



ORIGINAL ARTICLES

소나무에서 나무주사를 통한 신규 합제 살충제의
소나무재선충병과 솔수염하늘소 방제주병훈 · 김명상 · 정영학¹ · 이상명^{1*}한성나무병원, ¹주에스엠바이오비전Control 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 InsecticideByung-Hoon Joo, Myung-Sang Kim, Young Hak Jung¹, Sang Myeong Lee^{1*}

HanSeong Tree Care Ltd., Seoul, Korea

¹SM Biovision Co., Jinju, Korea

(Received on July 7, 2023. Revised on August 14, 2023. Accepted on August 21, 2023)

Abstract Pine wilt disease (PWD) is caused by the pine wood nematode (PWN). PWN invades and proliferates in pine trees, quickly withering the tree. Two *Monochamus* species, *M. alternatus*, and *M. saltuarius* serve as vectors. Tree injection is known to be the most effective and safe for the environment among several methods for controlling PWD and insect vectors. We investigated the control effectiveness of dinotefuran+emamectin benzoate mixture pesticide against PWD and *M. alternatus* by tree injection. PWD was controlled for about two years in the mixture pesticide injected group, and the number of PWN isolated from the wood chips was significantly smaller than that of the untreated group. The control effect on *M. alternatus* was slower than that of thiamethoxam but showed more than 90% control effect compared to the untreated control. Dinotefuran residue was detected in only one sample out of three samples about two years after tree injection. Emamectin benzoate was detected in all samples and the average residual amount was 0.068 µg/kg.

Key words Pine wilt disease, *Bursaphelenchus xylophilus*, *Monochamus alternatus*, Tree injection

서 론

소나무재선충병(Pine wilt disease, PWD)은 소나무재선충(Pine wood nematode, PWN; *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Bührer) Nickle)이 소나무류 수목 내로 침입한 후 증식하면서 빠르게 나무를 고사시키는 병이다(Kobayashi et al., 1984; Myers, 1988). 소나무재선충의 원산지로는 알려져 있는 북미에서는 소나무재선충병이 문제되지 않지만(Knowles et al., 1983; Dwinell LD, Nickle WR, 1989; Sutherland JR et al., 1991), 일본(Kobayashi et al., 1984),

중국(Cheng et al., 1983, Xu et al., 2023), 한국(Enda, 1989; Yi et al., 1989)을 비롯하여 포르투갈, 스페인 등의 유럽(Mota et al., 1999; Abelleira et al., 2011)으로 소나무재선충이 침입하면서 소나무재선충병은 세계적인 산림검역병이 되었다. 국내에서는 1988년 부산 금정산의 소나무(*Pinus densiflora*)와 해송(*P. thunbergia*) 고사목이 소나무재선충 감염에 의한 피해인 것으로 처음 확인되었다(Enda, 1989; Yi et al., 1989; Shin, 2008). 우리나라에서 소나무재선충병에 의한 피해 면적으로는 1988년 272 ha에서 2013년 11,550 ha로 증가하였다(KFS, 2022). 고사목 본수로 피해가 집계된 자료에 따르면, 2013년 2,183 천본, 2014년 1,736 천본, 2015년 1,373 천본이 고사한 것으로 조사되었고, 이후 지속

*Corresponding author
E-mail: lsm1918@hanmail.net

적으로 감소하고는 있으나 2021년도에도 전국 모든 시도에서 378 천본의 고사목이 발생한 것으로 집계되었다(KFS, 2022).

소나무재선충은 전세계에서 총 28종의 소나무속(*Pinus* spp.) 수종이 기주로 보고된 것처럼 소나무속 수종에 가장 큰 피해를 주고 있다(Mamiya, 1983; EPPO, 2023). 국내에서는 소나무와 해송에서 처음 감염이 확인된 이후 2006년 경기도 광주, 2007년 강원도 춘천시와 원주시의 잣나무(*P. koraiensis*) 고사목에서도 소나무재선충 감염이 확인되어(Shin, 2007) 총 3종의 소나무속 수종이 소나무재선충병 피해를 받고 있다. 아직 국내에서 공식적으로 소나무재선충 감염에 의한 고사가 확인된 적은 없으나 잣나무 임지 인근의 일본잎갈나무(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière) 고사목에서 소나무재선충을 매개할 수 있는 하늘소가 발견되었고(NIFOS, 2016), 해외에서는 잎갈나무속(*Larix* spp.)을 비롯하여 전나무속(*Abies* spp.), 가문비나무속(*Picea* spp.) 등의 수목도 소나무재선충병에 피해를 받는 것으로 알려져 있어(Mamiya, 1983; Kobayashi et al., 1984) 향후 국내에서도 소나무속이 아닌 다른 수종에서 피해가 발생할 가능성도 제기되고 있다.

소나무재선충은 감염목에서 비감염목으로 스스로 이동할 수 없고, 반드시 매개충을 통해 전염되는 것으로 알려져 있다(Linit, 1988; Myers, 1988; Dwinell and Nickle, 1989; Lee, 2006; NIFOS, 2009). 지금까지 전세계에서 소나무재선충을 옮기는 매개충으로는 13종의 *Monochamus*속 하늘소류가 보고되어 있으며(Linit, 1988; Kishi, 1995; Sousa et al., 2001; EPPO, 2023), 국내에서는 주로 솔수염하늘소(*M. alternatus* Hope)가 소나무와 해송에서(Enda, 1989; Yi et al., 1989; Kishi, 1995), 북방수염하늘소(*M. saltuarius* Gebler)가 잣나무에서 소나무재선충을 매개하는 것으로 밝혀졌다(Shin, 2007).

우리나라에서는 기주 식물인 소나무류와 병원체인 소나무재선충, 그리고 소나무재선충을 이동시키는 매개충인 하늘소류 사이의 소나무재선충병 전파와 감염의 순환고리를 끊기 위해 2005년 『소나무재선충병 방제특별법』을 제정하여 고사목에 대한 훈증, 소각, 파쇄, 감염우려목에 대한 소구역/소군락 모두베기 및 소나무류 이동제한, 매개충 방제를 위한 항공/지상 약제 살포, 소나무재선충 증식 억제 및 매개충 방제를 위한 나무주사 등의 방제 방법을 적용해 관리하고 있다(Lee, 2003; Lee 2006; Shin 2008). 이중 나무주사 방법은 항공방제에 비해 단시간에 넓은 면적을 방제하기는 어렵지만, 소나무재선충병 방제 효과가 높고 약제의 외부 환경으로의 유출 가능성이 낮아 최근 5년간 산림청의 소나무재선충병 방제 관련 전체 예산 중 매년 9.7~17.9% 예산이 예방나무주사 예산으로 사용되고 있다(KFS, 2023).

소나무재선충병 방제를 위한 나무주사 약제로는 에마멕틴

벤조에이트와 아바멕틴 성분이 가장 효과적이며, 이들 약제의 수목내 잔류량이 방제효과와 밀접한 관련성이 있는 것으로 알려져 있다(Takai et al., 2000; James et al., 2006; Lee et al., 2009; Lee et al., 2021). 특히 Takai et al. (2004)는 소나무재선충의 증식을 95% 억제하는 에마멕틴벤조에이트의 잔류량(IC₉₅)을 0.031 µg/g이라 하였고, 약제를 1회 나무주사 후 수목내에 IC₉₅ 이상의 잔류량이 유지되는 경우 3년간 소나무재선충병을 방제할 수 있다고 하였다. 한편, 최근에는 나무주사를 통해 소나무재선충을 옮기는 매개충 방제에 관한 연구도 이루어지고 있는데, Lee et al. (2020)은 에마멕틴벤조에이트 또는 아바멕틴을 나무주사한 소나무 가지를 솔수염하늘소와 북방수염하늘소에 먹이로 주면서 사육한 시험에서 이들 두 성분이 하늘소의 수명을 단축시키는 효과가 있다고 하였으며, Kwon (2023)은 네오니코티노이드 계열의 살충제를 나무주사 한 가지에 솔수염하늘소를 접종하는 시험을 통해 성분에 따라 나무주사가 매개충 방제에도 효과적인 방법이 될 수 있다고 하였다. 이러한 연구들의 성과로 국내에는 에마멕틴벤조에이트와 아바멕틴 단체가 소나무재선충병 방제용 나무주사 약제로, 티아메톡삼 단체가 매개충 방제용 나무주사 약제로, 에마멕틴벤조에이트 또는 아바멕틴에 설펍사플로르 또는 아세타미프리를 조합한 합제가 소나무재선충병 및 매개충 방제가 동시에 가능한 나무주사 약제로 등록이 되었다(RDA, 2023).

이에 본 연구에서는 에마멕틴벤조에이트에 디노테퓨란을 조합한 새로운 합제를 소나무에 나무주사하여 솔수염하늘소에 대한 방제효과와 소나무재선충병에 대한 예방효과를 2년간 조사하였다. 또한 새로운 합제를 나무주사한 소나무에서 Takai et al. (2004)이 제시한 소나무재선충 95% 증식억제 농도가 지속되는지 확인하고자 시기별 약제 잔류량 조사를 수행하였다.

재료 및 방법

소나무재선충병 및 솔수염하늘소 방제효과를 확인하기 위한 신규 합제로는 (주)그린시티에서 제조한 디노테퓨란·에마멕틴벤조에이트 19.5 (15+4.5)% 분산성액제를 흉고직경 cm 당 0.5 ml 기준으로 나무주사하였다. 신규 합제와의 비교를 위해 소나무재선충병 방제 시험에는 아바멕틴 1.8% 유제를 시중 농약판매장에서 구매하여 사용하였고, 솔수염하늘소 방제 시험에는 티아메톡삼 15% 분산성액제를 제조사에서 제공받아 등록기준에 따라 나무주사하였다. 시험에 사용한 수목은 경남 진주시 정촌면 관봉리에서 조경용으로 관리중인 소나무 중 수고 5~7 m, 흉고직경 15 cm 전후의 건전목을 이용하였고, 본 시험 이전 및 시험 기간 중 시험 처리구에 다른 약제의 처리는 없었다.

소나무재선충병 방제효과

시험 약제의 소나무재선충병 방제효과는 소나무에 소나무재선충을 접종한 후 수목의 고사 유무 및 소나무재선충 수를 조사하는 방식으로 평가하였다. 시험은 각 처리구별로 반복당 10주씩 3반복 수행하였고, 「소나무재선충병 방제지침」의 약제처리 시기 기준과 방법에 따라 2021년 1월 29일에 약제를 처리하였다. 약제 처리는 휴대용 전동드릴(DeWALT DCD791, 18 V/5.0 Ah BL G2, Black & Decker Asia Pacific PTE LTD, Singapore)과 직경 7 mm 드릴축을 이용하여 천공하고, 피펫(Pipetman, Gilson, France)으로 약제를 주입하였다. 약제를 주입한 구멍은 별도 마감처리 하지 않았다. 소나무재선충 접종은 Kim et al. (2003)의 솔수염하늘소 50% 우화일을 참고하여 2021년 6월 3일에 수행하였다. 소나무재선충 접종을 위한 구멍은 전동드릴과 직경 7 mm 드릴축을 이용하여 수고 1.5 m 높이의 수간에 수피를 제외한 3~4 cm 깊이로 천공하였다. 천공 후 탈지솜을 넣고 접종 하루 전 소나무재선충병 감염 고사목에서 깔때기법으로 분리한 소나무재선충 현탁액(5,000 마리/0.5 ml)을 주입하고 건조를 막기 위해 주방용 비닐랩으로 구멍이 있는 수간 둘레를 감쌌다. 소나무재선충 접종 후 약 6개월 후인 2021년 11월 24일에 처리구별로 소나무 침엽의 처짐 및 변색 증상을 통해 고사 여부를 조사하였다.

나무주사 후 2년차 방제효과 시험은 추가 약제 처리 없이 1년차 약제 처리구에서 고사한 나무를 제외한 시험대상목(합제 처리구 30주, 아바멕틴 처리구 29주)과 새로 지정한 무처리구 30주(반복당 10주씩 3반복)를 대상으로 2021년과 동일한 방식으로 2022년 6월 7일에 소나무재선충을 접종하였고 11월 10일에 고사 여부를 조사하였다. 이후 시험 수목 전체를 대상으로 소나무재선충의 증식밀도 조사를 위해 소나무재선충 접종부로부터 상하로 15 cm 위치의 네 방위에서 목편시료채취기(FJ Tech, Korea)를 이용하여 목편 시료를 채취하였다. 목편 시료는 수피를 제외한 5 cm 깊이 내 변재부에서 주당 50 g 이상을 채취하여 골고루 혼합한 후 주당 10 g을 계량하고, 반복별 10주의 목편 시료를 합쳐 총 100 g을 준비한 후 깔때기법으로 소나무재선충을 분리하여 해부현미경(Olympus SZ-ST, Japan)하에서 소나무재선충 생충수를 조사하였다.

솔수염하늘소 방제효과

시험은 소나무 한 주를 한 반복으로 하여 처리구당 3반복으로, 2021년과 2022년에 각각 독립적으로 진행하였다. 2021년에는 1월 29일에 나무주사 후 6월 4일에, 2022년에는 2월 15일에 나무주사 후 6월 10일에 시험하였다. 아크릴케이지(35 × 35 × 35 cm)에 각 처리구별 소나무에서 1~3년생 가지를 절단하고 잎을 제거한 후 먹이로 넣어 주었다. 이후 아크릴케이지당 30 마리의 솔수염하늘소를 방사하여 소

나무 가지를 섭식하도록 하면서 3일, 7일차에 생사충수를 조사하였다. 시험에 사용한 솔수염하늘소는 (주)에스엠바이오 비전의 사육실 우화상에 적치한 소나무 고사목에서 누대 사육해온 것으로 4월부터 시험전까지 우화한 성충을 Insect breeding dish (100 D × 40 H mm, SPL, Korea)에 넣어 소나무 신초를 먹이로 공급하면서 개체 사육하였다.

합제 나무주사 처리구에서 잔류량 조사

나무주사 대상목에서 잔류분석을 위해 필요한 시료량은 500 g 정도로 시험목 1주에서 4회에 걸쳐 절취할 경우 심각한 생육 저하를 초래할 수 있다고 판단되어 합제 나무주사 처리구의 각 반복별 10주 중 무작위로 선정한 5주에서 절취한 가지를 모아 하나의 시료로 준비하였다(5주씩 3반복). 잔류 분석용 가지는 수간 상, 중 부위의 동서남북 네 방위에서 고절가위를 이용하여 절취하고, 전정가위를 이용하여 2~3년생 가지 부분만을 모아 지퍼백에 넣어 분석기관으로 보내 잔류분석을 의뢰하였다. 나무주사 당해 년도인 2021년 4월 29일과 10월 1일, 그리고 나무주사 후 2년차인 2022년 6월 14일과 11월 10일에 가지를 절취하여 잔류 분석하였다.

디노테푸란과 에마멕틴벤조에이트 성분의 검량선 작성을 위해 각각 디노테푸란 표준품(purity : 98.8%) 20.2 mg과 에마멕틴벤조에이트 표준품(purity : 98.3%) 20.4 mg을 정밀히 달아 20 mL volumetric flask에 담고 acetonitrile을 표선까지 채워 1,000 µg/mL의 표준원액을 조제하였다. 이렇게 조제한 각각의 표준원액을 acetonitrile로 희석하고 혼합하여 디노테푸란과 에마멕틴벤조에이트 1.0 µg/mL의 혼합 표준용액을 조제하였다. 이 표준용액 0.3 mL를 분취 후 질소 농축하고 무처리 소나무 가지에서 추출한 시료 3 mL로 재용해 및 희석하여 0.0025, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05 및 0.1 µg/mL의 matrix match 표준용액을 조제하였다. 조제한 matrix match 표준용액을 1 mL 분취하여 MgSO₄ 150 mg, PSA 25 mg에 넣고 30초 동안 vortex로 진탕하고 5분간 10,000 rpm에서 원심분리하였다. 원심분리한 상등액을 0.2 µm PTFE 주사기로 여과하여 1 µL씩 LC-MS/MS에 주입하여 크로마토그램상에 나타난 피크 면적으로 검량선을 작성하였다.

소나무 가지에서 디노테푸란 잔류량 분석을 위해 잘게 자른 가지와 드라이아이스를 믹서기에 넣고 마쇄한 시료 5 g (5 g ± 0.1 g)를 acetonitrile 10 mL과 ceramic homogenizers를 VIBA 330 진탕기에 함께 넣고 2분 간 진탕하였다. 이후, 진탕기에 Na-citrate sesquihydrate 0.5 g, Na-citrate 1.0 g, NaCl 1.0 g, MgSO₄ 4.0 g을 첨가하여 2분간 강하게 진탕 추출하였다. 진탕 추출한 시료를 3,500 rpm에서 5분간 원심분리한 상등액 1 mL를 분취하여 MgSO₄ 150 mg, PSA 25 mg에 첨가하여 10,000 rpm에서 5분 간 원심분리하였다. 원심분리 한 상등액을 0.2 µm PTFE syringe filter 로 정제 후 1 µL씩 LC-MS/MS에 주입하여 chromatogram 상에 나타난

peak 면적을 기준으로 표준검량선과 비교하여 잔류량을 산출하였다. 에마멕틴벤조에이트의 잔류분석은 디노테퓨란의 분석절차와 동일하게 수행하였다.

통계분석

처리구간 소나무재선충병 및 솔수염하늘소 방제효과를 평가하기 위하여 일원분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였고, 처리구간 차이가 인정되는 경우 Duncan 다중검정($p < 0.05$)을 실시하였다(SAS/STAT@9.3 user's guide, 2011). 비율(percentage, %)로 조사된 소나무 고사율 및 솔수염하늘소 생충률 자료는 square root arcsin 변환 후 검정을 시행하였다(Fernandez, 1992).

결과 및 고찰

소나무재선충병 방제효과

디노테퓨란·에마멕틴벤조에이트 합제와 아바멕틴 단제 나무주사는 무처리구에 비해 통계적으로 유의하게 낮은 고사율을 보여 나무주사 후 2년차까지 각각 90.9% 및 81.8%의 방제가를 보였다(2021; $df=2,6$, $F=56.92$, $P=0.0001$, 2022; $df=2,6$, $F=36.93$, $P=0.0004$)(Table 1). 목편시료 g당 평균 소나무재선충 생충수는 디노테퓨란·에마멕틴벤조에이트 합제 처리구에서 0.3 마리, 아바멕틴 단제 처리구에서 0.6 마리가 분리되었으나 무처리구는 73.9 마리가 검출되어 통계적 차이를 보였다($df=2,6$, $F=114.49$, $P<0.001$)(Table 2). Takai et al. (2000)은 소나무재선충병 방제 약제 선발을 위한 일련의 시험을 통해 에마멕틴벤조에이트가 가장 강력한 후보 약제라 보고하였고, 후속 연구에서 수목의 수고와 흉고직경을

통해 추정한 입목재적(volume, m^3)당 에마멕틴벤조에이트 10 g을 나무주사하고 소나무재선충을 매년 반복해서 접종한 경우 3년간 90% 이상의 수목이 생존하였다고 보고하였다(Takai et al., 2003). 국내의 연구에서도 곰솔(Lee et al., 2009)과 소나무(NIFOS, 2020)에 에마멕틴벤조에이트 2.15% 유제를 나무주사 하여 2년간 소나무재선충병 예방이 가능함을 보여주었고, 에마멕틴벤조에이트의 함량이 6%인 단제와 합제를 이용한 경우 소나무에서 4년간 방제효과가 지속된다고 보고하였는데(NIFOS, 2021), 이러한 방제효과의 지속기간은 유효성분의 함량과 사용량에 따라 좌우될 것으로 사료된다. Takai et al. (2003)의 연구에서 사용한 에마멕틴벤조에이트 약제(40 g/L)와 시험수목의 정확한 정보는 알 수 없으나 대략 4%의 액상 제형을 흉고직경 cm당 1.1~3.5 ml 나무주사한 것으로 추정된다. 이는 에마멕틴벤조에이트 2.15% 유제의 국내 사용기준에 비해 2~6.5배 많은 양을 주입한 것으로, 연구에서는 3년차까지 조사만 이루어졌으나 4년 이상의 방제가 가능할 것으로 예상된다(Table 3). 또한 Kwon et al. (2021)은 2.15%와 9.7% 함량의 에마멕틴벤조에이트 약제를 흉고직경 cm당 각각 1.0 ml, 0.3 ml씩 나무주사하고 29개월 후에 소나무 내에서 증식하는 소나무재선충의 밀도를 조사하였을 때 무처리구 대비 유의하게 낮았다고 보고하였다. 이에 따라 에마멕틴벤조에이트 9.7% 약제의 흉고직경당 사용량을 1.0 ml로 증가시키더라도 약해가 발생하지 않는다면 29개월 이상의 방제 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 동일하게, 본 연구에 사용한 신규 합제는 소나무재선충병 방제에 가장 대표적으로 사용하고 있는 에마멕틴벤조에이트 2.15% 유제에 비해 성분의 함량은 약 2배이지만 사용량은 절반이므로(Table 3) 사용량을 두 배로 늘리면

Table 1. Percentage of tree death (mean \pm SD) by pine wilt disease after inoculation of PWN in June 2021 and 2022

Treatment	2021		2022	
	Tree death (%)	CE (%) ^{a)}	Tree death (%)	CE (%)
Dinotefuran+emamectin benzoate	0 \pm 0b ^{b)}	100.0	6.7 \pm 5.8b	90.9
Abamectin	3.3 \pm 5.8b	96.2	13.3 \pm 5.8b	81.9
Untreated control	86.7 \pm 5.8a		73.3 \pm 5.8a	

^{a)} Control efficacy (%) = (%tree death of untreated control - %tree death of pesticide treatment) / %tree death of untreated control * 100

^{b)} Duncan's multiple range test (DMRT). Same letters within the column are not significantly different ($P < 0.05$).

Table 2. Number of PWN (mean \pm SD) isolated from test trees

Treatment ^{a)}	Mean no. of PWD/g wood	CE(%) ^{b)}
Dinotefuran+emamectin benzoate	0.3 \pm 0.3b ^{c)}	99.5
Abamectin	0.6 \pm 0.5b	99.2
Untreated control	73.9 \pm 11.9a	-

^{a)} Pesticide treatments and untreated control was inoculated twice (2021, 2022) and once (2022) for the PWD, respectively.

^{b)} Control efficacy (%) = (mean no. of PWD of untreated control - mean no. of PWD of pesticide treatment) / mean no. PWD of untreated control * 100

^{c)} Duncan's multiple range test (DMRT). Same letters within the column are not significantly different ($P < 0.05$).

Table 3. Relative dose of abamectin or emamectin benzoate among insecticides for controlling PWD

Pesticide	Formulation type	Content (%) of AB ^{a)} or EB ^{b)}	Dose (ml/cmDBH)	Relative dose (%) ^{c)}
AB	EC, DC, ME	1.8	1	-
AB+acetamiprid	ME	1.6	1	88.9
AB+sulfoxfloor	DC	1.8	1	100
EB	EC, ME	2.15	1	-
EB	SL	2	1	93.0
EB	AL	9.7	0.3	135.3
EB+acetamiprid	SL	6	1	279.1
EB+dinotefuran ^{d)}	DC	4.5	0.5	104.7
EB ^{e)}		4	1.1~3.5	204.7~651.2

^{a)}Abamectin ^{b)}Emamectin benzoate

^{c)}(Content × dose) of a pesticide / (content × dose) of AB (1.8%) or EB (2.15%) × 100

^{d)}Tested pesticide in this study

^{e)}Emamectin benzoate from Takai et al. (2003)

4년간 방제가 지속될 수 있는 가능성이 있다. 이처럼 방제지 속기간을 늘려 처리 횟수를 줄일 수 있다면, Kuroda and Kenmochi (2016)가 주장한 나무주사 자체에 의한 건전 소나무의 고사 가능성을 경감시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서 아바멕틴은 나무주사 약 2년 후에 81.8%의 방제가를 보였는데(Table 1), 본 시험과 수종은 다르나 2년차 방제가가 95.7%였던 Lee et al. (2009)의 결과에 비하면 크게 저조하지만, 같은 소나무에서 85.7%의 2년차 방제가 (NIFOS, 2020)를 보였던 연구 결과와는 유사하였다. 에마멕틴벤조에이트의 처리량에 따라 소나무와 곰솔 수종간 생존률의 차이가 없음은 보고되었으나(Takai et al., 2003) 아바멕틴의 두 수종간 효과 차이에 대한 기존 연구 결과는 없어 아바멕틴의 소나무재선충병 예방효과 차이가 시험 수종의 차이에 기인한 것인지는 명확하지 않다. 또한, 각 연구에서 사용한 농약 제품의 차이가 방제효과에 영향을 미칠 수 있다. Lee et al. (2023)는 시중에서 판매중인 16종의 아바멕틴 1.8% 유제 제품에 따라 소나무재선충에 대한 LC₉₅에 명확한 차이가 있음을 구명하였으며, 이러한 차이가 각 제품마다 사용된 부형제의 차이에서 기인할 수 있다고 하였다. Lee et al. (2023)의 연구에서 실제 함량이 낮게 분석된 제품을 제외하면, 크게 LC₉₅가 0.05 mg/ml 내외의 6개

제품과 0.35 mg/ml 내외의 9개 제품으로 구분되었다.

솔수염하늘소 방제효과

솔수염하늘소 방제효과는 티아메톡삼 처리구에서 가장 효과가 빨랐으며(2021; df=2,6, F=27.08, p<0.001, 2022; df=2,6, F=94.74, p<0.0001), 디노테퓨란·에마멕틴벤조에이트 합제도 7일차에는 생충률이 10% 미만으로 티아메톡삼과 함께 무처리구에 비해 유의하게 낮은 생충률을 보여 나무주사 당해 년도에 소나무재선충 및 솔수염하늘소 방제가 동시에 가능할 것으로 사료된다(2021; df=2,6, F=457.85, p<0.0001, 2022; df=2,6, F=113.19, p<0.0001)(Table 4). Kwon (2022)은 네오니코티노이드 계통의 살충제를 나무주사한 소나무 가지에 망사를 씌우고 솔수염하늘소를 접촉한 후 100% 치사할 때 까지의 소요기간이 티아메톡삼은 평균 4.2일, 디노테퓨란은 5.5일이라 하였는데 본 연구에서도 유사한 결과를 보였다. 약제 성분에 따라 솔수염하늘소에 대한 치사 소요기간이 긴 것은 후식 가능 시간 및 후식하는 소나무 수가 많아질 수 있는 우려가 있으나 솔수염하늘소 우화 후 2~3주차에 가장 많은 소나무재선충이 이탈하고(Kim et al., 2009), 1주차에 이탈한 소나무재선충도 에마멕틴벤조에이트 성분에 의해 증식이 억제되므로 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

Table 4. Survival rate (mean ± SD) of *M. alternatus*

Treatment	2021				2022			
	3DAT ^{a)}	CE (%) ^{b)}	7DAT	CE (%)	3DAT	CE (%)	7DAT	CE (%)
Dinotefuran+emamectin benzoate	67.8 ± 15.7a ^{c)}	32.2	7.8 ± 5.1b	92.1	56.7 ± 12.1b	42.7	5.6 ± 5.1b	94.2
Thiamethoxam	1.1 ± 1.9b	98.9	0c	100	3.3 ± 3.4c	96.6	0b	100
Untreated control	100a	-	98.9 ± 1.9a	-	98.9 ± 1.9a	-	96.7 ± 3.4a	-

^{a)}Days after treatment (DAT): days after individual rearing in rearing cup providing pine tree twigs as food.

^{b)}Control efficacy (%) = (survival rate of control – survival rate of pesticide treatment) / survival rate of control * 100

^{c)}Duncan’s multiple range test (DMRT). Same letters within the column are not significantly different (P<0.05).

Table 5. Residue level ($\mu\text{g/g}$) of dinotefuran and emamectin benzoate in 2~3 years age twigs of *P. densiflora*

Active ingredient	Residue level (mean \pm SD) ^{a)} by day after injection			
	2021. 4. 29 (90 DAI ^{b)})	2021. 10. 01 (245 DAI)	2022. 06. 14 (501 DAI)	2022. 11. 10 ^{c)} (650 DAI)
Dinotefuran	1.69 \pm 0.62	0.057 \pm 0.04	0.075 \pm 0.02 ^{d)}	0.022 ^{d)}
Emamectin benzoate	0.697 \pm 0.56	0.197 \pm 0.1	0.190 \pm 0.07	0.068 \pm 0.04

^{a)} Wood chips from five randomly selected pine trees injected with test pesticide constituted as one sample and analyzed three samples.

^{b)} Days after injection (DAI): test pesticide injected 29, Jan. 2021.

^{c)} One of the three samples analyzed with wood chips from four trees because one of the five trees wilted.

^{d)} Residue level of one (for June) and two samples (for Nov.) was less than limit of quantification (LOQ).

한편 Shin (2007)은 소나무재선충병 방제전략에 있어 병원체인 소나무재선충 방제보다는 매개충인 하늘소 방제가 더 중요하다고 하였는데 현재 매개충 방제가 가능한 약제 중 1회 나무주사를 통해 2년간 방제효과가 지속되는 약제는 없는 것으로 판단된다(NIFOS, 2020). 솔수염하늘소 암컷 한 마리는 실험실내 20~30°C 온도 조건하에서 평균 72.7~208.6개, 최대 370개 알을 산란할 수 있는데(Kwon, 2017) 이는 연속적인 매개충 방제가 이루어지지 않을 경우 적절한 밀도 이하로의 관리가 어려울 수 있음을 시사한다. 따라서 소나무재선충병 방제용 단제, 매개충 방제용 단제, 소나무재선충병 및 매개충을 동시에 방제할 수 있는 합제를 사용한 임지내에서의 소나무재선충병 발생 및 매개충 밀도 등의 조사를 통해 이들 약제의 효율적인 활용 방안과 매개충을 장기간 방제할 수 있는 새로운 약제 개발 등의 연구가 필요하다.

소나무 가지내 약제 잔류량 조사

디노테퓨란-에마멕틴벤조에이트 합제의 나무주사 90일 후 디노테퓨란 성분은 1.08~2.321 $\mu\text{g/g}$ 잔류량을 보였으나 약 2년 후에는 3개의 시료 중 2개의 시료에서 잔류량은 검출한계 미만이었으며, 나무주사 90일 후 에마멕틴벤조에이트 성분은 평균 0.697 $\mu\text{g/g}$ 에서 650일 후에는 0.068 $\mu\text{g/g}$ 으로 잔류량이 감소하였다(Table 5).

본 연구에서 매개충에 대한 2년차 살충효과를 시험하지는 않았으나 나무주사 2년 후 아세타미프리트의 잔류량이 0.2 $\mu\text{g/g}$, 티아메톡삼의 잔류량이 0.04 $\mu\text{g/g}$ 로 감소하였고 매개충 방제효과가 없었다는 연구결과에 비춰볼 때(NIFOS, 2020) 본 연구에 사용한 디노테퓨란-에마멕틴벤조에이트 합제도 2년차 매개충 방제효과는 없을 것으로 예상된다. 본 연구에 사용한 시험약제를 포함하여 현재 등록되어 있는 매개충 방제용 약제들은 나무주사 당해년도에 한해 방제효과가 있는데, 앞서 솔수염하늘소 연구 결과에서 고찰한 바와 같이 아바멕틴이나 에마멕틴벤조에이트 성분에 의한 소나무재선충 방제지속기간과 동조를 이룰 수 있는 신규 약제의 탐색이나 기존 약제의 약량 결정에 관한 연구가 이어져야 할 것이다.

Takai et al.(2004)는 에마멕틴벤조에이트의 IC_{95} 이 0.031 $\mu\text{g/g}$ 이라하였고, 자연 임목 상태의 소나무와 곶술에 나무주

사 후 27개월 뒤에도 90% 이상의 생존률을 보인 수목에서 0.031 $\mu\text{g/g}$ 이상이 잔류하고 있음을 보고하였다. 국내에서도 Lee et al. (2021)은 에마멕틴벤조에이트의 나무주사 시기와 천공수에 따른 약효와 잔류량을 조사하였으나 나무주사 4개월 후 절단한 가지에 접충한 소나무재선충의 증식 억제효과와 잔류량만을 조사하였고, Kwon et al. (2021)은 소나무에서 곶술량의 에마멕틴벤조에이트 약제를 사용하여 천공직경을 줄이기 위한 연구에서 수관 상단의 신초(0.027 $\mu\text{g/g}$)를 제외하고 나무주사 후 3년차까지 0.031 $\mu\text{g/g}$ 이상이 잔류함을 확인하였으나 소나무재선충병 예방효과를 소나무의 고사 유무가 아닌 가지에서 분리한 선충수로만 조사하여 나무주사에 대한 효과 평가가 한정적이다. 본 연구에서 1회 나무주사 후 에마멕틴벤조에이트 성분의 약 2년간 잔류량 변화와 함께 2회에 걸친 소나무재선충 인공접충에 따른 소나무의 고사율을 함께 조사한 결과는 Takai et al. (2004)의 연구 결과를 뒷받침하고 있으나, 시험대상 수목의 선정에 있어 현실적인 제약으로 인하여 잔류분석시 각 시험대상 수목당이 아닌 5그루의 수목에서 채취한 가지를 합쳐 분석한 한계가 있다.

감사의 글

본 연구는 2021년 유원에코사이언스(주)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 야외 조사에 도움을 준 손정환에 감사를 표합니다.

Author Information and Contributions

Byung-Hoon Joo, HanSeong Tree Care Ltd. <http://orcid.org/0009-0004-3077-2519>

Myung-Sang Kim, HanSeong Tree Care Ltd.

Young Hak Jung, SM Biovision Co., PhD.

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

Research design; Joo BH, Kim MS, Jung YH, Lee SM, Investigation; Joo BH, Kim MS, Jung YH, Data Analysis; Joo BH, Jung YH, Writing -original draft preparation; Joo BH, Writing – review and editing; Joo BH, Kim MS, Jung YH, Lee SM.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature cited

- Abelleira A, Picoaga A, Mansilla JP, Aguin O, 2011. Detection of *Bursaphelenchus xylophilus*, causal agent of pine wilt disease on *Pinus pinaster* in northwestern Spain. *Plant Dis.* 95(6):776.
- Cheng HR, Lin M, Li W, Fang Z, 1983. The occurrence of a pine wilting disease caused by a nematode found in Nanjing. *Forest Pest and Disease.* 4(1):1-5.
- Dwinell LD, Nickle WR, 1989. An overview of the pine wood nematode ban in North America. General technical report SE-55. USDA Forest Service.
- Enda, N, 1989. The status of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle and its control in Korea. *J. Korean For. Soc.* 78(2):248-253. (In Korean)
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO), 2023. EPPO global database. <https://gd.eppo.int/taxon/BURSXY> (Accessed Jan. 10. 2023)
- Fernandez GCJ, 1992. Residual analysis and data transformations: important tools in statistical analysis. *HortScience.* 27(4):297-300.
- James R, Tisserat N, Todd T, 2006. Prevention of pine wilt of Scots pine (*Pinus sylvestris*) with systemic abamectin injections. *Arboricul. Urban Fores.* 32(5):195-201.
- Kim DS, Lee SM, Jung 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*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 42(4):307-313. (In Korean)
- Kim DS, Lee SM, Huh HS, Park NC, Park CG, 2009. Escape of pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, through feeding and oviposition behavior of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera; Cerambycidae) adults. *Kor. J. Appl. Entomol.* 48(4):527-533. (In Korean)
- Kishi Y, 1995. Pine wood nematode and the Japanese pine sawyer. Thomas company Ltd, Tokyo, Japan. 302pp.
- Kobayashi F, Yamane A, Ikeda T, 1984. The Japanese pine sawyer beetle as the vector of pine wilt disease. *Annu. Rev. Entomol.* 29:115-135.
- Korea Forest Service (KFS), 2022. <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/main/main.do;jsessionid=0NM7UI4CReqwVm3IoVE-zSDgufkS5y7D4Cq8627O.kfss22> (Accessed Nov. 28, 2022). (In Korean)
- Korea Forest Service (KFS), 2023. https://www.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardList.do?bbsId=BBSMSTR_1651&mn=NKFS_06_04_05 (Accessed Aug. 8, 2023). (In Korean)
- Knowles K, Beaubien Y, Wingfield MJ, French DW. 1983. The pinewood nematode new in Canada. *For. Chron.* 59(1):40.
- Kuroda K, Kemnuchi A, 2016. Risk of killing uninfected pine trees by the repeated trunk injection of nematicides to prevent pine wilt. Proceedings of the pine wilt disease international symposium, Seoul, Korea.
- Kwon SH, 2017. A population model of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae): temperature-dependent development, oviposition, and phenology modeling. PhD Diss. Jeju National Univ., Jeju, Korea. (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)
- Kwon GH, 2022. Control effect of the pinewood nematode vector by trunk injections using mixture pesticides. Pp.124-135. In: Kwon GH, Choi YS, Kim MJ, Park JE, Song DH, Lee SW et al. (Eds.). *Tree doctors. Korea tree doctors association, Daejeon, Korea.* (In Korean)
- Lee DH, Suh DY, Seo ST, Lee SH, 2020. Insecticidal activity of Japanese pine sawyer (*Monochamus alternatus*) and pine sawyer (*Monochamus saltuarius*) using abamectin and emamectin benzoate. *J. Fore. Environ. Sci.* 36(3):255-258.
- Lee JW, Mwamula AO, Choi JH, Lee HW, Kim YS et al., 2023. The potency of abamectin formulation against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Plant Pathol. J.* 39(3):290-302.
- Lee SG, 2006. Pine wild disease outbreak status and control strategies. *Tree Health.* 11:44-53. (In Korean)
- Lee SM, 2003. Damages from pine wild disease and its management. *Tree Health.* 8:32-43. (In Korean)
- Lee SM, Kim DS, Lee SG, Park NC, Lee DW, et al., 2009. Selection of trunk injection pesticides for prevention of pine wilt disease, *Bursaphelenchus xylophilus* on Japanese black pine (*Pinus thunbergii*). *Korean J. Pestic. Sci.* 13(4):267-274. (In Korean)
- Lee SM, Jung YH, Seo ST, Kim DS, Lee DW, 2021. 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)
- Linit MJ, 1988. Nematode-vector relationship in the pine wilt

- disease system. *J. Nematol.* 20(2):227-235.
- Mamiya Y. 1983. Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Annu. Rev. Phytopathol.* 21: 201-220.
- Mota MM, Braasch H, Bravo MA, Penas AC, Burgermeister W, et al., 1999. First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. *Nematol.* 1:727-734.
- Myers RF, 1988. Pathogenesis in pine wilt caused by pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Nematol.* 20(2): 236-244.
- National Institute of Forest Science (NIFOS), 2009. Study on the ecological characteristics of pine wilt disease. Research report 09-21. Seoul, Korea. (In Korean)
- National Institute of Forest Science (NIFOS), 2016. Analyze pine wilt disease damage by tree species and improve control techniques. Research Report 16-28. Seoul, Korea. (In Korean)
- National Institute of Forest Science (NIFOS), 2020. Research of proactive, customized control strategies and technology for pine wild disease. Research Report 20-16. Seoul, Korea. (In Korean)
- National Institute of Forest Science (NIFOS), 2021. Development of eco-friendly agents against pine wild disease based on biotechnology. Research Report 21-17. Seoul, Korea. (In Korean)
- Rural Development Administration (RDA), 2023. Pesticide safety information system. Rural Development Administration. Jeonju, Korea. <https://psis.rda.go.kr/psis/index.ps> (Accessed Mar. 15. 2023). (In Korean)
- SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shin SC, 2007. Pine wilt disease occurrence and control strategy in *Pinus koraiensis*. *Agrochem. News Mag.* 28(4): 26-29. (In Korean)
- Shin SC, 2008. Pine wilt disease in Korea. Pp. 26-32. In: Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y (Eds.), *Pine wilt disease*, Springer, Tokyo, Japan.
- Sousa E, Bravo MA, Pires J, Naves P, Penas AC, et al., 2001. *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematode; Aphelenchoididae) associated with *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera; Cerambycidae) in Portugal. *Nematol.* 3(1):89-91.
- Sutherland JR, Ring FM, Seed JE, 1991. Canadian conifers as hosts of the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*): results of seedling inoculations. *Scand. J. For. Res.* 6:209-216.
- 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.
- Takai K, Suzuki T, Kawazu K, 2003. Development and preventative effect against pine wilt disease of a novel liquid formulation of emamectin benzoate. *Pest Manag. Sci.* 59(3): 365-370.
- Takai K, Suzuki T, Kawazu K, 2004. Distribution and persistence of emamectin benzoate at efficacious concentrations in pine tissues after injection of a liquid formulation. *Pest Manag. Sci.* 60(1):42-48.
- Xu Q, Zhang X, Li J, Ren J, Ren L, et al., 2023. Pine wilt disease in Northeast and Northwest China: a comprehensive risk review. *Forests.* 14(2):174.
- Yi Ck, Byun BH, Park JD, Yang SI, Chang KH, 1989. First finding of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Sterner et Buhner) Nickle and its insect vector in Korea. *Res. Rep. For. Res. Inst.* 38:141-149 (In Korean)

소나무에서 나무주사를 통한 신규 합제 살충제의 소나무재선충병과 솔수염하늘소 방제

주병훈 · 김명상 · 정영학¹ · 이상명^{1*}

한성나무병원, ¹주에스엠바이오비전

요약 소나무재선충병은 솔수염하늘소나 북방수염하늘소가 매개하는 소나무재선충이 소나무류에 침입 후 증식하면서 빠르게 나무를 고사시키는 병이다. 나무주사는 소나무재선충병과 매개충인 하늘소류를 방제하기 위한 여러 방법 중 가장 효과적이고 환경에 안전한 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 나무주사를 통한 디노테퓨란·에마멕틴 벤조에이트 합제의 소나무재선충병과 솔수염하늘소에 대한 방제효과를 조사하였다. 합제를 1회 나무주사한 처리구는 약 2년에 걸쳐 소나무재선충병 방제효과를 보였으며 시험대상목 목편에서 분리한 소나무재선충의 수도 무처리구에 비해 유의하게 적었다. 솔수염하늘소에 대한 방제효과는 비교약제인 티아메톡삼에 비해 방제속도는 느리게 나타났으나 집중 7일차에는 무처리구 대비 90% 이상의 방제효과를 보였다. 합제 각 성분들의 잔류량은 시간에 따라 빠르게 감소하였는데, 특히 디노테퓨란은 나무주사 후 약 2년 뒤에 3개의 시료 중 1개의 시료에서만 검출되었다. 에마멕틴벤조에이트는 모든 시료에서 검출되었고 평균 잔류량은 0.068 µg/kg였다.

색인어 소나무재선충병, 소나무재선충, 솔수염하늘소, 나무주사