



아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트 수간주입 시기에 따른 잔류량과 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)에 대한 예방 효과

이상명¹ · 정영학¹ · 서상태² · 김동수³ · 이동운^{4*}¹주에스엠바이오비전, ²산림청 산림교육원, ³국립산림과학원 산림바이오소재연구소, ⁴경북대학교 생태과학과

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*)

Sang Myeong Lee¹, Young Hak Jung¹, Sang-Tae Seo², Dong Soo Kim³, DongWoon Lee^{4*}¹SM BioVision Co., Jinju, Gyeongnam 52849, Korea²Korea Forest Service, Forest Training Institute, Namyangjoo, Gyeonggi 12006, Korea³National Institute of Forest Science, Forest Biomaterials Research Center, Jinju, Gyeongnam 52849, Korea⁴Department of Ecological Science, Kyungpook National University, Sangju, Gyeongbuk 37224, Korea

(Received on September 17, 2021. Revised on September 29, 2021. Accepted on October 2, 2021)

Abstract Pine wood nematode (PWN), *Bursaphelenchus xylophilus*, was serious pine tree parasitic nematode in the world. Trunk injection is used as a preventive control method by injecting an agent into the trunk before the PWN becomes infected. This study was conducted in a pine forest to investigate the effect and residual amount of abamectin and emamectin benzoate, which are used as control agents for PWNs, according to the time of tree injection. There was a difference in the inhibitory effect of PWN infection according to the tree injection period. The tree mortality rate was low for abamectin from November to February and emamectin benzoate from October to April trunk injection treatment. The residual amount of the treated nematicides showed a difference according to the injection time. Abamectin showed the highest residual amount in March treatment, and emamectin benzoate showed the highest residual amount in December treatment. Considering the mortality rate of PWN infection and the residual amount, it is expected that trunk injections will be best done from November to February for abamectin and October to April for emamectin benzoate.

Key words Efficacy, Injection time, Pine wood nematode, Residue, Trunk injection

서 론

우리나라를 비롯하여 일본, 중국, 대만, 포르투갈, 스페인 등지에서 발생하고 있는 소나무재선충병은 소나무재선충이 소나무류에 시들음병을 유발시켜 최종적으로 감염된 나무를 고사시키는 중요한 산림 병해이다(Zhao et al., 2008; Abelleira et al., 2011). 우리나라에서 소나무재선충(*Bursaphelenchus*

xylophilus)은 1988년 최초로 발생이 보고된 이후 지속적으로 피해지역이 확산되고 있다(Shin, 2008). 2019년 소나무재선충병 피해주수는 406,362본으로 우리나라 산림 병해충들 중 가장 심각한 피해를 주고 있으며(Shin, 2008; Minister of Korea Forest Service, 2020) 세계적으로도 경제적 중요성이 높은 10대 식물기생선충으로 인식되고 있다(Jones et al., 2013).

소나무재선충 감염에 의한 소나무류 피해가 지속적으로 발생함에 따라 다양한 방제 방법을 사용하고 있는데 벌채 후 소각이나 파쇄, 매몰 및 훈증처리와 같은 감염원 감소를

*Corresponding author
E-mail: whitegrub@knu.ac.kr

위한 제거법이나 소나무재선충 매개충 방제를 위한 지상 및 항공살포와 같은 소나무재선충 확산 예방법, 소나무재선충에 대한 저항성 나무 육종이나 감염된 소나무재선충이 수체 내에서 증식이나 발육을 억제시키는 효과를 가진 물질을 주입하는 나무주사 같은 방법들이 이용되고 있다(Kamata, 2008). 이들 중 살선충제를 수간에 주입하는 나무주사의 경우, 강우나 환경적 요소에 영향을 거의 받지 않으며 소나무재선충에만 직접적으로 영향을 미치면서 비표적 생물이나 환경에 미치는 부정적인 영향이 적어 환경친화적 소나무재선충 관리방법으로 인식되어 널리 사용되고 있다(Kamata, 2008; Bi et al., 2015). 우리나라에서 나무주사와 관련된 연구는 대추나무 빗자루병 방제를 위해 oxytetracycline을 수간주입 효과를 검증한 이래(La et al., 1976), 주로 수목해충 방제를 위한 연구들이 수행되었는데 나무주사용 약제선택이나 주사약제의 잔류지속성과 관련된 연구들이 주를 이루고 있다(Lee et al., 2008, 2009a, 2009b; Kwon et al., 2021).

나무주사의 효과는 주입되는 약물의 종류와 화학적 특성, 그리고 제형의 종류 이외에도 대상 수종의 생리적 특성이나 날씨, 토양환경 등에 따라서도 영향을 받는다. 또한 주입 물질의 흡수와 분산은 수간 주입 방식뿐만 아니라 주입 시기, 수종, 나무 크기, 수관 상태 등과도 관련이 있다(Cha et al., 2020).

우리나라에서는 소나무재선충병 방제를 위하여 나무주사가 보편적으로 시행되고 있는데 소나무재선충 예방 나무주사 약제로 아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트, 밀버멕틴이 단체와 혼합제 형태로 등록되어 있다(Rural Development Administration, 2021). 한편 나무주사 시 약제를 주입하는 방법에는 천공부위에 주입병을 꽂거나 직접 약제를 주입하여 중력에 의해 약제가 이행되게 하는 중력식 방법과 가압식 주입병이나 외부의 압력을 이용하여 압력에 의해 약제가 강제 주입되게 하는 압력식 방법이 있다(Fig. 1). 중력식 방법은 현재 우리나라에서 가장 보편적으로 이용하는 나무주사법이나 소나무와 같이 송진 분비에 의해 약제의 주입에 방해 받을 수 있는 상황에서는 압력식 방법을 적용하기도



Fig. 1. Trunk injection method (left; direct injection, right; force injection using pressure).

한다. 이와 같이 나무주사의 처리방법이 매뉴얼화 되어 있지만(Korea Forest Service, 2020b) 처리 방법이나 시기와 같은 기초적인 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 현재 소나무재선충 예방나무주사 시기로 제시되어 있는 11월부터 3월까지뿐만 아니라 소나무재선충 매개충 나무주사 시기로 제시되고 있는 4월과 5월 나무주사에 따른(Korea Forest Service, 2020b) 소나무재선충 감염 예방 효과와 수체 내 잔류량을 비교하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

시험장소 및 시험약제

소나무재선충병 예방 나무주사 처리 시기별에 따른 예방 효과와 잔류량 조사를 위한 나무주사 처리 시험장소는 경남 진주의 산림바이오소재연구소의 월아시험림(N 35°12'54", E 128°10'15.8")에서 2017년과 2018년에 수행하였다. 나무주사 약제는 아바멕틴 1.8%유제와 에마멕틴벤조에이트 2.15%유제를 시중에서 구입하여 사용하였다.

나무주사 처리시기 및 방법

나무주사는 동절기(12월에서 2월)를 기준으로 가을과 봄철 처리 효과를 비교하기 위하여 월별로 구분하여 처리하였다. 동절기와 봄철 처리 효과 비교를 위한 나무주사는 2017년 2월 23일과 3월 24일, 4월 20일, 5월 17일 처리하였고, 가을철과 동절기 처리 효과 비교는 2017년 10월 29일과 11월 29일, 12월 29일 및 2018년 1월 29일 처리하였다.

월동기 전인 10월과 봄철인 5월에는 가압식과 중력식 수간 주입에 따른 소나무재선충에 대한 증식억제 효과와 약제 잔류량을 비교하였다.

나무주사는 선정 한 시험장소 내에서 소나무를 대상으로 각 개체목별로 흉고직경을 측정된 뒤 휴대용 전동드릴을 이용하여 지면에서 50 cm 이내의 주간에 직경 10 mm 드릴로 천공하였다. 중력식은 8~10 cm 깊이로 천공한 뒤 피펫으로 약제를 주입하여 수행하였고, 가압식은 직경 6.5 mm 드릴로 6~7 cm 깊이로 천공한 뒤 가압식 주입병을 꽂아 사용하였는데(Fig. 1A) 가압식 주입병은 압력에 의해 주입병 내 약액이 한 시간 이내에 수체로 주입되었다. 천공은 나무의 중심부를 비켜 15° 각도로 하였으며 두 약제 모두 흉고직경 1 cm 당 1 mL 약량으로 주입하였다. 시험대상목의 평균 흉고직경은 7.9 ± 0.8 cm였다. 중력식은 10주를 한 반복으로 3반복 처리하였으며 가압식은 5주를 한 반복으로 완전임의배치 3반복 처리하였다.

약효 조사

소나무재선충 접종 및 발병율 조사

시험에 이용한 소나무재선충은 산림바이오소재연구소에

서 소나무재선충병에 감염된 해송에서 깔때기법으로 직접 분리하여 사용하였는데 시험 하루 전에 시료에서 소나무재선충을 분리하여 당일 접종하였다.

소나무재선충 접종은 남부지방의 소나무재선충병 주 매개충인 솔수염하늘소의 우화시기를 고려하여(Kim et al., 2003) 2017년에는 6월 23일, 2018년에는 6월 28일에 접종하였다. 소나무 주간(1)의 가슴 높이에 전동드릴로 직경 7 mm, 깊이 3~4 cm 구멍을 뚫고, 탈지면을 넣은 후 소나무재선충 현탁액 3,000마리/0.5 mL를 탈지면에 접종하였다. 접종 후 소나무재선충 피해주 조사는 2017년에는 접종 100일 후에 하였고, 2018년에는 117일 후에 하였다. 피해주 조사는 엽의 변색이나 처짐 여부 및 고사 유무를 조사하였으며 증상이 나타난 소나무는 시험목에서 피해 가치를 채취하여 선충을 분리한 후 해부현미경 하에서 검경하여 소나무재선충병 감염 여부를 판별하였다. 선충의 증식이 확인 된 주수를 조사하여 피해주율을 구하였다.

소나무재선충 예방 효과 실내 검정

소나무재선충에 대한 나무주사 약제의 효과를 판정하는 방법에는 나무주사 후, 주사 한 나무의 수간이나 가지에 소나무재선충을 직접 접종하여 나무의 고사여부를 판정하는 방법과 나무주사 처리목의 가치를 절단하여 소나무재선충을 접종하는 대체 방법이 있다(Shin et al., 2015). 후자의 경우 효과가 없는 약제 처리로 인해 자연림 내의 고사목 발생으로 피해 확산의 우려나 감염목 제거를 위한 별도의 시간과 비용이 드는 것을 막을 수 있는 방법으로 활용되고 있어 본 연구에서도 두 가지 방법을 병용하여 적용하였다.

시험지 내에서 월별로 나무주사 한 처리목들 중 임의로 5주를 선정하여 방위와 관계없이 고절가위나 고절톱을 이용하여 가치를 절단하였다. 2017년에는 6월 23일 가치를 채취하였으며 2018년에는 6월 28일 채취하였는데 수간을 상부와 중부, 하부로 구분하여 한 가지씩을 채취하였다. 채취한 가지는 솔잎을 제거하고, 지퍼팩에 담아 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하였다. 절단한 가지 중 직경 1~2 cm 내외의 가치를 선정하여 25 cm 내외가 되도록 절단하였다. 절단면의 수분 손실을 막기 위하여 파라핀을 가열하여 녹인 다음 소나무 절단면을 파라핀 액에 2초간 넣은 후 도포 처리하였다. 처리 후 각 가지 토막의 가운데 부분에 전동드릴을 이용하여 직경 3 mm, 깊이 0.5 cm의 구멍을 뚫고, 탈지면을 넣은 다음 고사목에서 분리한 소나무재선충 현탁액 1,000마리/0.2 mL를 접종하였다. 접종 후 25°C 항온기에 원래 가지의 윗부분이 위로 향하도록 세워서 보관하였다. 30일 후 접종 부분을 중심으로 위쪽과 아래쪽 3-5 cm 부분을 자르고, 자른 부분의 무게를 측정할 다음 전정가위를 이용하여 잘게 자른 뒤 깔때기법으로 소나무재선충을 분리하였다. 하루가 지난 후 분리 된 소나무재선충은 해부현미경하에서 계수하

였다. 2017년에는 각 개체목별 수간 상부와 중부, 하부 가지에서 증식된 선충수를 평균하여 한 반복으로 하여 5반복으로 조사하였으며 2018년에는 접종 가능한 굵기의 가지가 충분하지 못하여 각 처리별로 10개의 가지에 접종하여 한 가지를 한 반복으로 10반복 처리하였다.

잔류 분석용 시료 채취

나무주사 처리 시기별 잔류량 분석을 위하여 소나무재선충 예방 효과 실내 검정에 사용한 가치를 이용하였는데 앞에서 기술한 바와 같이 소나무 수간을 상부와 중부, 하부로 구분하여 방향에 관계없이 무작위로 가치를 절단하였다. 절단한 가지에서 2-3년생 가치를 채취하고, 솔잎을 제거한 뒤 지퍼팩에 담아 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하였다. 한 주의 가치를 한 반복으로 5반복 수행하였다.

잔류 분석

검량선 작성은 아바멕틴 B1 표준품(B1a 95.6% + B1b 4.4%, Dr. Ehrenstorfer)과 에마멕틴벤조에이트 표준품(96.8%, Dr. Ehrenstorfer) 각각을 acetonitrile에 용해하여 1,000 mg/L의 stock solution을 만들었다. 이 stock solution을 acetonitrile로 희석하여 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 2.5 mg/L의 working standard solution을 만든 다음, 아래의 시료 분석과정을 거친 무처리(시험농약 잔류가 없는 시료) 용액 1 mL를 분취하여 질소 농축한 후 각각의 working standard solution 1 mL에 용해하여 matrix-matched 표준용액을 조제하였다. 그 후, 아바멕틴 표준용액 5 µL, 에마멕틴벤조에이트 표준용액 1 µL를 각각 LC-MS/MS(Agilent 6460 Triple Quad LC-MS/MS, Agilent, Santa Clara, USA)에 주입하여 나타난 chromatogram상의 peak 면적을 기준으로 검량선을 작성하였다.

시료분석은 균질화한 소나무 검체 5.0 g을 정확히 칭량하여 50 mL Falcon tube에 넣고, 3차 증류수 10 mL를 첨가하여 1시간동안 습윤화 하였다. 이후, acetonitrile 10 mL를 추가하여 400 rpm, 5분간 진탕 추출하고, QuEChERS extraction kit (EN15562_4.0 g Magnesium sulfate, 1.0 g Sodium chloride, 1.0 g Sodium citrate tribasic dehydrate, 0.5 g Sodium citrate dibasic sesquihydrate)에 첨가한 후 다시 1분간 강하게 진탕하였다. 이를 원심분리기를 이용하여 3,000 rpm에서 10분간 원심분리하고 상등액을 0.2 µm syringe filter로 여과하여 아바멕틴은 5 µL, 에마멕틴벤조에이트는 1 µL를 LC-MS/MS에 주입하여 나타난 chromatogram상의 peak 면적의 합을 측정하고, 검량선에 의해 함유 농도를 산출하였다.

회수율 실험

각각의 무처리 시료에 아바멕틴은 50 ppb, 250 ppb, 에마멕틴벤조에이트는 0.2 ppb, 2 ppb가 되게 표준용액을 정확

히 가하고, 균일하게 혼합하여 30분간 방치한 후 상기의 전 처리과정을 동일하게 수행하여 회수율을 구하였다.

통계분석

나무주사 시기별에 따른 고사주율 자료는 arcsin변환 값으로 처리평균간 차이를 Tukey test로 분산분석하였는데 결과값은 변환하기 전의 자료로 표기하였다. 소나무재선충 증식수와 잔류량 자료는 처리평균간 차이를 Duncan's multiple range test로 분산분석하였다(SAS Institute, 2010). 각각의 자료는 평균±표준편차로 표기하였다.

결과 및 고찰

나무주사 시기에 따른 소나무 고사율

아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트 나무주사 시기는 소나무재선충에 의한 소나무 고사율에 영향을 미쳤다(Table 1). 중력식 수간 주입의 경우 아바멕틴은 11월부터 1월 처리까지 고사되는 나무가 없었으며 4월과 5월처리에서는 통계적으로 유의하게 높은 고사주율을 보였다(df=9, 20, $F=12.89$, $P<0.0001$). 에마멕틴벤조에이트 처리의 경우 11월부터 2월 처리까지 고사되는 나무가 없었으며 10월과 3, 4월 처리 시에도 통계적으로 유의하게 낮은 고사주율을 보였다(df=9, 20, $F=25.94$, $P<0.0001$). 10월에는 중력식에 비하여 가압식의 방제효과가 높았고, 5월 처리에는 중력식 수간주입의 방제효과가 높았는데 통계적 차이는 없었다(Table 1).

전체적으로 10월부터 5월까지 나무주사 처리결과 11월부터 1월사이 처리에서는 두 수간주입 약제 모두 100% 소나무재선충 감염 예방 효과를 보였고, 에마멕틴벤조에이트의 경우 10월과, 3~4월 처리에서도 96.7%의 높은 방제효과를 보였다. 따라서 안정적인 소나무재선충 예방효과를 기대하기 위해서는 두 약제 모두 11월부터 2월 사이에 나무주사를

하는 것이 바람직할 것으로 생각되며 10월이나 3, 4월에 나무주사를 할 경우 에마멕틴벤조에이트를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

소나무재선충 예방 효과 실내 검증

월별 수간주입 처리 후 소나무재선충의 매개충 활동이 활발한 8월에 처리 한 나무의 가지를 절단하여 소나무재선충을 접종한 결과 소나무재선충 증식수는 처리 월별에 따라 차이는 없었다(Table 2). 억제율은 아바멕틴의 경우 2월에서 3월까지 99% 이상의 증식억제효과(방제가)를 보였으며 5월 처리에서도 중력식과 가압식 모두 90%이상의 방제가를 보였다(df=5, 24, $F=59.28$, $P<0.0001$). 에마멕틴 벤조에이트 처리의 경우 2월에서 4월 처리까지 93%이상의 방제가를 보였으며 5월 처리시는 80% 중반의 방제가를 보였으나 통계적 차이는 없었다(df=5, 24, $F=48.51$, $P<0.0001$).

두 살선충제를 10월부터 5월까지 수간주입 처리 후 가지에서 소나무재선충 증식 억제 활성은 10월과 5월의 에마멕틴벤조에이트 중력식 처리를 제외하고는 낮은 증식수를 보였다. 이는 이전 시험 결과에서 11월에서 1월까지 약제를 수간주입 하였을 때만 두 약제 모두에서 고사주가 발생되지 않았던 결과와는 다소 차이를 보이는 결과였다. 소나무재선충 매개충을 통한 소나무재선충의 전반은 매개충이 기주목에 후식 행동 시 이루어지는데 매개충은 기주의 신초 수피 부분을 섭식한다. 따라서 소나무재선충 매개충에 의한 소나무재선충의 1차적 감염 부위는 가지의 수피 부위로 이 가지를 절단하여 소나무재선충 접종 시 10월부터 5월까지 나무주사 시기와 관계없이 낮은 소나무재선충 증식수를 보였다는 것은 실제 임내에서 소나무재선충의 초기 감염을 억제할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이전 시험에서 소나무의 고사주가 발생하는 것은 소나무재선충을 가지에 접종하는 것이 아니고, 가슴높이의 수관 부위에 접종하는 것

Table 1. Mortality of pine trees according to the trunk injection period of abamectin and emamectin benzoate

Injection time	Injection method ^{a)}	Corrected tree mortality (%) ± SD	
		Abamectin	Emamectin benzoate
Oct.	Direct	13.3 ± 11.5bc ^{b)}	3.3 ± 5.8b
	Pressurized	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0b
Nov.	Direct	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0b
Dec.	Direct	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0b
Jan.	Direct	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0b
Feb.	Direct	6.7 ± 5.8bc	0.0 ± 0.0b
Mar.	Direct	13.3 ± 5.8bc	3.3 ± 5.8b
Apr.	Direct	16.7 ± 5.8ab	3.3 ± 5.8b
May	Direct	20.0 ± 10.0ab	50.0 ± 20.0a
	Pressurized	40.0 ± 0.0a	73.3 ± 11.5a

^{a)}Direct; direct injection of tested nematicides into trees, Pressurize; forced injection of pesticide using pressure.

^{b)}Means followed by same lowercase letters within the column are not significantly different (Tukey's studentized range test, $p<0.05$).

Table 2. Comparison of the number of nematodes propagated in the cut branches according to the injection period (February to May) in pine trees

Treatment	Injection time	Injection method ^{a)}	No. of PWNs/g wood			Control efficacy (%)
			Minimum	Maximum	Mean ± SD	
Abamectin	Feb.	Direct	0.18	3.92	1.42 ± 1.5b ^{b)}	99.5
Emamectin benzoate			4.21	38.22	16.54 ± 13.7b	93.8
Abamectin	Mar.	Direct	0.39	4.39	2.12 ± 1.9b	99.2
Emamectin benzoate			2.86	19.56	6.92 ± 7.1b	97.4
Abamectin	Apr.	Direct	0.22	19.45	6.51 ± 7.5b	97.6
Emamectin benzoate			4.11	22.89	12.29 ± 9.0b	95.4
Abamectin	May	Direct	1.27	24.6	11.12 ± 10.5b	95.8
Emamectin benzoate			22.71	60.51	41.60 ± 15.7b	84.4
Abamectin		Pressurized	7.27	53.67	24.84 ± 18.8b	90.7
Emamectin benzoate			8.62	69.96	36.00 ± 24.1b	86.5
Control	-	-	206.22	387.56	266.34 ± 71.3a	-

^{a)}Direct; direct injection of tested nematicides into trees, Pressurize; forced injection of pesticide using pressure.

^{b)}Means followed by same lowercase letters within the column are not significantly different (Duncan's multiple range test, $p < 0.05$).

Table 3. Comparison of the number of nematodes propagated in the cut branches according to the injection period (October to January) in pine trees

Treatment	Injection time	Injection method ^{a)}	No. of PWNs/g wood			Control efficacy (%)
			Minimum	Maximum	Mean ± SD	
Abamectin	Oct.	Pressurized	2.7	30.4	2.8 ± 4.4b ^{b)}	99.3
Emamectin benzoate			24.2	159.7	20.1 ± 27.0b	95.0
Abamectin		Direct	0.0	12.6	12.9 ± 11.6b	96.8
Emamectin benzoate			0.0	65.2	81.7 ± 53.8b	79.8
Abamectin	Nov.	Direct	14.5	81.7	36.9 ± 23.6b	90.9
Emamectin benzoate			1.3	44.3	13.7 ± 13.6b	96.6
Abamectin	Dec.	Direct	2.0	9.7	5.0 ± 3.2b	98.8
Emamectin benzoate			0.0	5.6	1.3 ± 1.8b	99.7
Abamectin	Jan.	Direct	0.1	18.1	7.0 ± 6.7b	98.3
Emamectin benzoate			0.0	63.0	13.2 ± 24.2b	96.7
Control	-	-	204.2	774.7	404.1 ± 206.5	-

^{a)}Direct; direct injection of tested nematicides into trees, Pressurize; forced injection of pesticide using pressure.

^{b)}Means followed by same lowercase letters within the column are not significantly different (Duncan's multiple range test, $p < 0.05$).

이어서 가지로부터 고사가 진전되어 전체 나무가 죽는 임내에서의 소나무재선충병 감염과는 차이가 있는 방법이다. 따라서 실제 자연림 내에 이들 살선충제를 수간주입 할 경우 본 시험의 결과보다 소나무재선충 감염에 의한 고사주율은 더 낮아 질 수 있을 것으로 생각되지만 이를 판단하기 위해서는 실제 임지 내에서 소나무재선충의 접종이 없이 자연 감염율을 조사하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

나무주사 시기별에 따른 살선충제 잔류량

처리시기별 소나무 수관부의 2-3년생 가지의 약제 잔류량을 조사한 결과 아바멕틴의 경우 나무주사 월별에 따라 잔

류량에 차이를 보였다($df=9, 40, F=5.35, P<0.0001$). 2월 처리의 잔류량이 5.06 mg/kg으로 가장 많았고, 2월 처리를 기준으로 처리 시기가 빨라지거나 늦어질수록 잔류량이 적은 경향을 보였다(Table 4). 10월과 5월 처리 모두 가압식 주입법이 증력식 주입보다 잔류량이 많았으나 통계적 차이는 없었다(Table 4). 에마멕틴벤조에이트의 경우 12월과 1월 처리의 잔류량이 통계적으로 유의하게 많았으며($df=9, 40, F=14.57, P<0.0001$) 이 시기를 기점으로 수간 주입 시기가 이르거나 늦어지면 잔류량이 줄어 들었다(Table 4). 특히 5월 처리의 경우 증력식과 가압식 모두 매우 낮은 잔류량을 보였고, 10월 처리의 경우도 가압식과 증력식 모두 매우 낮은

Table 4. Residual amount in branches according to injection timing of abamectin and emamectin benzoate in pine trees

Injection month	Injection time ^{a)}	Amount (??) ± SD	
		Abamectin	Emamectin benzoate
Oct.	Direct	0.291 ± 0.172c ^{b)}	0.122 ± 0.089bc
	Pressurized	0.346 ± 0.295c	0.184 ± 0.152bc
Nov.	Direct	0.095 ± 0.059c	0.294 ± 0.196b
Dec.	Direct	0.597 ± 0.430c	0.835 ± 0.159a
Jan.	Direct	1.452 ± 1.618bc	0.694 ± 0.300a
Feb.	Direct	5.060 ± 2.014a	0.072 ± 0.031bc
Mar.	Direct	3.054 ± 3.231b	0.266 ± 0.225b
Apr.	Direct	1.456 ± 1.876bc	0.222 ± 0.191bc
May	Direct	0.952 ± 0.633c	0.002 ± 0.003c
	Pressurized	1.163 ± 0.739bc	0.001 ± 0.002c

^{a)}Direct; direct injection of tested nematicides into trees, Pressurized; forced injection of pesticide using pressure.

^{b)}Means followed by same lowercase letters within the column are not significantly different (Duncan's multiple range test, $p < 0.05$).

잔류량을 나타내었다(Table 4). 잔류분석 시 아바멕틴의 회수율은 83.2~86.2%였고, 에마멕틴벤조에이트의 회수율은 82.0~87.5%였다.

전체적으로 아바멕틴 유제는 2월과 3월에 약제 잔류량이 4.278 mg/kg, 1.648 mg/kg으로 높게 검출되었고, 11월에 0.113 mg/kg으로 가장 적게 검출되었다. 반면 에마멕틴벤조에이트 유제는 12월과 1월에 약제 검출량이 0.767 mg/kg, 0.779 mg/kg으로 높게 나타났고, 11월과 3월에 0.350 mg/kg, 0.320 mg/kg으로 나타났으며, 5월 중력식과 가압식 처리에서 0.003 mg/kg, 0.001 mg/kg으로 가장 낮게 검출되었다. 또한 아바멕틴 유제의 경우 송지가 많이 분비되는 시기에도 약제 검출량이 높게 나타났으나 에마멕틴벤조에이트 유제의 경우 거의 검출되지 않았다.

5월에 소나무재선충병 피해주율이 아바멕틴 처리구보다 에마멕틴벤조에이트 처리구가 더 높았던 이유는 약제 잔류량이 에마멕틴벤조에이트 처리구에서 약제가 거의 검출되지 않는 반면 아바멕틴 처리구는 중력식, 가압식 처리구 모구 1 ppm 내외의 약제 잔류량이 검출되었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 5월에 약제를 처리한 시험목에서 약제 검출량이 적게 나타난 것은 나무주사시기와 시료 채취시기와의 관계에서 나무주사 후 경과 시기가 짧아 약제 이행이 충분히 이루어지지 않았기 때문으로 생각되지만 약제 이행 속도와 관련해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

나무주사 시기는 처리 약제의 잔류와 소나무재선충의 증식 및 소나무재선충 접촉 시 감염목의 비율에 모두 영향을 미쳤다. 아바멕틴의 경우 11월부터 2월처리까지 낮은 소나무재선충 감염주율을 보였으나 에마멕틴벤조에이트 처리의 경우 10월부터 4월까지 낮은 감염주율을 보였는데 잔류량은 감염주율과는 상이한 경향을 보였다. 즉 아바멕틴의 경우 1월-4월 처리에서 1.452-5.06 mg/kg으로 2월 이전에서

10월처리에 비하여 잔류량은 적었으나 고사주율은 1월 이전에서 10월처리가 낮게 나타났다. 반면 에마멕틴벤조에이트 처리의 경우 5월 처리에서만 높은 소나무재선충 감염주율을 나타내었는데 잔류량도 이 시기 처리에서 낮게 나타나 낮은 잔류량과 높은 재선충 감염주율을 보였다. 수간 주입 한 아바멕틴의 수체 내 이동은 2월에 곰솔에 처리 시 15일 후에도 수간 상부까지 이동 되는데 잔류량은 수간하부의 1.515 mg/kg의 18.8%인 0.285 mg/kg으로 낮았으며 처리 30일 후에도 수간 하부에 비해 상부의 잔류량이 10.9%만 검출되어 수간 내 이동은 수간 주입 15일 후에도 일어나지만 이동량은 차이가 있다(Lee et al., 2009a). 소나무와 같은 침엽수종은 무공재의 통도조직을 가지고 있어 물이 햇물관에 있는 벽공을 따라 사선으로 이동하기 때문에(Claney, 1986) 주입한 약제의 이동이 수체 내에서 불균일하게 나타날 수 있다. 그렇지만 11월이나 12월 나무주사에 비하여 5월에 아바멕틴의 잔류량이 많고, 이 시기의 가지 내 잔류량이 소나무재선충에 대한 아바멕틴의 IC_{95} 농도인 0.16 mg/kg(Takai et al., 2000)이상 임에도 불구하고, 소나무재선충 감염주율이 높은 부분에 관해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 에마멕틴벤조에이트의 소나무재선충에 대한 IC_{50} 농도는 0.011 mg/kg으로 알려져 있는데(Takai et al., 2000) 5월에 수간 주입 시 잔류량이 이 보다 낮아 소나무재선충 감염주율이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

나무주사 후 잔류기간에 대한 부가적인 연구가 수행되어야 하겠지만 잔류량이나 소나무재선충 접촉 시 고사주율 등을 고려할 때 에마멕틴벤조에이트의 경우 10월부터 4월까지 나무주사가 가능할 것으로 판단되며 아바멕틴의 경우 11월부터 2월까지가 안정적인 소나무재선충 예방효과를 보일 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2017년과 2018년 국립산림과학원의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

Author Information and Contributions

Sang Myeong Lee, Young Hak Jung, SM Biovision Co., PhD.

Sang-Tae Seo, Forest Training Institute, PhD.

Dong Soo Kim, Forest Biomaterials Research Center, PhD.

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

Research design; Lee SM, Jung YH, Seo ST, Kim DS, Investigation; Lee SM, Jung YH, Data analysis; Lee DW, Jung YH, Writing – original draft preparation; Lee DW, Writing – review and editing; Lee SM, Jung YH, Seo ST, Kim DS.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

- Abelleira A, Picoaga A, Mansilla JP, Aguin O., 2011. Dection of *Bursaphelenchus xylophilus*, causal agent of pine wilt disease on *Pinus pinaster* in Northwestern Spain. *Am. Phytopath. Soc.* 95(6):776.
- Bi Z, Gong Y, Huang X, Yu H, Bai L, et al., 2015. Efficacy of four nematicides against the reproduction and development of pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Nematol.* 47(2):126-132.
- Cha B., Han S., Kim KW., Kim DS., Lee D., 2020. Improving strategies for trunk injection considering tree anatomy and physiology. *Korean J. Pestic. Sci.* 24(2):218-230. (In Korean)
- Chaney WR., 1986. Anatomy and physiology related to chemical movement in trees. *J. Arboric.* 12(4):85-91.
- Jones JT, Haegeman A, Danchin EGJ, Gaur HS, Helder J, et al., 2013. Top 10 plant parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Mol. Plant. Pathol.* 14(9):946-961.
- Kamata N., 2008. Integrated pest management of pine wilt disease in Japan: tactics and strategies. Pp.304-322. In pine wilt disease. (eds. Zhao BG, Futai F., Sutherland JR., Takeuchi Y.), Spring. Tokyo, Japan.
- Kim DS, Lee SM, Chung YJ, Choi KS, Moon YS, et al., 2003. Emergence ecology of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), a vector of pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Korean J. Appl. Entomol.* 42(4):307-313. (In Korean)
- Korea Forest Service, 2020a. 2020 statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service, Daejeon, Korea (In Korean)
- Korea Forest Service, 2020b. Pine wood nematode control guidelines. Korea Forest Service, Daejeon, Korea. (https://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardList.do?bbsId=BBSMSTR_1069&mn=NKFS_06_09_01) (Accessed Sep. 14, 2021)(In Korean)
- Kwon OG, Jung YH, Lee SM, Kim DS, Cha BJ, et al., 2021. Comparison of proliferation inhibition effect of pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, and residual amount according to the different injection hole diameter performing trunk injection of emamectin benzoate in pine tree (*Pinus densiflora*). *Korean J. Pestic. Sci.* 25(2):157-165. (In Korean)
- La YJ, William MJB, Moon DS, 1976. Control of witches'-broom disease of jujube with oxytetracycline injection. *Korean J. Appl. Entomol.* 15(3):107-110.
- Lee SM, Kim DS, Kim CS, Cho KS, Choo HY, et al, 2009a. Persistence and distribution of trunk-injected abamectin in *Pinus thunbergia* and *Pinus koraiensis* tissues. *Korean J. Pestic. Sci.* 13(3):190-196. (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 thunbergia*) 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, 2009b. 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)
- Rural Development Administration, 2021. Pesticide safety information system. Rural Development Administration. Jeonju, Korea. <http://psis.rda.go.kr/psis/agc/res/agchmRegistStusLst.ps>. (Accessed Sep. 1, 2021)(In Korean)
- Shin SC., 2008. Pine wilt disease in Korea. pp.26-32. (In Korean) (eds. Zhao BG, Futai F., Sutherland JR., Takeuchi Y.), Spring. Tokyo, Japan.
- Shin WS, Jung YH, Lee SM, Lee CM, Lee CJ, et al., 2015. Development of effective screening method for efficacy test of trunk injection agents against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* in Japanese black pine, *Pinus thunbergii*. *Korean J. Pestic. Sci.* 19(4):440-449. (In Korean)
- 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.
- Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y., 2008. Pine wilt disease. Springer, Tokyo, Japan. Pp.2-4.

아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트 수간주입 시기에 따른 잔류량과 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)에 대한 예방 효과

이상명¹ · 정영학¹ · 서상태² · 김동수³ · 이동운^{4*}

¹㈜에스엠바이오비전, ²산림청 산림교육원, ³국립산림과학원 산림바이오소재연구소, ⁴경북대학교 생태과학과

요 약 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 전 세계적으로 소나무류에 가장 큰 피해를 주는 식물기생선충이다. 나무주사는 소나무재선충이 감염되기 전에 수간에 약제를 주입하는 방법으로 예방적 방제법으로 사용되고 있다. 본 연구는 소나무재선충 방제제로 사용되고 있는 아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트의 나무주사 시기에 따른 효과와 잔류량 차이를 알아보기 위하여 소나무림에서 시험을 수행하였다. 나무주사 시기별에 따라 소나무재선충 감염 억제 효과에 차이를 보였다. 아바멕틴은 11월에서 2월, 에마멕틴벤조에이트는 10월에서 4월 처리까지 낮은 고사주율을 보였다. 처리 한 약제의 잔류량은 주사시기에 따라 차이를 보였다. 아바멕틴은 3월 처리 시 가장 많은 잔류량을 보였으며 에마멕틴벤조에이트는 12월 처리에서 가장 많은 잔류량을 보였다. 소나무재선충 감염 고사주율이나 약제의 잔류량을 고려할 때 아바멕틴은 11월에서 2월, 에마멕틴벤조에이트는 10월에서 4월까지 나무주사가 가능할 것으로 판단된다.

색인어 나무주사, 소나무재선충, 잔류, 처리시기, 효과