 소나무재선충의 감염을 예방적으로 차단할 수 있는 가장 확실한 방법의 하나로 나무주사에 이용되는 살선충제의 경우 나무주사 후 침입하는

\*Corresponding author

E-mail: whitegrub@knu.ac.kr

소나무재선충의 증식억제나 치사를 유발시키고, 살충제의 경우 매개충의 후식 시 약제를 섭식하게 하여 치사를 유발시킨다(Joo et al., 2023; Lee et al., 2009).

우리나라에서 살선충제 수간주입을 통한 소나무재선충병 방제에 관한 연구들은 2000년대 초반부터 수행되어 최근까지 약제선발, 효과 지속성, 처리시기별 효과 등 다양한 연구들이 수행되었다(Lee et al., 2009; 2021a; 2021b, 2023c, 2024). 또한 살선충제와 살충제 합제를 이용한 소나무재선충과 소나무재선충 매개충을 동시 방제 하는 개념의 나무주사 약제도 이용되고 있다(Lee et al., 2023c). 그러나 이들 살선충과 살충 합제 나무주사제의 살충제 성분들의 지속기간이 수간주입 익년에는 3개 시료 중 2개 시료에서 검출한계 미만으로 검출되는 등 잔류량이 현저히 감소하여 매개충 방제 효과는 나무주사 당년에 국한되고 있어(Lee et al., 2023c; NIFOS, 2020) 합제의 실효성에 대한 의문들이 제기되고 있다. 나무주사와 관련된 기존의 연구들은 살아있는 나무에 소나무재선충의 침입과 증식을 예방하기 위한 목적으로 수행되어 나무주사 후 소나무재선충의 증식이나 나무 고사에 미치는 영향, 매개충의 치사에 미치는 영향들을 연구하였다(Joo et al., 2023; Lee et al., 2009; 2021b; 2023c). 한편 살선충제인 에마멕틴벤조에이트의 경우 소나무재선충 뿐만 아니라 매개충에 대한 살충 효과가 있는 것으로 보고되고 있어(Lee et al., 2022; Sousa et al., 2013) 에마멕틴벤조에이트 수간주입이 매개충에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 기존의 연구들에서 수행되지 않았던 살선충제 수간주입 후 고사 된 소나무가 천공성 해충에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다. 나무주사를 시행한 소나무와 시행하지 않은 소나무를 벌채하여 소나무재선충의 매개충을 포함한 천공성 해충의 발생량을 소나무재선충 자연발생 임지 내에서 조사하여 살선충제

수간주입이 고사목을 중심으로 소나무재선충병의 발병순환에 미치는 영향을 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 시험지

소나무재선충 예방 나무주사를 처리한 곰솔 벌채목과 나무주사를 하지 않은 벌채목에서 천공성 해충의 발생 종류와 수를 조사하기 위한 시험지는 소나무재선충 자연발생지이면서 육지와 떨어져 있는 경남 통영시 산양읍의 곤리도 섬에서 연구를 수행하였다. 시험지는 선행 연구에서 소나무재선충 예방 나무주사 효과를 검증하기 위한 시험과 동일한 곳에서 수행되었는데(Lee et al., 2024) 시험구는 처리별로 2 ha씩 구분하여 7구역으로 나누어 연구를 수행하였다(Table 1).

### 수간주입과 매개충(솔수염하늘소) 산란 유도목 설치

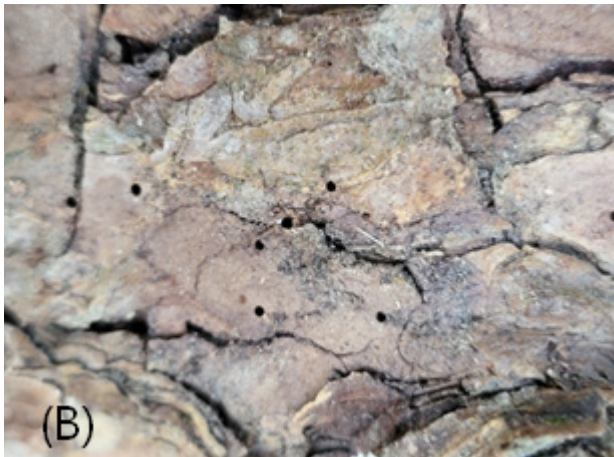
소나무재선충병 예방 효과를 검증하기 위해 사용한 수간주입 약제는 살선충제 단제인 아바멕틴 1.8% 미탁제(권장량, 배량)와 에마멕틴벤조에이트 2.15%미탁제(권장량, 배량)와 살선충제와 매개충 방제용 살충제 혼합제인 아세타미프리트·에마멕틴벤조에이트 (8+2%) 액제와 아세타미프리트·에마멕틴벤조에이트 (10+6%) 분산성액제를 사용하였다(Lee et al., 2024, Table 1). 모든 시험구 내에서 흉고직경 10 cm이상의 곰솔에 대해 나무주사를 실시하였는데 약제의 수간주입은 2021년 2월 18일~2월 23일까지 5일간 처리하였으며(Lee et al., 2024) 약제 주입 방법은 Lee et al. (2009)의 방법에 따라 처리하였다.

산란 유도목은 각 수간주입 약제 처리구별로 수간주입 처리가 이루어진 나무 5그루와 흉고직경이 10 cm미만으로서



Fig. 1 Trees felled in the test site for egg-laying induction (A) and pheromone trap to attract *Monochamus alternatus* installed in the test site (B).

수간주입을 하지 않은 나무 5그루를 임의로 선발하여 톱으로 벌채하여 임내에 존치하였다[Fig. 1(A)]. 처리 당년도에 미치는 영향을 알아보기 위한 처리는 2021년 5월 10일에 벌채하여 7 m 길이로 잘라 임내에 존치하였는데 7 m로 자른 나무의 초구 직경과 말구 직경을 측정하였다. 2년차 효과조사를 위한



**Fig. 2** Boring insects investigated within insect vector-laying trees. (A): *Monochamus alternatus*, (B): *Cryphalus fulvus*, (C): *Sipalinus gigas gigas*.

처리는 2022년 5월 23일에 벌채하여 임내에 존치하였고, 3년차 효과조사를 위한 처리는 2023년 5월 30일에 벌채하여 임내에 존치시켰다.

**시험구역 내 소나무재선충 매개충(솔수염하늘소) 성충 밀도 조사**

소나무재선충 매개충 조사는 전체 시험지 내에서 성충의 밀도를 조사하였는데 조사지역의 경우 솔수염하늘소만 분포하는 지역이어서 솔수염하늘소 페로몬 트랩을 이용하여 조사하였다[Fig. 1. (B)]. 페로몬 트랩은 (주)에이디(안동, 대한민국)의 솔수염하늘소용 페로몬 루어와 트랩을 사용하였는데 2021년에는 6월 23일~7월 15일 트랩을 설치하여 유인된 솔수염하늘소의 수를 조사하였고, 2022년에는 7월 1일~7월 15일, 2023년에는 6월 23일~7월 14일까지 조사하였다. 각 처리구당(2 ha) 1개의 페로몬 트랩을 설치하여 유인되는 솔수염하늘소 성충을 조사하였는데 밀집된 지역에 많은 수의 페로몬 트랩을 설치할 경우 인접 처리구에서 유입이 될 것을 우려하여 처리구당 중앙지점에 한 개의 트랩만을 설치하여 조사하였다.

**산란 유도목 내 천공성 해충 종류 및 밀도 조사**

산란 유도목 내 천공성 해충 조사는 천공성 해충의 산란과 수체 내 정착이 완료되는 시기를 감안하여 2021년에는 11월 24일, 2022년에는 10월 24일, 2023년에는 10월 18일에 조사하였다. 산란 유도를 위해 임내에 벌채 후 존치시킨 곰솔 주간부 7 m 내에 있는 수피를 조심스럽게 확인하면서 조사하였는데 발생하는 천공성 해충은 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소[Fig. 2(A)]와 노랑애나무좀(*Cryphalus fulvus*)[Fig. 2(B)], 왕바구미(*Sipalinus gigas gigas*)[Fig. 2(C)]로 구분하여 조사하였다. 노랑애나무좀은 밀도가 높아 20 X 20 cm<sup>2</sup>내의 수피부에 있는 구멍수를 조사하였으며 솔수염하늘소와 왕바구미는 전체 7 m 수간부에 있는 유충이나 구멍수를 수피를 조심스럽게 벗기면서 조사하였다. 솔수염하늘소와 왕바구미 밀도는 소나무에서 말구직경을 이용하여 임목의 재적을 산출하는 Samalian식을 이용하여 재적을 계산(KFS & NIFS, 2018)한 뒤 m<sup>3</sup>당 마리수로 환산하여 자료를 분석하였다.

**통계분석**

시험구역 내 솔수염하늘소 성충 밀도는 각 트랩에 1년간 유인된 수를 한 반복으로 3년간 조사된 자료를 평균하여 처리평균간 차이를 Tukey test로 분산분석 하였다(SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011). 산란 유도목 내 천공성 해충의 발생량 비교는 각 수간주입 처리구별로 약제 처리목과 비처리목으로 구분하여 평균간 차이를 Tukey test로

**Table 1.** Annual average number of *Monochamus alternatus* attracted to pheromone traps in each treatment plot

Treatment {Abbreviation}	Mean number±SD
Abamectin (Ab) 1.8% micro-emulsion recommended rate [1 mL/ Diameter at breast height (DBH)] {Ab R}	6.0±2.0
Ab 1.8% micro-emulsion double rate (2 mL/DBH) {Ab D}	5.0±3.5
Emamectin benzoate (Eb) 2.15% micro-emulsion recommended rate (1 mL/ DBH) {Eb R}	10.0±5.6
Eb micro-emulsion recommended rate (2 mL/DBH) {Eb D}	6.7±4.7
Acetamidrid;Eb (8+2)% dispersible concentrate recommended rate (1 mL/DBH) {AE 8+2}	5.3±3.1
Acetamidrid;Eb (10+6)% soluble concentrate recommended rate (1 mL/DBH) {AE 10+6}	4.3±2.5
Untreated control {Control}	8.0±2.6

분산분석하였으며 약제 처리목과 무처리구의 천공성 해충 발생량은 각 처리구별로 평균간 차이를 Tukey test로 분산분석하였다(SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011).

## 결 과

### 시험구역 내 소나무재선충 매개충(솔수염하늘소) 성충 밀도

시험구역 내 매개충 서식 여부 및 밀도를 알아보기 위하여 솔수염하늘소 페로몬 트랩을 이용하여 성충의 밀도를 3년간 조사한 결과 모든 처리구에서 솔수염하늘소의 분포가 확인되었는데 년 평균 트랩에 포획된 성충수는 4.3~10.0마리였으나 시험구간 밀도의 통계적 차이는 없었다(df=6,14, F=0.88, P=0.5353, Table 1).

### 산란 유도목 내 천공성 해충 종류 및 밀도

3년 동안 나무주사 처리구와 무처리구에서 산란이목을 이용하여 솔수염하늘소와 천공성 해충의 발생 유무와 밀도를 조사한 결과 수간주입 처리 약제별에 따라 천공성 해충의 발생 밀도에 차이가 있었으며 별채하여 임내에 존치한 산란유도목의 목질부 부후정도에도 차이를 보였다(Table 2, 3, 4, 5).

수간주입 당년인 2021년에 각 약제별 처리구에서 약제를 주입한 나무와 주입하지 않은 나무를 별채한 후 임내에 존치하여 천공성 해충의 밀도를 조사한 결과 아바멕틴 권장량 처리구의 경우 노랑애나무좀의 침입공 수만 무처리 나무에 비하여 통계적으로 유의하게 적었다(Table 3, df=1,8, F=25.17, F=0.001). 아바멕틴 배량 처리구에서는 솔수염하늘소 유충(df=1,8, F=8.32, F=0.0204)과 노랑애나무좀(df=1,8, F=81.24, F<0.0001)의 밀도가 약제 처리목에서 통계적으로 유의하게 적었다(Table 3).

에마멕틴벤조에이트 권장량 및 배량 처리 별채목에서는 솔수염하늘소나 노랑애나무좀, 왕바구미의 유충이나 침입공이 전혀 발견되지 않았는데(Table 3) 통계적으로는 솔수염하늘소(df=1,8, F=8.52, F=0.0193)와 노랑애나무좀(df=1,8, F=51.41, F<0.0001)의 밀도만 유의하게 차이를 보였다.

에마멕틴벤조에이트와 살충제 합제 처리구에서도 약제 처리목에서는 천공성 해충이 발견되지 않았는데(Table 3) 통계적 유의성은 두 합제 모두 노랑애나무좀(AE 8+2: df=1,8, F=36.38, F=0.0003, AE 10+6: df=1,8, F=254.26, F=<0.0001)의 밀도만 차이를 보였다.

나무주사 처리 별채목과 무처리 별채목에 대한 천공성 해충의 발생밀도는 에마멕틴벤조에이트 단제나 합제의 경우 천공성 해충의 발생이 없었으나 아바멕틴 처리의 경우 발생은 하였으나 반복간 편차로 인해 통계적 유의성은 없었다.
















각 약제 처리별 별채목의 표피 부분을 박피한 후 목질부의 부후 상태를 조사한 결과 수간주입 별채목의 경우 부후가 진행되지 않았지만 무처리구에서는 목재부가 검은색으로 부후가 많이 진행되어 곰팡이도 많이 피고, 천공성 해충의 침입도 많았다(Table 2).

나무주사 2년차인 2022년에 각 약제별 처리구에서 천공성 해충의 발생 밀도를 조사한 결과, 에마멕틴벤조에이트 정량 처리구와 배량 처리구 및 살충제와 에마멕틴벤조에이트 합제 처리구에서는 솔수염하늘소와 천공성해충이 발견되지 않았다(Table 4). 솔수염하늘소 유충 밀도는 에마멕틴벤조에이트 권장량(df=1,8, F=79.82, F<0.0001)이나 배량 처리구(df=1,8, F=11.77, F=0.009) 합제처리구(AE 8+2: df=1,8, F=7.52, F=0.0254, AE 10+6: df=1,8, F=65.56, F=<0.0001) 모두에서 무처리 산란 유인목에 비하여 통계적으로 유의한 차이를 보였으며 노랑애나무좀도 동일한 경향을 보였다(Table 4).

약제 처리구와 무처리구간 천공성 해충 발생 밀도는 조사된 천공성 해충 모두에서 통계적으로 유의한 차이를 보였는데 노랑애나무좀(df=6, 28, F=20.49, F<0.0001)과 왕바구미(df=6, 28, F=3.57, F=0.0094)의 경우 아바멕틴 처리구에서 높은 밀도를 보였고, 솔수염하늘소는 무처리구에서 밀도가 유의하게 높았는데(df=6, 28, F=14.9, F<0.0001) 에마멕틴벤조에이트 단제나 합제의 경우 천공성 해충이 발견되지 않았다(Table 4).

각 약제 처리별 별채목의 표피를 조사한 결과 아바멕틴 기준량 및 배량 처리구의 경우 1년차에는 부후가 되지 않은 반면,

**Table 2.** Annual changes in borer insect oviposition-inducing *Pinus thunbergii* trees according to trunk injection treatment

Treatment <sup>a)</sup>	Time to cut down tree treated with trunk injection		
	Same year	After 1 year	After 2 years
Ab			
Eb			
AE 8+2			
AE 10+6			
Control			

<sup>a)</sup>Abbreviation: Refer to Table 1.

**Table 3.** Comparison of borer insect density in oviposition-inducing trees with or without trunk injection treatment in *Pinus thunbergii* trees of the same year treated with trunk injection

Treatment <sup>a)</sup>	<i>M. alternatus</i> (Mean±SD/m <sup>3</sup> )		<i>C. fulvus</i> (Mean±SD/400cm <sup>2</sup> )		<i>S. gigas gigas</i> (Mean±SD/m <sup>3</sup> )	
	With injection	Without injection	With injection	Without injection	With injection	Without injection
Ab R	58.2±123.4aA <sup>b)</sup>	51.9±67.5a	1.0±1.2aA	44.2±19.2b	0±0aA	0±0a
Ab D	9.0±20.1aA	71.2±43.8b	1.4±2.2aA	43.6±10.2b	7.4±16.6aA	9.0±20.1a
Eb R	0±0aA	102.5±78.5b	0±0aA	33.6±10.5b	0±0aA	20.6±21.4a
Eb D	0±0aA	109.4±114.9b	0±0aA	39.6±10.0b	0±0aA	12.4±17.5a
AE 8+2	0±0aA	0±0a	0±0aA	29.4±10.9b	0±0aA	17.3±23.7a
AE 10+6	0±0aA	3.7±8.3a	0±0aA	38.6±5.4b	0±0aA	28.1±39.3a
Control	22.7±28.4A	-	30.6±11.1B	-	11.1±4.6A	-

<sup>a)</sup>Abbreviation: Refer to Table 1.

<sup>b)</sup>Statistically significant differences in means between tree injection-treated trees and untreated trees in the tree injection treatment group for each year are indicated in lowercase letters and statistically significant differences in average values between the tree injection treatment group and the non-treatment group for each year are indicated in capital letters (Tukey test,  $p < 0.05$ ).

**Table 4.** Comparison of borer insect density in oviposition-inducing trees with and without tree injection treatment in *Pinus thunbergii* trees 2 years after tree injection treatment

Treatment <sup>a)</sup>	<i>M. alternatus</i> (Mean±SD/m <sup>3</sup> )		<i>C. fulvus</i> (Mean±SD/400cm <sup>2</sup> )		<i>S. gigas gigas</i> (Mean±SD/m <sup>3</sup> )	
	With injection	Without injection	With injection	Without injection	With injection	Without injection
Ab R	164.0±136.2aB	161.2±80.6a	23.6±7.9aA	21.0±8.1a	84.6±97.5aA	41.0±38.3a
Ab D	142.8±79.2aB	128.3±34.0a	26.0±12.2aA	27.8±6.8a	16.0±15.1aAB	24.4±34.9a
Eb R	0±0aB	115.5±28.9b	0±0aB	28.8±9.2b	0±0aB	42.9±26.0b
Eb D	0±0aB	148.1±96.6b	0±0aB	22.8±7.5b	0±0aB	13.6±18.8a
AE 8+2	0±0aB	118.1±96.3b	0±0aB	24.4±7.5b	0±0aB	4.1±9.3a
AE 10+6	0±0aB	105.8±29.2b	0±0aB	25.4±7.3b	0±0aB	17.8±23.0a
Control	496.5±232.7A	-	3.6±5.4B	-	0±0aB	-

<sup>a)</sup>Abbreviation: Refer to Table 1.

<sup>b)</sup>Statistically significant differences in means between tree injection-treated trees and untreated trees in the tree injection treatment group for each year are indicated in lowercase letters and statistically significant differences in average values between the tree injection treatment group and the non-treatment group for each year are indicated in capital letters (Tukey test,  $p < 0.05$ ).

**Table 5.** Comparison of borer insect density in oviposition-inducing trees with and without tree injection treatment in *Pinus thunbergii* trees 3 years after tree injection treatment

Treatment <sup>a)</sup>	<i>M. alternatus</i> (Mean±SD/m <sup>3</sup> )		<i>C. fulvus</i> (Mean±SD/400cm <sup>2</sup> )		<i>S. gigas gigas</i> (Mean±SD/m <sup>3</sup> )	
	With injection	Without injection	With injection	Without injection	With injection	Without injection
Ab R	183.7±123.0aB	191.1±113.4a	20.6±10.4aA	23.8±7.7a	18.6±26.3aA	40.8±39.9a
Ab D	153.3±81.3aBC	293.9±158.7a	23.6±11.6aA	21.4±8.3a	14.9±24.2aA	34.2±54.1a
Eb R	0±0aC	383.3±193.8b	0±0aB	30.4±10.2b	0±0aA	0±0a
Eb D	0±0aC	218.4±142.0b	0±0aB	22.0±10.1b	0±0aA	0±0a
AE 8+2	0±0aC	176.1±120.2b	0±0aB	30.0±11.2b	0±0aA	18.6±41.5a
AE 10+6	0±0aC	321.7±192.7b	0±0aB	26.8±9.1b	0±0aA	20.3±31.2a
Control	568.2±170.4A	-	2.8±3.1B	-	0±0aA	-

<sup>a)</sup>Abbreviation: Refer to Table 1.

<sup>b)</sup>Statistically significant differences in means between tree injection-treated trees and untreated trees in the tree injection treatment group for each year are indicated in lowercase letters and statistically significant differences in average values between the tree injection treatment group and the non-treatment group for each year are indicated in capital letters (Tukey test,  $p < 0.05$ ).

2년차에는 부후가 많이 진행되었고, 천공성 해충의 침입도 많이 발견되었다(Table 2). 반면 에마멕틴벤조에이트 기준량과 배량 및 합제 처리구에서는 주간의 목질부가 부후되지 않고 건전한 상태를 유지하였다(Table 2).

나무주사 3년차인 2023년에 각 약제별 처리구에서 천공성 해충의 발생 밀도를 조사한 결과도 2년차와 유사한 경향을 보였다(Table 5). 아바멕틴 처리 산란 유인목에서는 무처리 산란 유인목과 천공성 해충의 발생 밀도에 차이를 보이지 않았으나 에마멕틴벤조에이트 단제나 혼합제 처리의 경우 천공성 해충이 발생하지 않아 무처리 산란 유인목에 비하여 통계적으로 유의하게 차이를 보였다(Table 5).

수간주입 약제 처리별에 따른 천공성 해충의 발생밀도는 솔수염하늘소와 노랑애나무좀 발생 밀도에 있어 통계적으로 유의한 차이를 보였는데 솔수염하늘소는 무처리구에서 밀도가 가장 높았고(df=6, 28, F=30.23, F<0.0001), 노랑애나무좀은 아바멕틴 처리구에서 밀도가 가장 높았다(df=6, 28, F=15.6, F<0.0001)(Table 5).

각 약제 처리별 벌채목의 표피를 조사한 결과 2년차와 동일하게 아바멕틴 기준량 및 배량 처리구에서는 부후가 진행된 반면 에마멕틴벤조에이트 기준량과 배량 및 합제 처리구에서는 주간의 목질부가 부후되지 않고 건전한 상태를 유지하였다(Table 2).

## 고찰

솔수염하늘소 성충의 임내 밀도는 수간주입 약제 처리구별로 차이가 없었지만 산란 유도목에서 솔수염하늘소 유충의 밀도는 수간주입 약제별에 따라 차이를 보였다. 에마멕틴벤조에이트 함유 나무주사 처리구에서는 3년 동안 산란 유도목에서 솔수염하늘소 유충은 발생하지 않았으나 아바멕틴 처리목에서는 나무주사 당년 벌채목에서도 유충이 발생하였는데 무처리에 비해서는 통계적으로 낮은 발생 밀도를 보였다(Table 4, 5). 또한 수피부 아래 목질부의 부후 진행도 수간주입 약제별에 따라 차이를 보여 아바멕틴 처리의 경우 수간주입 당년 벌채목에서는 부후가 진행되지 않았지만 수간주입 1년 경과 벌채목에서는 무처리와 유사하게 부후가 진행되었다(Table 2). 반면 에마멕틴벤조에이트 단제나 합제 처리목의 경우 수간주입 2년후 벌채목에서도 부후가 발견되지 않아 에마멕틴벤조에이트 수간주입은 2월까지 나무주사를 수행하면 벌채 된 나무에 3년동안 솔수염하늘소가 서식하지 않는 것으로 나타났다. 아바멕틴이나 에마멕틴벤조에이트는 *Streptomyces avermitilis*가 생산한 avermectin에서 추출한 작물보호제이다(Tomlin, 2009). 아바멕틴은 1985년부터 각종 원예 및 식량작물의 작물보호제로 사용되고 있는데(Cayrol et al., 1993) 소나무재선충에도 예방 효과가 있어(Takai et al.,

2000) 우리나라에서도 다양한 제품들이 등록되어 사용되고 있다(Lee et al., 2023b). 에마멕틴벤조에이트도 해충이나 선충 방제제로 이용되고 있는데(Lee et al., 2008; 2023c; Wang et al., 2020) 우리나라에서는 소나무재선충 예방나무주사제로 다양한 제품들이 등록되어 사용되고 있다(Lee et al., 2023a).

아바멕틴이나 에마멕틴벤조에이트 모두 소나무재선충에 대한 살선충 효과가 있어 소나무재선충병 예방 나무주사제로 사용되고 있지만 효과나 지속성은 제품이나 제형에 따라 차이를 보이는데 전반적으로 에마멕틴벤조에이트의 효과와 지속성이 우수한 편이다(Lee et al., 2023c). 산란유인목에 대한 천공성 해충의 발생은 에마멕틴벤조에이트 수간주입 처리목에서는 3년차까지 발생이 되지 않았으나 아바멕틴 처리구에서는 수간주입 당년부터 발생하였다. 아바멕틴이나 에마멕틴벤조에이트 모두 avermectin 계열의 작물보호제지만 솔수염하늘소를 비롯한 매개충 방제 효과는 차이를 보였다. 에마멕틴벤조에이트는 소나무재선충 뿐만 아니라 매개충에도 효과가 있는 것으로 알려져 있는데(Lee et al., 2022; Joo et al., 2023) 포르투갈에서는 수간주입 시 소나무재선충과 매개충 모두에 효과가 있는 것으로 보고되었다(Sousa et al., 2013). 중국에서는 용버들(*Salix matsudana*)에 발생하는 유리알락하늘소(*Anoplophora glabripennis*)에 대해 에마멕틴벤조에이트의 높은 수간주사 효과가 보고 되었고, 실내 실험 시 320 ppb에서 처리 2일차에 1령충에 대해 100% 치사율을 보여 매우 낮은 농도에서도 높은 살충율을 보였다(Wang et al., 2020). 따라서 에마멕틴벤조에이트의 하늘소류에 대한 저농도에서의 높은 치사율로 인해 산란유인을 위해 벌채 한 나무에 대해서도 수간주입 3년차까지 치사효과를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 에마멕틴벤조에이트 처리 벌채목에서는 아바멕틴 처리목과는 달리 수간주입 2년후까지 목질부의 부후가 나타나지 않아 나무주사를 하지 않은 무처리 벌채목에 비해 목재부가 깨끗한 상태로 유지되었다. 이는 수체 내 잔존하는 에마멕틴벤조에이트에 의해 소나무재선충이나 매개충 이외에도 부후균의 생장억제에도 관여 할 것으로 추정되지만 향후 부가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

에마멕틴벤조에이트 수간주입 처리가 솔수염하늘소를 비롯한 천공성 해충의 발생이 없는 것이 산란 기피 효과에 의한 것인지 유충이나 성충의 섭식에 의한 살충 효과에 의한 것인지 명확하지는 않지만 수간주입 처리목에서 산란을 위한 성충의 쓸기 행동(입으로 수피에 3 mm 정도의 상처를 냄) 흔적은 있지만 산란 된 알은 관찰되지 않아(Lee SM, Observation data) 산란 기피 효과가 있는 것으로 추정된다. 하지만 추후 천공성 해충들에 대한 산란효과나 유충이나 성충에 대한 섭식저해 또는 치사효과에 대한 부가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구결과는 기존의 연구에서 에마멕틴벤조에이트

단제나 혼합제가 권장량 처리에서 3년동안 소나무재선충에 대한 예방 효과를 가지며(Lee et al., 2024) 수간주입 2년차까지 낮은 침엽변색율이나 잔류량이 정량한계 미만으로 확인되는 시료도 2년 동안 관찰되지 않는 점(Lee et al., 2023c)과 같은 소나무재선충에 대한 살선충 효과뿐만 아니라 수간주입 벌채목에 대한 소나무재선충 매개충의 발생을 억제하는 효과도 확인되어 에마멕틴벤조에이트 처리가 아바멕틴 처리보다 소나무재선충병의 방제 효율을 증대시킬 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청의 ‘산림분야 재난·재해의 현안 해결형 연구개발 과제’ 중 ‘합제 단일 나무주사 방법에 의한 소나무재선충병 방제효과 평가’(Project No. “2021333A00-2123-CD02”)의 연구비 지원에 의해 이루어졌다.

## Author Information and Contributions

Sang Myeong Lee, and Young Hak Jung, SM Biovision Co., PhD. ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7346-9430>

DongWoon Lee, Kyungpook National University, Professor. ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9751-5390>.

Research design; Lee SM, Jung YH, Lee DW, Investigation; Lee SM, Jung YH, Data analysis; Lee DW, Writing - original draft preparation; Lee SM, Jung YH, Lee DW, Writing - review and editing; Lee SM, Jung YH, Lee DW.

## 이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

## Literature Cite

- Aikawa T, 2008. Transmission biology of in relation to its insect vector. pp.123-138. (eds. Zhao BG., Futai F., Sutherland JR., Takeuchi Y.), Spring. Tokyo, Japan.
- Cayrol J-C, Djian C, Frankowski J-P, 1993. Efficacy of abamectin B1 or the control of *Meloidogyne arenaria*. *Fundam. Appl. Nematol.* 16(3):239-246.
- Joo BH, Kim MS, Jung YH, Lee SM, 2023. Control of pine wilt disease and Japanese pine sawyer (*Monochamus alternatus* Hope) on Korean red pine (*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.) through tree injection of a new mixture insecticide. *Korean J. Pestic. Sci.* 27(3):179-186. (In

- Korean)
- Korea Forest Service (KFS), National Institute of Forest Science (NIFS), 2018. Tree mass, biomass and forest harvest table. Korea Forest Service, National Institute of Forest Science. Pp76~87. (In Korean)
- Kwon TS, Lim JH, Sim SJ, Kwon YD, Son SK, et al., 2006. Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. *J. Korean For. Soc.* 95:543-550. (In Korean)
- Lee BY, Jeong YJ, 1997. Korean tree pests. Seongandang Press. Seoul. Pp.122-124. (In Korean)
- Lee HW, Lee JW, Choi JH, Mwamula AO, Lee SM, et al., 2022. Insecticidal activity of trunk injection pesticide, acetamiprid and mixtures (emamectin benzoate and acetamiprid) on Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*. *Korean J. Pestic. Sci.* 26(4):338-342. (In Korean)
- Lee JW, Mwamula AO, Choi JH, Lee HW, Kim YS, et al., 2023a. Comparative bioactivity of emamectin benzoate formulations against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Plant Pathol. J.* 39(1):75-87.
- Lee JW, Mwamula AO, Choi JH, Lee HW, Kim YS, et al., 2023b. The potency of abamectin formulations against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Plant Pathol. J.* 39(3):290-302
- Lee SM, Jeong YH, Kim DS, Lee DW, 2023c. Efficacy and persistence of trunk injection nematicides against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* in pine tree, *Pinus densiflora*. *Korean J. Pestic. Sci.* 27(3):221-231. (In Korean)
- Lee SM, Jeong YH, Lee DW, 2024. Effectiveness and sustainability of nematicides used against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in the black pine (*Pinus thunbergii*) forest in Gonrido, Korea. *Korean J. Pestic. Sci.* 28(2):171-182. (In Korean)
- Lee SM, Jung YH, Seo S, Kim DS, Lee DW, 2021. Residual amounts of trunk-injected abamectin and emamectin benzoate and their control efficacy on pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* according to the injection time to Korean red pine (*Pinus densiflora*). *Korean J. Pestic. Sci.* 25(4):255-262. (In Korean)
- Lee SM, Jung YH, Seo S, Kim DS, Lee DW, 2021b. Comparison of nematicidal effect and residual amount by injection time and number of holes using emamectin benzoate via tree injection against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Korean J. Pestic. Sci.* 25(4):371-378. (In Korean)
- Lee SM, Kim DS, Kim CS, Choo HY, Lee DW, 2008. Possibility of simultaneous control of pine wilt disease and *Thecodiplosis japonensis* and or *Matsucoccus thunbergianae* on black pine (*Pinus thunbergii*) by abamectin and emamectin benzoate. *Korean J. Pestic. Sci.* 12(4):363-367. (In Korean)
- Lee SM, Kim DS, Lee SG, Park NC, Lee DW, 2009. Selection of trunk injection pesticides for preventive of pine wilt disease by *Bursaphelenchus xylophilus* on Japanese black pine (*Pinus thunbergii*). *Korean J. Pestic. Sci.* 13(4):267-274. (In Korean)
- Lee YK, Kim HJ, Choi NJ, Seo BY, Choi JY, 2023d. Comparison of



- Spodoptera frugiperda* control effects for corn according to the control thresholds and chemical spraying methods. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 25(3):142-150. (In Korean)
- National Institute of Forest Science (NIFOS), 2020. Research of proactive, customized control strategies and technology for pine wilt disease. Research Report 20-16. Seoul, Korea. (In Korean)
- SAS/STAT<sup>®</sup> 9.3 user's guide, 2011. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shin SC, 2008. Pine wilt disease in Korea. pp.26-32. (eds. Zhao BG., Futai F., Sutherland JR., Takeuchi Y.), Spring. Tokyo, Japan.
- Souse E, Naves P, Vieira M, 2013. Prevention of pine wilt disease induced by *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* by trunk injection of emamectin benzoate. Phytoparasitica. 41:143-148.
- Takai K, Soejima T, Suzuki T, Kawazu K, 2000. Emamectin benzoate as a candidate for a trunk-injection agent against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Pest Manag. Sci. 56(10):937-941.
- Tomlin CDS, 2009. The pesticides manual: A world compendium. British Crop Protection Council, Hampshire, U.K., 15th edn.
- Wang J-H, Che S-C, Qie L-F, Li G, Shao J-L, et al., 2020. Efficacy of emamectin benzoate trunk injection against Asian long-horned beetle [*Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae)]. J. Econ. Entomol. 113(1):340-347.

## 소나무재선충병 예방나무주사가 천공성 해충 발생에 미치는 영향

이상명<sup>1</sup> · 정영학<sup>1</sup> · 이동운<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>(주)에스엠바이오비전, <sup>2</sup>경북대학교 곤충생명과학과, <sup>3</sup>경북대학교 질병매개무척추동물연구소

**요약** 우리나라에서 소나무류에 가장 심각한 피해를 주고 있는 소나무재선충병을 예방하기 위한 방법으로 나무주사가 보편적으로 이용되고 있다. 본 연구는 소나무재선충에 대한 나무주사제인 아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트 단제 및 합제 처리가 소나무재선충의 매개충을 비롯한 천공성 해충의 발생에 미치는 영향을 조사하였다. 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소의 발생밀도에 차이가 없는 소나무재선충 자연발생지인 경남 통영의 곤리도 섬에서 나무주사 후 벌채한 산란이목에 서식하는 천공성 해충의 종과 밀도를 조사하였다. 아바멕틴을 나무주사한 산란이목에서는 나무주사 당년부터 2년후까지 매개충이 발생하였으나 에마멕틴벤조에이트 단제나 합제 처리구에서는 매개충이 발생하지 않았고, 나무좀이나 바구미의 발생도 없었다. 산란 유인목 목질부의 부후는 아바멕틴 나무주사 처리의 경우 나무주사 1년후부터 부후가 일어났으나 에마멕틴벤조에이트 처리는 나무주사 처리 2년후에도 부후가 일어나지 않았다. 에마멕틴벤조에이트 수간주사 후 고사된 소나무에서는 매개충의 발생이 없어 아바멕틴 처리보다 효율적으로 소나무재선충병 방제에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**색인어** 매개충, 산란유인, 솔수염하늘소, 아바멕틴, 에마멕틴벤조에이트