



소나무류에서 수간주입 시 약제주입 위치별에 따른 에마멕틴벤조에이트의 잔류량과 소나무재선충에 대한 효과

강현우^{1†} · 이호욱^{2†} · 최재혁^{2†} · 이종원^{2†} · 권오경² · 김동수³ · 이광수⁴ · 이창준⁵ · 강진택⁶ · 이동운^{1,2*}

¹경북대학교 질병매개곤충학과, ²경북대학교 생태과학과, ³국립산림과학원 산림바이오소재연구소,

⁴국립산림과학원 난대·아열대 산림연구소, ⁵임업진흥원, ⁶국립산림과학원 산림 ICT연구센터

Comparison of the Residual Amount of Emamectin Benzoate and the Effect on Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* according to the Location of Trunk Injection in Pine Trees

Hyun-woo Kang^{1†}, Ho-wook Lee^{2†}, Jae-hyuk Choi^{2†}, Jong-won Lee^{2†}, Oh-Gyeong Kwon², Dong Soo Kim³, Kwang-Soo Lee⁴, Chang-jun Lee⁵, Jin Taek Kang⁶, DongWoon Lee^{1,2*}

¹Department of Vector Entomology, and

²Department of Ecological Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

³Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

⁴Warm Temperature and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Seogwipo 63582, Korea

⁵Forest Pests & Diseases Monitoring Headquarters, Korea Forestry Promotion Institute, Daejeon 35209, Korea

⁶Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

(Received on October 26, 2022. Revised on November 14, 2022. Accepted on November 16, 2022)

Abstract *Pinus densiflora*, *P. koraiensis* and *P. thunbergii* are tree species known to be susceptible to the pine wood nematode (PWN) in Korea. Preventive measures especially tree injections with nematicides are being carried out to control the PWN. In this study, the length of sapwood in pine tree was investigated based on region of origin. Additionally, 4 methods of nematicide injection (sapwood layer, between sapwood and heartwood, whole sapwood-heartwood layer, and sapwood diagonal direction) were evaluated to determine their control efficacy based on recovered nematode populations and chemical residual amounts over a period of time. Three-year-old branches were collected for each trunk injection method, and the residual amount of the chemical and the nematode populations were investigated through branch inoculations. The length of sapwood differed between tree species and regions. However, there were no statistical differences in the residual amount and the nematode populations recovered after the tree trunk injection using the 4 methods, except for some differences observed between individual trees.

Key words Control efficacy, heartwood, nematicide, nematode population, sapwood

서 론

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 소나무속(*Pinus*), 전나무속(*Abies*), 가문비나무속(*Picea*), 금전송속(*Pseudotsuga*),

잎갈나무속(*Lalix*), 개잎갈나무속(*Cedrus*), 솔송나무속(*Tsuga*) 등과 같은 소나무과(*Pinaceae*)의 수목에 침입하여 잎의 시들음을 동반한 기주 고사를 유발시켜 수목에서 경제적 피해를 심각하게 유발시키는 대표적인 식물기생선충으로 인식되고 있다(Takeuchi, 2008; Carnegie et al., 2018).

1905년 일본의 규슈섬에서 처음 피해가 발생한 이래 중국과 한국, 대만, 포르투갈, 스페인 등지로 피해가 확산되고 있다(Yano, 1913, Zhao et al., 2008; European and Mediter-

[†]The contributions of these authors are the same.

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

ranean Plant Protection Organization, 2013). 한국에서는 1988년 부산 금정산에서 처음 발생이 확인된 이후 피해지역이 점차 확산되어 2022년 4월 기준 전국 135개 시·군·구에서 38만그루의 피해목이 발생하였다(Korea Forest Service, 2022).

소나무재선충을 관리하는 방법으로는 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)나 북방수염하늘소(*M. saltuarius*)를 제거하는 방법과 소나무재선충의 증식을 억제하거나 매개충에 살충효과가 있는 약제를 수간에 주입하여 소나무재선충의 감염을 미리 예방하는 나무주사 방법이 있다(Kamata, 2008; Shin, 2008). 또한 이미 소나무재선충에 감염되어 고사한 수목에서 소나무재선충의 이동을 차단하기 위하여 고사목을 벌채한 후 분쇄, 훈증소독, 소각하는 방제방법도 있다(Shin, 2008). 이들 중 나무주사는 비표적 생물에 대한 영향이 매우 제한적이고, 작업자의 약제 노출에 의한 위험 감소, 환경 중 비산이나 표류와 같은 위험 부재, 상대적으로 낮은 기상조건에 따른 약제 처리 제약 등의 많은 장점을 가지고 있어 약제 비용이나 처리시기의 제한성, 처리 시 인건비 투입이 많이 발생하는 점 등의 단점이 있음에도 불구하고, 선단지나 생활권 주변 등지에서 적용이 되고 있다(Kamata, 2008; Cha et al., 2020).

우리나라에서 소나무재선충 방제를 위해 나무주사를 하는 방법은 약제주입병을 사용하는 방법과 드릴로 천공 후 약제주입기로 나무주사용 약제를 수간 내에 직접 주입하는 방법이 사용되고 있다(Lee et al., 2021a). 주입병을 이용할 경우는 드릴로 직경 0.6 cm, 깊이 4~6 cm를 천공한 뒤 주입병을 설치하여 약제를 주입하며 약제주입기를 사용할 경우 직경 1 cm, 깊이 7~10 cm를 천공한 뒤 흉고직경별로 제시되어 있는 약량을 수간에 직접 주입한다(Korea Forest Service, 2020).

나무주사를 통한 약제의 수간주입은 수목의 생리나 내부구조, 약제의 화학적 특성, 주입시기와 날씨 및 토양환경, 수간주입 방법이나 기술 등에 따라 약효의 차이가 발생할 수 있다(Cha et al., 2020).

우리나라에서 소나무재선충병 예방을 위한 수간주입 관련 연구들로는 소나무재선충에 대한 살선충제 선발이나 수체내 이동, 잔류, 약제 주입시기별에 따른 효과와 같은 약제의 효과 평가와 관련된 연구들이 주로 수행되었다(Lee et al., 2009a, 2009b, 2021a, 2021b). 그러나 수간주입 방법과 관련된 연구들은 제한적으로 이루어져 수간 주입 구멍수나 천공 드릴의 직경별에 따른 약효나 잔류량 비교 등과 같은 연구들만이 근래에 수행되었다(Lee et al., 2021b).

우리나라의 산림에 서식하고 있는 소나무(*Pinus densiflora*)와 곰솔(*Pinus thunbergii*), 잣나무(*Pinus koraiensis*)는 소나무재선충에 대한 감수성이 매우 높은 수종들로 알려져 있는데(Takeuchi, 2008), 이들 수종에 대한 나무주사 방법은 드릴의 크기, 천공 위치나 깊이, 천공 시 각도 등이 산림병해

충 방제지침에 규정화 되어 있는데, 나무의 종류별로는 차이를 두지 않고 있다(Korea Forest Service, 2022). 따라서 본 연구에서는 수목의 수분이동과 관련된 조직학적 특성을 고려한 나무주사 방법을 개발하기 위하여 수행하였다. 이를 위하여 우리나라의 자연림 내 소나무재선충 감수성 수종인 소나무와 곰솔, 잣나무를 대상으로 지역별, 수종별 나무의 변재부와 심재부 차이를 조사하고, 각 수종별로 약제의 수간주입 위치별에 따른 약효와 잔류량 차이를 조사하였다.

재료 및 방법

수종별 변재 및 심재 길이 조사

소나무재선충의 자연 감염 기주인 소나무와 잣나무, 곰솔을 대상으로 심재부와 변재부의 비율을 조사하였는데, 각 수종별 조사지역으로 소나무는 경북 구미시 해평면 금산리(36°11'32"N 128°25'22"E), 경남 산청군 단성면 남사리(35°16'15"N 127°51'03"E), 경북 포항시 북구 기계면 내단리(36°03'45"N 129°14'25"E)에서 조사하였고, 잣나무는 춘천시 동산면 조양리(37°75'06"N 127°78'91"E)와 경북 김천시 아포읍 대신리(36°08'48"N 128°11'02"E)에서 조사하였다. 곰솔은 경북 포항시 북구 흥해읍 곡강리(36°06'38"N 129°24'48"E)와 경상남도 거제시 연초면(35°18'24"N 128°48'34"E), 제주특별자치도 제주시 구좌읍 세화리(33°30'31"N 126°50'33"E)에서 조사하였다. 각 조사지역은 소나무재선충 피해목 벌채가 이루어진 지역이거나 도로공사 등을 위해 100주 이상의 벌채가 이루어진 지역에서 수행하였다.

각 조사지역에서 임의로 50본의 그루터기를 선정하여 심재와 변재 및 장경과 단경을 측정하였다. 직경은 벌근부 단면을 직경자를 이용하여 측정하였고, 자를 이용하여 장경부와 단경부에서 심재와 변재 길이를 측정하였다. 각 지역별과 수종별로 측정된 변재 값을 직경과의 상관관계를 구하기 위해 엑셀의 회귀식을 이용하여 직경에 따른 변재길이 회귀식을 도출하였다.

약제의 수간주입 위치에 따른 나무주사 효과

처리수종 및 지역

약제의 수간주입 위치에 따른 효과를 알아보기 위하여 수종별로 지역을 구분하여 나무주사를 실시하였다. 소나무는 경남 진주시 금산면 장사리(35°11'33"N 128°11'03"E)에서 2020년 3월 7일, 경북 상주시 가장동(36°22'45"N 128°08'55"E) 일대에서 3월 2일 수행하였으며 곰솔은 부산광역시 금정구 구서동(35°16'03"N 129°05'50"E)에서 3월 6일, 제주도 서귀포시 남원읍(33°21'09"N 126°40'21"E)에서 2월 26일 수행하였고, 잣나무는 경북 상주시 가장동(36°22'39"N 128°08'44"E)에서 3월 2일 수행하였다. 각 지역에서 임의로 21본의 나무를 선정하였으며 직경자를 이용하여 각각의 나

무마다 흉고직경을 측정하였다. 부산과 제주지역은 소경목과 중경목으로 구분하여 각각 21본씩 처리하였다. 각각의 수종에서 측정된 흉고직경을 이용하여 산림청, 국립산림과학원의 입목재적·바이오매스 및 임분수확표 자료(Korea Forest Service and National Institute of Forest Science, 2021)를 기반으로 수고와 재적, 생체량을 산출하였다.

시험약제

시험에 사용된 약제는 소나무재선충의 예방나무주사 약제로 사용되는 에마멕틴벤조에이트 9.7% 유제를 신젠타사로부터 제공받아 사용하였다.

천공 및 약제주입

각 처리지역에서 선정된 나무들에 대해 측정된 직경 값을 기반으로 앞에서 기술한 직경별 변재값 회귀식에 대입하여 직경별에 따른 변재길이를 산출한 뒤 다음과 같이 전기드릴을 이용하여 처리하고자 하는 위치에 약제가 도달할 수 있는 깊이로 천공하였다.

천공방법은 1) 변재부 처리, 2) 변재와 심재 사이 처리, 3) 심재와 변재부 통합처리, 4) 변재부 대각선처리로 구분하였는데 변재부 처리는 약제 주입을 위해 수직방향으로 45°각도로 4 cm 천공 후 약제를 피펫으로 주입하였고, 변재와 심재 사이 주입은 45° 각도로 8 cm 천공 후 4 cm 깊이까지만 약제를 주입하였다. 심재와 변재부 통합처리는 45° 각도로 8 cm 천공 후 전체 부위에 약제를 주입하였으며 대각선 처리는 기존의 나무주사 방법으로 변재부를 사선 45° 각도로 8 cm 천공 후 약제를 피펫으로 주입하였다.

약량은 측정된 흉고직경에 따라 직경 1 cm당 0.3 mL의 약제를 피펫으로 주입하였다.

상주지역의 소나무와 잣나무를 대상으로는 1), 2), 3), 4)의 4가지 방법으로 처리하였으며 진주지역 소나무와 제주와 부산지역 곰솔은 1), 2), 3)의 3가지 방법으로 처리하였다.

소나무재선충에 대한 효과검정 및 잔류분석용 시료채취

약제처리 후 상주지역 소나무는 133일, 진주지역 소나무와 상주지역 잣나무는 134일, 제주지역 곰솔은 145일, 부산지역 곰솔은 155일 후 가지점종법(Shin et al., 2015)을 통한 소나무재선충 증식량 조사에 사용할 15 cm 길이의 가지를 1그루당 3개이상 전정가위와 고절톱을 이용하여 채취하였다. 에마멕틴벤조에이트 9.7% 유제의 잔류량 조사를 위한 시료는 채취한 가지를 당년생 가지와 전년도 가지, 주가지로 구분하여 전정가위를 이용하여 별도로 채취하였다. 채취한 시료는 지퍼백에 담아 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하였다.

잔류분석

잔류분석 시료는 30일 동안 실험실에서 건조시킨 후 곡물

분쇄기(High-speed Multi functional Grinder, RIRIHONG, Korea)를 사용하여 분쇄한 후, 20 mesh (850 μ m)체를 이용해 분말상태의 시료로 만든 뒤 지퍼백에 넣고, 냉동 보관 후 RP-HPLC 방법을 이용하여 잔류분석을 진행하였다.

농약표준용액 및 시약

분석대상 농약인 에마멕틴벤조에이트(순도 99.4%) 분석용 표준품은 Sigma-Aldrich (St. Louis, USA)에서 구입하였으며, 실험에 사용된 용매인 methanol, acetonitrile 및 3차 증류수는 Burdick & Jackson Inc. (Muskegon, MI, USA)의 HPLC grade로 구입하였다. 분석에 사용된 시약인 formic acid (for analysis, 98-100% purity)는 Merck (Darmstadt, Germany)에서 구입하였고, ammonium formate ($\geq 99.0\%$, LC-MS grade)는 Sigma-Aldrich에서 구입하였다. QuEChERS 전처리를 위한 제품은 Chromatific (Heidenrod, Germany)에서 구입하여 사용하였다. 시료 추출을 위한 제품은 Chromatific original extraction salts (4 g $MgSO_4$, 1 g NaCl)를 사용하였다.

표준용액 조제 및 검량선 작성

실험에 사용한 농약은 acetonitrile을 이용하여 stock solution 500 mg/L을 조제하였다. 검량선 작성을 위하여 acetonitrile 및 완충용액(100 mM ammonium formate in DW, adjust pH 4.0-4.5)을 4/6(v/v) 비율로 희석하여 사용하였다. 검량선은 0.1~25.0 μ g/L의 농도로 작성하였으며 batch에서의 분석오류를 최소화하기 위하여 헷차검량법을 사용하였다.

전처리 방법

50 mL conical tube(SPL life sciences, Korea)에 1 g씩 칭량한 소나무 시료에 3차 증류수 2 mL를 첨가하여 수분화를 시킨 뒤, acetonitrile 용액을 10 mL 첨가하고, 진탕기(SPEX sample Prep, Genogrider, USA)를 사용하여 1,200 rpm에서 10분간 진탕하여 추출하였다. 이후 물과 유기용매 층 분리를 위해 4 g $MgSO_4$, 1 g NaCl을 혼합한 후 진탕기를 사용하여 1,200 rpm에서 1분간 균질화하고 원심분리기(Eppendorf, 5804R, Hamburg, Germany)를 이용하여 3,000 rpm에서 5분간 원심분리하였다. 농산물 등의 유해물질 분석법(<https://www.law.go.kr>)에서 LC-MS/MS를 이용한 시료의 경우 d-SPE 정제과정 없이 10배 희석하는 방법을 사용하고 있어 이를 준용하여 상등액 100 μ L, acetonitrile 300 μ L 및 완충용액 600 μ L를 혼합한 후 PTFE syringe filter (Hyundai Micro, 13 mm, 0.2 μ m, Korea)로 여과 후 LC-MS/MS를 이용하여 분석하였다.

기기 분석 조건

분석에 사용한 LC는 Shimadzu Nexera X2 Liquid chro-

matograph이며, tandem mass spectrometer는 Shimadzu LCMS-8050을 사용하였다. 이동상은 0.1% formic acid와 5 mM ammonium formate를 포함한 buffer 용액과 acetonitrile을 사용하여 Poroshell SB-Aq (100 mm × I.D 3.0 mm, 2.7 μm, Agilent, USA) column으로 분리하여 분석하였다. 분석 시료량은 10 μL를 주입하여 분석하였다. MS/MS 분석의 이온화는 ESI (Electrospray Ionization) mode를 이용하여 positive로 분석하였으며, MRM (Multi Reaction Monitoring) mode를 이용하였다. 자료 처리는 Labsolutions Version 5.97 SP1 프로그램을 사용하였다.

소나무재선충 증식수 조사

접종을 위한 소나무재선충 분리

소나무재선충의 접종을 위한 소나무재선충 접종원은 대구광역시 달성군 화원읍과 옥포면 일대 소나무재선충 자연 발생지에서 채취한 소나무 고사목에서 분리하여 사용하였다. 소나무재선충 감염 고사목을 기계톱과 고절톱을 사용하여 절단한 뒤 실험실로 가져와 작은 원판 형태로 톱을 사용하여 자른 뒤 전정가위나 도끼를 이용해 가로, 세로 1 cm 크기의 조각으로 자르고, Baermann's funnel법을 사용하여 분리하였다. 분리된 선충들은 분리 후 24시간 이내에 접종원으로 사용하였다.

수간주입 나무의 절취 가지에 대한 소나무재선충 접종

분리된 선충은 100 mL 비이커에 모아 교반기(CORNING PC-420D, LABORATORY STIRRER, USA)에서 80 rpm으로 1000마리/1 mL의 밀도가 되도록 현탁액을 만들었다. 그 후 15 cm로 잘라온 소나무재선충 접종용 가지의 가운데 부분 수피를 칼로 2 cm 길이로 절개 하고, 솜을 삽입하였다. 삽입한 솜에 피펫(Finnpipette F1 100~10000 μm, Thermo, China)을 사용하여 준비된 소나무재선충 현탁액 1 mL를 접종하였다. 접종 후 접종 부분의 건조를 막기 위하여 파라필름(Parafilm M, LABORATORY FILM, USA)으로 찢 뒤,

다시 가정용 호일로 싸주었다. 가지의 건조를 막기 위해 가지의 양 끝 절단부를 파라핀으로 도포한 뒤 온도 26°C, 습도 60%의 항온기에 보관하였다.

증식량 조사

접종 30일 후 접종 부분을 중심으로 위쪽과 아래쪽 3-5 cm, 8-10 cm 부분을 각각 2 cm씩 전정가위로 자르고, 자른 부분의 무게를 측정하였다. 무게 측정 후, 전정가위로 1 cm 이하의 조각으로 절단 한 뒤 Baermann's funnel 방법으로 선충을 분리하고, 해부현미경 하에서 선충수를 조사하였다.

통계분석

조사 지역 및 수종에 따른 직경과 평균 변재길이나 최소 변재부 길이 간의 상관관계는 엑셀 프로그램의 회귀식 산출 프로그램을 이용하여 산출하였다. 수종 또는 지역과 직경이나 바이오매스, 잔류량, 소나무재선충 증식량 등의 값은 처리별로 구분하여 평균간 차이를 SAS 프로그램을 이용하여 처리 평균간 차이를 분산 분석하였다(SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011). 수간주입 위치별에 따른 약제의 잔류량 분석에 한 주를 한 반복으로 3반복 조사하였는데 이때 사용된 시험목의 수고, 흉고직경, 재적, 바이오매스 및 소나무재선충 증식수도 동일한 나무의 자료를 이용하여 분석하였다.

결 과

수종별 변재비율 조사

각 수종별로 평균 변재길이와 직경과의 관계를 회귀분석한 결과는 Table 1과 같았다. 평균 변재길이는 잣나무가 가장 짧았으며 곰솔이 가장 길었고, 동일 수종간에도 지역별로 차이를 보였다(Table 1). 각 수종별 최소 변재길이와 직경과의 관계는 Table 1과 같았는데 최소 변재길이도 평균 변재길이와 동일하게 잣나무가 가장 짧았으며 곰솔이 가장 길었고, 동일 수종간에도 지역별로 차이를 보였다(Table 1).

Table 1. Correlation between sapwood length (Y) and diameter (x) by tree species

| Species | Locality | Average sapwood length (Y) | | Minimum sapwood length (Y) | |
|-------------------------|-----------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | | Regression equation | R ² | Regression equation | R ² |
| <i>Pinus densiflora</i> | Gumi | Y=0.3181x-0.0799 | 0.933 | Y=0.2039x-1.2899 | 0.8177 |
| | Pohang | Y=0.1578x+3.1064 | 0.5432 | Y=0.1048x+3.0505 | 0.3592 |
| | Sancheong | Y=0.2632x-0.8943 | 0.7572 | Y=0.2117x-1.1812 | 0.6415 |
| <i>P. thunbergii</i> | Geojae | Y=0.3483x+0.5297 | 0.9201 | Y=0.3204x-0.2061 | 0.8157 |
| | Jeju | Y=0.398x-0.8757 | 0.9315 | Y=0.2967x+0.4633 | 0.907 |
| | Pohang | Y=0.3183x+0.6128 | 0.9309 | Y=0.2876x-0.2021 | 0.8591 |
| <i>P. koraiensis</i> | Chuncheon | Y=0.183x-2.361 | 0.7078 | Y=0.1287x-1.5923 | 0.5872 |
| | Gimcheon | Y=0.1392x+0.079 | 0.5265 | Y=0.0978x+0.3733 | 0.3511 |

수종별 나무주사 천공 위치에 따른 잔류량과 소나무재선충 증식수

소나무에서 수간주입 위치별에 따른 에마멕틴벤조에이트의 잔류량과 소나무재선충 증식수를 상주에서 조사한 결과는 Table 2와 같았다. 에마멕틴벤조에이트의 잔류량은 기존의 나무주사 천공방법인 대각선 천공 처리에서 1.03 ppm으로 가장 많았고, 변재부 처리에서 가장 적었으나 시험목 간에 차이가 많아 통계적 유의성은 없었다(df=3, 8, F=3.29, P=0.079). 절단 가지에 접촉 시 소나무재선충 증식수도 처리간에 차이가 없었다(df=3, 8, F=0.04, P=0.9872).

진주의 소나무에서 에마멕틴벤조에이트 수간주입 후 잔류량과 소나무재선충 증식수를 조사한 결과는 Table 3과 같았

다. 에마멕틴벤조에이트 잔류량은 변재부 처리에서 0.189 ppm으로 가장 많았고, 변재와 심재 사이 처리, 전체처리 순이었으나 통계적 차이는 없었다(df=2, 6, F=3.29, P=0.079). 선충 증식수에 있어서도 수간주입 위치별에 따라 차이가 없었다(df=2, 6, F=1.34, P=0.3312).

곰솔에 대한 수간주입 위치별에 따른 에마멕틴벤조에이트의 잔류량과 소나무재선충 증식수를 제주에서 조사한 결과는 Table 4와 같았다. 에마멕틴벤조에이트 잔류량은 변재부 처리가 0.046 ppm으로 가장 많았으나 통계적 차이는 없었고(df=2, 6, F=3.95, P=0.0804), 소나무재선충 증식수는 변재와 심재 사이 처리에서만 15.8마리로 다른 두 처리에 비하여 많았다(df=2, 6, F=41.73, P=0.0003).

Table 2. Amount of emamectin benzoate and number of *Bursaphelenchus xylophilus* in *Pinus densiflora* by trunk injection location in Sangju

| Trunk injection location | Tested tree ± SD | | | | Emamectin benzoate residual amount (ppm) ± SD | Number of nematode/g wood ± SD |
|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|---|--------------------------------|
| | Height (m) | Volume (m ³) | Biomass | Diameter (cm) | | |
| Sapwood | 14.4 ± 0.1a ²⁾ | 0.3138 ± 0.026a | 140.43 ± 11.29a | 24.80 ± 0.95a | 0.0343 ± 0.0163a | 13.4 ± 13.2a |
| Between the sapwood and the heartwood | 13.9 ± 0.2a | 0.2798 ± 0.0668a | 125.73 ± 28.44a | 23.50 ± 1.87a | 0.2233 ± 0.1320a | 13.0 ± 22.2a |
| Whole sapwood and heartwood | 13.5 ± 0.1a | 0.3768 ± 0.09a | 169.98 ± 38.7a | 23.83 ± 4.9a | 0.1403 ± 0.0978a | 10.9 ± 17.4a |
| Sapwood diagonal direction | 13.5 ± 0.4a | 0.2590 ± 0.1024a | 116.65 ± 44.07a | 22.77 ± 4.6a | 1.0353 ± 0.8587a | 15.8 ± 12.0a |

²⁾Means followed by same lowercase letters within the row are not significantly different (Tukey's Test, p<0.05).

Table 3. Amount of emamectin benzoate and number of *Bursaphelenchus xylophilus* in *Pinus densiflora* by trunk injection location in Jinju

| Trunk injection location | Tested tree ± SD | | | | Emamectin benzoate residual amount (ppm) ± SD | Number of nematode/g wood ± SD |
|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|----------------|---|--------------------------------|
| | Height (m) | Volume (m ³) | Biomass | Diameter (cm) | | |
| Sapwood | 14.3 ± 0.1b ²⁾ | 0.3141 ± 0.0128b | 136.90 ± 0.00b | 25.07 ± 0.35b | 0.1890 ± 0.1703a | 12.3 ± 3.7a |
| Between the sapwood and the heartwood | 15.2 ± 0.2a | 0.3889 ± 0.0153a | 171.50 ± 6.235a | 27.23 ± 0.666a | 0.1363 ± 0.1079a | 11.2 ± 4.2a |
| Whole sapwood and heartwood | 15.5 ± 0.3a | 0.4258 ± 0.0333a | 186.80 ± 14.0296a | 28.10 ± 1.039a | 0.1123 ± 0.0638a | 19.1 ± 9.6a |

²⁾Means followed by same lowercase letters within the row are not significantly different (Tukey's Test, p<0.05).

Table 4. Amount of emamectin benzoate and number of *Bursaphelenchus xylophilus* in *Pinus thunbergii* by trunk injection location in Busan

| Trunk injection location | Tested tree ± SD | | | | Emamectin benzoate residual amount (ppm) ± SD | Number of nematode/g wood ± SD |
|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------|---------------|---|--------------------------------|
| | Height (m) | Volume (m ³) | Biomass | Diameter (cm) | | |
| Sapwood | 14.3 ± 0.1a ²⁾ | 0.1802 ± 0.01a | 107.73 ± 6.7a | 18.60 ± 0.44a | 0.0490 ± 0.0286b | 3.6 ± 5.3a |
| Between the sapwood and the heartwood | 14.1 ± 0.2a | 0.1743 ± 0.01a | 103.87 ± 6.7a | 18.23 ± 0.55a | 0.1013 ± 0.0278ab | 4.0 ± 2.6a |
| Whole sapwood and heartwood | 13.6 ± 0.1b | 0.1464 ± 0.099b | 86.16 ± 6.0b | 16.70 ± 0.26b | 0.1773 ± 0.038a | 0.1 ± 0.2a |

²⁾Means followed by same lowercase letters within the row are not significantly different (Tukey's Test, p<0.05).

Table 5. Amount of emamectin benzoate and number of *Bursaphelenchus xylophilus* in *Pinus koreanensis* by trunk injection location in Sangju

| Trunk injection location | Tested tree \pm SD | | | | Emamectin benzoate residual amount (ppm) \pm SD | Number of nematode/g wood \pm SD |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|---|------------------------------------|
| | Height (m) | Volume (m ³) | Biomass | Diameter (cm) | | |
| Sapwood | 16.1 \pm 1.1a ²⁾ | 0.3348 \pm 0.12a | 128.35 \pm 42.7a | 23.17 \pm 3.5a | 0.2187 \pm 0.1916a | 17.4 \pm 11.3a |
| Between the sapwood and the heartwood | 15.6 \pm 0.2a | 0.2866 \pm 0.024a | 111.45 \pm 8.57a | 21.50 \pm 0.7a | 0.7693 \pm 0.6567a | 13.0 \pm 22.2a |
| Whole sapwood and heartwood | 15.4 \pm 0.1a | 0.2587 \pm 0.0000a | 101.55 \pm 0.00a | 20.93 \pm 0.3a | 1.4870 \pm 0.5921a | 10.9 \pm 17.4a |
| Sapwood diagonal direction | 15.7 \pm 0.5a | 0.2877 \pm 0.047a | 111.83 \pm 16.8a | 21.73 \pm 1.6a | 1.2357 \pm 0.6122a | 32.8 \pm 3.4a |

²⁾Means followed by same lowercase letters within the row are not significantly different (Tukey's Test, $p < 0.05$).

부산지역에서 곰솔에 대한 나무주사 후 에마멕틴벤조에이트 잔류량과 소나무재선충 증식수를 조사한 결과는 Table 5와 같았다. 흉고직경이 다른 두 처리에 비하여 유의하게 적었던(df=2, 6, F=16.23, P=0.0038) 심재와 변재 전체처리에서 잔류량이 가장 많았으며(df=2, 6, F=12.36, P=0.0074) 소나무재선충 증식수는 가장 적었으나 통계적 유의성은 없었다(df=2, 6, F=1.16, P=0.3743).

상주지역에서 잣나무에 대한 나무주사 후 에마멕틴벤조에이트 잔류량과 소나무재선충 증식수를 조사한 결과는 Table 6과 같았다. 변재부 처리에서 잔류량이 가장 적었으나 통계적 유의성은 없었고(df=3, 8, F=3.14, P=0.0872), 소나무재선충 증식수도 처리간에 차이가 없었다(df=3, 8, F=0.04, P=0.9872).

고 찰

나무의 수간을 통해 약제를 주입하는 수간주입의 효과는 다양한 요인들에 의해 영향을 받는데 수체 내 주입된 물질의 이동은 식물체 내에서 물의 이동통로를 통해 이루어지기 때문에 목질부의 구조나 특성에 영향을 받는다(Chaney, 1986). 소나무와 같은 겉씨식물은 통도세포가 헛물관으로 되어 있는 무공재인데 무공재는 물이 헛물관의 벽공을 통해 옆 세포로 이동하여 사선이동이 가능하나 이동속도가 느리다(Sinclair & Larsen, 1981; Chaney, 1986). 무공재에서 물의 이동은 가장 최근에 형성된 나이테 1~5개로 이루어지기 때문에 천공 깊이가 5 cm를 넘지 않는 것이 좋으나 수종별 변재비율의 차이를 고려하여야 한다(Cha et al., 2020).

우리나라 산림에 자생하고 있는 소나무재선충의 감수성 수종들의 변재량을 조사한 결과 수종에 따른 차이를 보였다. 잣나무의 변재량이 곰솔이나 소나무에 비해 50% 이상 적었으며 세 수종 모두 지역별로 변재량에 차이를 보였다. 지역별 변재량의 차이는 이들 수종들의 연륜생장량 차이에 의한 것으로 연륜변이는 기후의 영향을 많이 받는 것으로 알려져

있다(Koo et al., 2001; Jeon et al., 2021). 따라서 지역별로 다양하게 나타나는 기후변화 양상이나 미기상의 영향으로 연륜생장의 차이가 일어나기 때문에(Jeon et al., 2021) 소나무재선충이나 다른 산림병해충 방제를 위하여 수간주입을 할 경우 수목의 생장량 차이를 고려한 약제 주입을 위한 천공 깊이 설정이 필요하다. 따라서 지역별, 수종별 변재량의 차이를 고려하여 수간주입을 한 뒤 약제의 잔류량과 소나무재선충에 대한 효과를 검증하였는데 전체적으로는 약제의 주입 위치에 따른 잔류량의 차이나 약효의 차이가 통계적인 유의성은 없었다.

에마멕틴벤조에이트는 아바멕틴 계열의 천연물질에서 유래된 반합성 유도체로 응애나 나방류를 비롯한 각종 해충방제제로 이용되고 있으며 살선충 효과도 알려져 있는데 소나무재선충에 대해서도 효과가 있다(White et al., 1997; Bi et al., 2015; Cheng et al., 2015; Mokbel and Huesien, 2020). 특히 수간주입 효과도 있어 수목해충 방제뿐만 아니라 소나무재선충병 예방용으로 다양하게 활용되고 있다(Takai et al., 2000; Flower et al., 2015; Lee et al., 2021a, 2021b).

우리나라에서 소나무재선충병 예방을 위한 아바멕틴과 에마멕틴벤조에이트의 수간주입 시기는 중력식의 경우 11월에서 3월까지로 제시되어 있으나(Korea Forest Service, 2022) 10월부터 4월까지 중력식으로 수간주입 하였을 때, 처리 당해 년도의 에마멕틴벤조에이트 잔류량은 12월과 1월 처리에서 가장 많았고, 나머지 처리 월별로는 차이가 없었다(Lee et al., 2021a). 따라서 본 연구에서 2월말부터 3월 초순 사이에 수간주입을 시행 한 것은 시기적으로 적절하였고, 지역이나 수종별 변재길이를 기반으로 약제의 주입 부분을 다르게 하여 처리하였음에도 불구하고 처리별로 약제의 잔류량이나 소나무재선충 증식 밀도에 차이가 없었다. 이는 약제의 수간주입 위치가 약제의 수체 내 이동에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있으나 수간주입 약제의 잔류가 동일 나무 내에서도 높이나 위치별로 따라서도 차이가 있고(Takai et al., 2004; Lee et al., 2009a), 이로 인해 반복간의

잔류량 측정값이 오차범위가 큰 것(Kwon et al., 2021; Lee et al., 2021a; 2021b)을 고려하면 비록 통계적 유의성이 없더라도 소나무류와 같은 무공재 침엽수의 수분이동을 고려한 수간주입 천공위치 선정이 필요할 것으로 생각된다. 아울러 약제의 잔류량과 소나무재선충의 증식량 사이의 상관관계를 명확히 규명하기 위해서는 수간주입 후 가지별 잔류량과 증식량을 비교하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 아울러 수간주입 약제의 수체 내 이동 불균일성을 고려한 잔류분석용 시료 채취나 분석법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

야외조사에 도움을 주신 이승찬, 김종경님께 감사를 드리며 야외 조사에 도움을 주신 제주도과 거제시 관계자분들께도 감사를 드립니다. 본 연구는 2020년 국립산림과학원의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

Author Information and Contributions

Hyun-woo Kang, Jong-won Lee, Oh-Gyeong Kwon, Kyungpook National University, BS.

Ho-wook Lee, Jae-hyuk Choi; Kyungpook National University, graduated school student

Kwang-Soo Lee, Warm Temperature and Subtropical Forest Research Center, PhD.

Dong Soo Kim, Forest Biomaterials Research Center, PhD.

Jin Taek Kang, National Institute of Forest Science, PhD.

Chang-jun Lee, Forest Pests & Diseases Monitoring Headquarters, BS.

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

Research design; Lee KS, Kim DS, Kang JT, Lee CJ, Lee DW, Investigation; Kang HW, Lee HW, Choi JH, Lee JW, Kwon OG, Lee DW, Data analysis; Lee GS, Kang JT, Lee DW, Writing – original draft preparation; Lee DW, Writing – review and editing; Kang HW, Lee HW, Choi JH, Lee JW, Kwon OG, Lee KS, Kim DS, Kang JT, Lee CJ, Lee DW.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

- Bi Z, Gone Y, Huang X, Yu H, Bai L, et al., 2015. Efficacy of four nematicides against the reproduction and development of pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *J. Nematol.* 47(2):126-132.
- Carnegie A, Venn T, Lawson S, Nagel M, Wardlaw T, et al., 2018. An analysis of pest risk and potential economic impact of pine wilt disease to *Pinus plantations* in Australia. *Aust. For.* 81(1):24-36.
- 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.
- Cheng X, Liu X, Wang H, Ji X, Wang K, et al., 2015. Effect of emamectin benzoate on root-knot nematodes and tomato yield. *PLoS ONE* 10(10): e0141235.
- European and Mediterranean Plant Protection Organization, 2013. PM 7/4 (3) *Bursaphelenchus xylophilus*. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin.* 43(1):105-118.
- Flower CE, Dalton JE, Knight KS, Brikha M, Gonzalez-Meler MA, 2015. To treat or not to treat: diminishing effectiveness of emamectin benzoate tree injections in ash trees heavily infested by emerald ash borer. *Urban For. Urban Green.* 14(4):790-795.
- Jeon HG, Kim JK, Kim MY, Lee SG, Lee GS, et al., 2021. A study on the micrometeorology conditions affecting the growth of the *Pinus densiflora* forest. *J. Agricul. Life Sci.* 55(4):11-20.
- 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.
- Koo KA, Park WK, Kong WS, 2001. Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: effects of climate change on the growths. *The Korean Journal of Ecology.* 24(5): 281-288. (In Korean)
- Korea Forest Service and National Institute of Forest Science, 2021. Stem volume, biomass and stand yield table. National Institute of Forest Science, Seoul. Korea. (In Korean)
- Korea Forest Service, 2022. 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 Aug. 24, 2022)(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)
- Lee SM, Jung YH, Seo S, Kim DS, Lee DW, 2021a. 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, 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, 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)
- Mokbel E, Huesien A, 2020. Sublethal effects of emamectin benzoate on life table parameters of the cotton leafworm, *Spodoptera littoralis* (Boisd). Bull. Natl. Res. Cent. 44(155).
- SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- 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)
- Sinclair WA, Larsen AO, 1981. Wood characteristics related to "injectability" of trees. J. of Arboric. 7(1):6-10.
- 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., 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.
- Takeuchi Y, 2008. Host fate following infection by the pine wood nematode. In Pine wilt disease: Zhao, B. G., Eds; Springer, Japan. pp.235-249.
- White SM, Dunbar DM, Brown R, Cartwright B, Cox D, et al., 1997. Emamectin benzoate: a novel avermectin derivative for control of Lepidopterious pests in cotton. Proceedings of the Beltwide Cotton Conference. 2:1078-1082.
- Yano M, 1913. Investigation on the causes of pine mortality in Nagasaki prefecture. Sanrinkoho 4:1-14.
- Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y., 2008. Pine wilt disease. Springer, Tokyo, Japan. Pp.2-4.

소나무류에서 수간주입 시 약제주입 위치별에 따른 에마멕틴벤조에이트의 잔류량과 소나무재선충에 대한 효과

강현우¹ · 이호욱² · 최재혁² · 이종원² · 권오경² · 김동수³ · 이광수⁴ · 이창준⁵ · 강진택⁶ · 이동운^{1,2}

¹경북대학교 질병매개곤충학과, ²경북대학교 생태과학과, ³국립산림과학원 산림바이오소재연구소, ⁴국립산림과학원 난대·아열대 산림연구소, ⁵임업진흥원, ⁶국립산림과학원 산림 ICT연구센터

요 약 소나무(*Pinus densiflora*)와 잣나무(*P. koraiensis*), 곰솔(*P. thunbergii*)은 우리나라에 분포하는 소나무재선충의 감수성 수종들이다. 소나무재선충 피해를 예방하기 위하여 살선충제의 수간주입법이 이용되고 있다. 본 연구에서는 이들 수종들의 변재길이를 지역별로 조사하였다. 아울러 약제의 수간주입 위치(변재부, 변재와 심재부 사이, 변재와 심재부 전체, 변재부 사선 주입)별에 따른 약제 잔류량과 소나무재선충 증식수를 조사하였다. 3년생 가지를 대상으로 소나무재선충 접종 후 증식량을 조사하였으며 잔류분석도 수행하였다. 변재부 길이는 수종과 지역에 따라 차이가 있었다. 반면 약제의 수간주입 위치별에 따른 잔류량과 소나무재선충 증식수는 차이가 없었는데 처리 대상 나무별에 따라 차이가 많았다.

색인어 변재, 방제효과, 살선충제, 선충 밀도, 심재