



곤리도 소나무재선충 자연 발생지 곰솔림에서 수간주입용 살선충제의 효과와 지속성

이상명¹ · 정영학¹ · 이동운^{2,3*}

¹(주)에스엠바이오비전, ²경북대학교 곤충생명과학과, ³경북대학교 질병매개무척추동물연구소

Effectiveness and sustainability of nematicides used against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in the black pine (*Pinus thunbergii*) forest in Gonrido, Korea

Sang-myeong Lee¹, Young-hak Jeong¹ and Dong-woon Lee^{2,3*}

¹SM Biovision Co., Jinju, Korea

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

(Received Jun. 17, 2024. Revised Jun. 20, 2024. Accepted Jun. 20, 2024)

Abstract The most significant tree disease found in Korean forests is pine wilt disease caused by the pine wilt nematode (PWN, *Bursaphelenchus xylophilus*). The only practical means available to prevent pine wilt disease is tree injection of pesticide. Over a period of three years, in a natural occurring forested area, this study investigated the effects of single and mixture formulations of Abamectin and Emamectin benzoate, which are used as nematicides for tree injection. Emamectin benzoate, single and mixture formulation, was more than 90% effective in controlling PWN over a three year period, and no difference was demonstrated between effectiveness of single and mixture formulations. The number of dead pine trees identified in the actual forest was higher than the number of dead pine trees extracted from the drone photo, and this trend showed that the difference increased as the number of dead trees increased. Since there is a difference in the number of trees actually killed in the field compared to the number extracted when calculating trees damaged by PWN using drone images, it is thought that this should be considered when planning surveillance or control. When registering a tree injection nematicide to prevent PWN disease, it is proposed that a survey be conducted after two or three years to determine overall pesticide effectiveness.

key words: Abamectin, dead tree, drone, emamectin benzoate, mixture formulation

서 론

이동성 내부기생 선충인 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 원산지인 북미지역에서는 소나무류에 피해를 주지 않지만 침입지역인 한국을 비롯한 일본이나 중국에서는 소나무에 심각한 피해를 유발시키고 있어 학문적 경제적으로 중요한 세계 10대 식물 기생성 선충으로 간주되고 있다(Jones et al., 2013). 소나무재선충에 의한 피해는 목재로서의 가치 손실로 인한 직접적인 손실 이외에도 피해목 제거나

복구에 수반되는 비용과 같은 다양한 경제적 피해를 유발시키며 서식지 손실이나 생물다양성에도 직·간접적 피해를 유발시킨다(CABI Compendium, 2022; Hong and Lee, 2015). 1982년 Nanjing에서 소나무재선충 피해가 최초 발생한 중국은 이후 피해지역이 확대되었는데 1998년부터 2017년까지 중국에서 연평균 직접 경제 손실은 15억 3천만 위안, 간접 경제 손실은 56억 4천만 위안으로 총 경제 손실은 71억 7천만 위안이었다(Zhao et al., 2020). 우리나라에서도 1988년 소나무재선충에 의한 소나무류 피해가 최초 확인된 이후 피해가 확산되어 2003년부터 2005년까지 방제비용으로 년 평균 1,000억원 이상이 투입되고 있다(Shin, 2008).

*Corresponding author
whitegrub@knu.ac.kr

소나무재선충병에 의한 직·간접적 피해가 매우 심각하기 때문에 이를 방제하기 위한 다양한 방법들이 활용되고 있는데 감염목을 제거하는 피해 후 처리 방법과 예방 방제법으로 대별할 수 있다. 전자의 경우 감염목을 벌채하여 파쇄나 소각, 매립 하는 방법과 벌채 후 살충이나 살선충 훈증제를 처리하는 방법 등이 있고, 후자의 경우 매개충 발생 시 지상방제나 항공방제를 통해 매개충을 방제하는 방법이다. 또한 소나무재선충에 저항성 나무를 육종하거나 소나무재선충 감염 이전에 약제나 물질을 투입하여 이후 침입하는 소나무재선충의 증식을 억제시키는 예방나무주사 방법도 있다(Kamata, 2008). 이들 중 수간에 구멍을 뚫고, 약제를 수입하는 나무주사는 지상이나 항공방제와는 달리 강우나 바람과 같은 환경적 요인에 의한 영향을 배제할 수 있고, 약제가 수체 내에 있어 다른 비표적 생물에 대한 악영향이 없어(Cha et al., 2020; Kamata, 2008) 조경수와 같은 생활권 수목을 비롯하여 보호수, 경제적 가치가 높은 수목류 등에 안정적으로 적용할 수 있는 방법이다. 또한 우리나라에서는 산림에서도 소나무재선충병의 확산을 억제하기 위한 예방 방제적 측면에서 주로 이용되고 있는 방법이다. 살선충 물질의 수간주입에 의한 소나무재선충 방제와 관련된 연구는 2000년대부터 주로 이루어졌는데 Takai et al. (2000)이 58종의 살선충 활성 후보 물질을 이용하여 실내검정을 통해 Emamectin benzoate와 Ivermectin, Abamectin 등의 후보물질을 도출하였고, 이후 야외검정을 통해 Emamectin benzoate의 실제적 적용 가능성을 입증하였다(Takai et al., 2004). 우리나라에서는 2004년 Abamectin과 Emamectin benzoate, Fosthiazate, Morantel tartrate를 이용한 소나무재선충에 대한 야외생물검정이 처음으로 수행된 이래 처리시기나 천공수, 나무주사 시 천공 직경, 제형별 효과 등에 대한 연구가 수행되었다(Kwon et al., 2021; Lee et al., 2009; 2021a; 2021b).

소나무재선충병 예방나무주사용 약제의 생물검정은

중력식의 경우 12~2월, 가압식의 경우 3~4월에 나무주사를 하고, 소나무재선충의 매개충 발생시기를 고려하여 4~6월에 소나무재선충을 접종 한 뒤 3~6개월 후에 피해율을 조사한다(RDA, 2017). 그러나 우리나라에서 소나무재선충병 예방나무주사용 살선충제로 이용되고 있는 Abamectin과 Emamectin benzoate의 경우 2~3년간 효과가 유지된다는 선행 연구 결과(Lee et al., 2009; 2023c)들이 있음에도 불구하고 나무주사 당년에 효과조사를 실시하여 매년 나무주사를 하게 되어 있다. 나무주사는 나무에 천공을 하여 약제를 주입하기 때문에 천공부위가 유합되지 않고, 상처로 남아있기 때문에 천공구의 수를 최소화하는 것이 필요한데(Cha and Yun, 1995; Cha et al., 2020) 약제의 지속기간이 길거나 주입되는 약량이 적을 경우 천공 수나 깊이를 짧게 할 수 있어 나무에 불필요한 상처를 줄일 수 있으며 약제 처리의 노동력도 줄일 수 있다.

소나무재선충 나무주사 관련 생물검정 연구는 대부분 흉고직경 10 cm미만의 조경수를 대상으로 수행되었고(Lee et al., 2009; 2023c), 자연림에서 수행하더라도 2년동안의 소나무재선충 방제 효과만 검토되었다(Lee et al., 2009). 본 연구는 선행 연구에서의 이러한 제한점들을 보완하기 위하여 소나무재선충의 인위적 유입이 차단되는 도서지역을 대상으로 Abamectin과 Emamectin benzoate 단제와 합제의 효과를 3년간 조사하였다. 또한 소나무재선충 피해지에서 예찰용으로 활용되고 있는 드론 영상을 기반으로 한 피해목 조사법의 실용성 검토를 위하여 드론 영상에서 추출된 고사목 수와 현장 조사를 통한 실제 고사목 수를 비교 조사하였다.

재료 및 방법

시험지

수간주입 약제별에 의한 소나무재선충병 방제효과를 평가하기 위하여 외부 요인으로부터 격리된 지역이면서

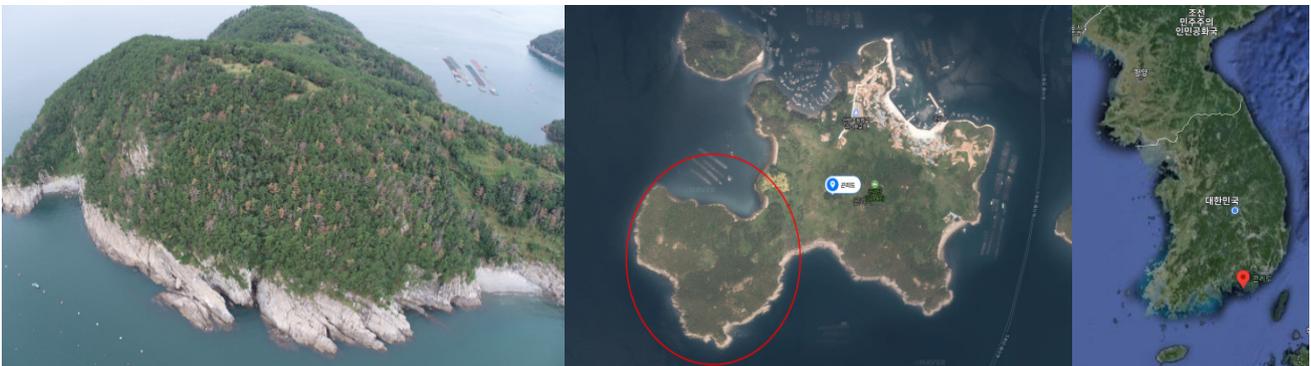


Fig. 1 Experimental site.

소나무재선충병 발생이 심한 경남 통영시 산양읍 곤리에 위치한 곤리도의 곰솔림(14 ha)에서 2021년부터 연구를 수행하였다(Fig. 1). 각 약제별 소나무재선충병 방제 효과를 평가하기 위하여 2 ha씩 총 7구역으로 나누어 연구를 수행하였다(Fig. 3).

수간주입 전 시험지 내 소나무재선충병 피해목 조사

나무조사 전 각 처리구별 임내에 발생한 소나무재선충병 감염목을 전수 조사하였다. 감염된 나무는 개별 표식한 뒤 GPS 좌표를 기록하였으며, 피해목 누락 방지를 위해 드론 영상 촬영을 병행하였다. 조사에 이용한 드론은 팬텀4 RTK(20 mp 전용 카메라)를 이용하여 각 처리구별로 영상을 촬영하였고, 정사사진을 통해 피해목을 색출한 다음 영상자료에 기반하여 현장 육안 조사를 병행 하였다. 영상 촬영을 위한 드론의 비행고도는 100~120 m, 비행속도는 8~10 m/s였고, 촬영 중 · 횡 중복율은 각각 80%로 설정한 뒤 자동비행프로그램(mission planner)을 이용하여 촬영하였다. 그리고 감염목에서 소나무재선충 유무를 조사하기 위해 주간의 목편을 채취하여 깔대기법으로 분리한 다음 현미경으로 검경하였다.

수간주입

소나무재선충병 방제를 위하여 사용한 수간주입 약제로는 아바멕틴 미탁제(권장량, 배량)와 에마멕틴벤조에이트 미탁제(권장량, 배량) 단제와 살선충제와 매개충 방제용 혼합제인 아세타미프리드 · 에마멕틴벤조에이트 액제와 아세타미프리드 · 에마멕틴벤조에이트 분산성액제를 사용하였다(Table 1). 각각의 시험구 내에 있는 곰솔들에 대한



Fig. 2 Drilling and nematicide trunk injection (right), and appearance after injection (left).

흉고직경을 직경자를 이용하여 측정하고, 각각의 나무들에 대해 라벨테이프를 표식 하였다. 각 시험구 내 수간주입 처리 나무들의 흉고직경은 12~56 cm로 다양하였는데 평균흉고직경은 Table 1과 같았다. 약제 수간주입은 2021년 2월 18일~2월 23일까지 5일간 처리하였으며 약제 주입 방법은 Lee et al. (2009)의 방법에 따라 처리하였다. 기계식 등짐 천공기를 이용하였는데 직경 10 mm, 길이 10 cm 드릴 날을 사용하여 천공한 후 천공구에 직접 약제를 주입하였고, 천공구는 밀폐하지 않았다(Fig. 2).

수간주입 방제 효과 조사

약제 별 수간 주입 방제 효과 조사는 수간주입 당해 년도 효과는 2011년 10월부터 이듬해 3월까지 월 1회(10월 29일, 11월 24일, 12월 30일, 1월 27일, 2월 28일, 3월 31일) 드론을 이용하여 고사목의 위치를 1차적으로 확인하고, 2차적으로 해당 영상지역을 직접 다니면서 육안으로 병징을 확인하였다.

수간 주입 2차년도 효과조사는 2022년 10월 31일, 12월 30일, 2023년 3월 28일에 수행하였고, 수간주입 3년차 효과는 2023년 10월 30일, 11월 30일, 12월 27일에

Table. 1 Treatment and test area overview

Treatment [Cord]	Situation of dead trees in the test plot before treatment/2 ha			Number of trees to be treated/2 ha	Average diameter at breast height (DBH) of treated trees (cm)
	No. of dead tree	No. of trees detected with PWN	PWN detection rate (%)		
Abamectin (Ab) 1.8% micro-emulsion recommendation rate (1 mL/DBH) [I]	114	48	42.1	1,747	19.9
Ab 1.8% micro-emulsion double rate (2 mL/DBH) [II]	87	38	43.7	1,280	18.4
Emamectin benzoate (Eb) 2.15% micro-emulsion recommendation rate (1 mL/DBH) [III]	29	17	58.6	1,804	17.3
Eb micro-emulsion recommendation rate (2 mL/DBH) [IV]	92	44	47.8	1,423	19.5
Acetamiprid·Eb (8+2)% dispersible concentration recommendation rate (1 mL/DBH) [V]	35	12	34.3	896	24.3
Acetamiprid·Eb (10+6)% soluble concentration recommendation rate (1 mL/DBH) [VI]	31	18	58.1	1,112	20.9
Control [VII]	52	25	48.1	1,802	17.8

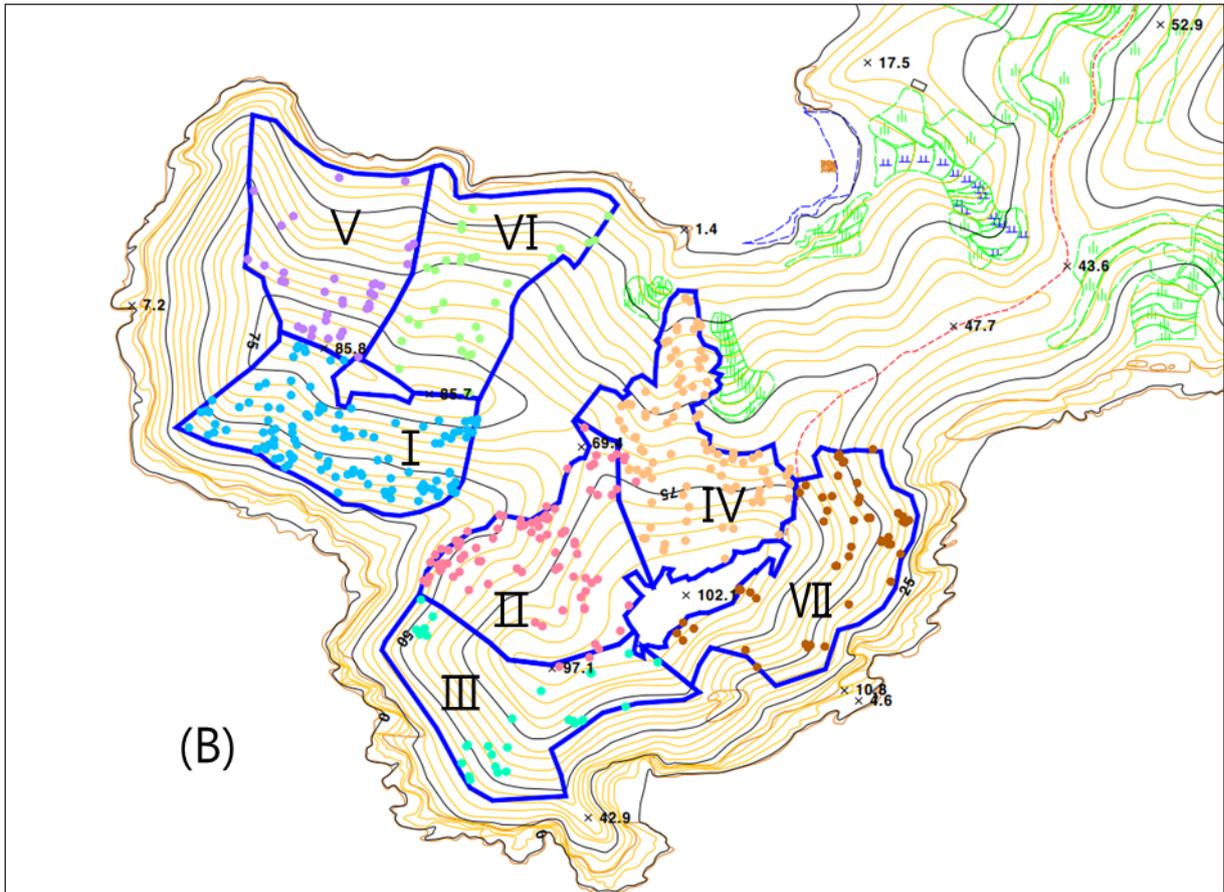


Fig. 3. Current status of dead pine trees in the test plot before trunk injection. I-VII; referred from Table 1. Each circular dot represents a dead tree.

조사하였다. 육안 조사를 통해 잎 처짐이 진행중인 나무만을 피해목으로 간주하여 계수하였다. 수간주입 처리 전 고사목에 대한 소나무재선충 감염 여부는 목편 시료를 채취한 후 갈데기법으로 선충을 분리하여 직접 현미경으로 검경을 통해 감염 여부를 판단하였으나 나무조사 후 재선충 피해목 여부는 잎이 처지면서 마름 증상을 나타내는 일반적 피해 증상(Choi et al., 2022; Lee et al., 2023c)으로 판단기준으로 적용하였다. 소나무재선충의 감염여부를 목편 조사를 병행하지 않은 이유는 목편 시료의 채취 부위나 소나무재선충 감염 후 채취 시기에 따라 목질부 내에서 검출 유무에 차이가 생기기 때문에(Choi et al., 2022; Kim et al., 2012) 소나무재선충 감염목의 병징만으로 판단하였다.

드론 정사 사진 추출 영상 내 고사목 수와 현장조사 고사목 수 비교

약제 별 수간 주입 방제 효과 조사를 위하여 무처리구에서 촬영 된 영상 자료 내 고사목 수와 영상 자료에서 확인 된 좌표 지점 현장을 방문하여 고사목 수를 조사하여 영상 속 고사목

수와 현장의 고사목 수를 비교하였다. 약제 효과 평가를 위해 설정한 무처리구 시험지에서는 2021년 10월과 11월, 12월에 영상촬영 후 현장 조사를 수행하였고, 2022년과 2023년에는 10월과 12월 두 차례 조사하였다. 2022년부터는 기존의 시험구에 설정된 무처리구 이외에 두 지역을 추가로 선정하여 10월과 12월에 드론 촬영 시 영상에서 추출된 고사목 수와 입내 현장 조사지에서 확인 된 고사목 수와의 차이를 비교하였다.

통계분석

본 연구는 소나무재선충 예방 나무조사 약제별 효과 검증을 위한 실증시험으로 수행하여 각 처리별로 2 ha 크기 시험구 내에 년중 발생하는 고사목의 수를 무처리구와 비교하여 효과를 검증하였다. 본 연구에 사용한 아바멕틴이나 에마멕틴 벤조에이트의 경우 약효 지속기간에 대한 편차가 있으나 Takai et al. (2003)의 선행연구에서 3년간 효과의 지속성이 검증 된 바 있고, 본 연구의 결과에서도 무처리 대비 방제가는 3년간 유지되었다. 따라서 수간주입 후 1년차에서 3년차까지

매년 방제가의 평균값을 이용하여 처리별 방제효과를 Tukey test로 분산분석 하였다. 드론 정사 사진에서 추출된 소나무 고사목 수와 임내 현장 조사에서 확인된 고사목 수의 비교는 (임내 현장 조사에서 확인된 고사목 수-드론 영상에서 확인된 고사목 수)를 paired-T test로 쌍체비교하였다(SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011). 또한 소나무재선충 피해 고사목의 조사시기별(1차 조사-10월, 2차 조사-12월)에 따른 차이는 Tukey test로 분산분석하였으며 동일 조사지 내에서 1차 조사와 2차 조사 시기간 고사목 수의 차이는 paired-T test로 쌍체비교하였다(SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011).

결 과

수간주입 약제 처리구별 소나무재선충병 방제효과를 수간주입 한 당해 10월부터 이듬해 3월까지 월 1회 조사한 결과, 약제 처리구에서는 고사목의 수가 약제 처리 전에 비해 크게 감소하였다(Table 2, Fig. 4). 아바멕틴 권장량 처리구에서 감염목이 17본 발생하여 타 처리에 비해 76.9%의 낮은 방제가를 보였으나 에마멕틴벤조에이트 권장량 처리구나 에마멕틴벤조에이트 합제 처리구에서는 94.5%이상의 높은 방제가를 나타내었다.

수간주입 후 소나무재선충에 대한 2년차 약효 지속 효과를 조사한 결과, 약제 처리구에서 소나무재선충병에 대한 예방효과가 높게 나타났다(Table 2, Fig. 5). 아바멕틴 정량 처리구에서만 85.1%의 방제가를 나타내었고, 나머지

처리구에서는 90%이상의 방제가를 나타내었다.

수간주입 후 소나무재선충에 대한 3년차 약효 지속 효과를 조사한 결과, 수간주입 처리구에서는 아바멕틴 권장량 처리구를 제외하고 90%이상의 방제가를 나타내어 소나무재선충병에 대한 예방효과가 지속되는 것으로 나타났다(Table 2, Fig. 6). 무처리구에서는 150본의 고사목이 발생하여 9.6%의 고사주율을 보였다.

전체적으로 아바멕틴 기준량 수간주입 처리구를 제외한 전체 약제 주입 처리구에서 3년동안 년 평균 93%이상의 방제가를 나타내었는데(Table 2, df=5,12, F=5.07, P=0.0089) 특히 에마멕틴벤조에이트 미탁제 정량 처리와 배량 처리구에서는 2년차부터 감염목이 거의 발생하지 않아 가장 높은 방제효과를 보였다(Table 2). 합제 처리구에서도 두 약제 모두 90% 이상의 방제 효과를 나타내었는데 에마멕틴벤조에이트 함량이 높은 아세타미프리드·에마멕틴벤조에이트 액제 처리구에서 상대적으로 더 높은 방제 효과를 나타내었다(Table 2). 따라서 소나무재선충 예방 나무주사 시 단계나 합제를 사용할 경우 에마멕틴벤조에이트가 함유된 약제를 나무주사하면 3년 동안 안정적으로 소나무재선충병을 방제할 수 있을 것으로 판단되며 단계와 합제간 방제효과는 차이를 보이지 않았다.

드론 영상을 통해 추출된 고사목 수와 드론 영상의 고사목 위치를 기반으로 실제 임내에서 고사목 수를 조사한 결과는 드론 영상에서 추출된 고사목 수에 비하여 임내에서 확인된 고사목 수가 많았고 통계적으로 차이를 보였다($P > |t| = 0.0044$)(Fig. 7).

Table. 2 Control effect of different trunk injection nematicides in black pine forests, natural habitat for pine wood nematode in Gonrido island

Treatment [Code]	Number of treated trees /2 ha	Number of dead tree (control efficacy, %)			Annual average corrected control efficacy (%) ± SD
		1'st year	2'nd year	3'rd year	
Abamectin (Ab) 1.8% micro-emulsion recommendation rate (1 mL/DBH) [I]	1,747	17 (76.9)	24 (85.3)	25 (84.7)	82.3±4.7 ^a b
Ab 1.8% micro-emulsion double rate (2 mL/DBH) [II]	1,280	6 (88.9)	0 (100.0)	3 (97.5)	95.5±5.8a
Emamectin benzoate (Eb) 2.15% micro-emulsion recommendation rate (1 mL/ DBH) [III]	1,804	2 (97.4)	1 (99.4)	0 (100.0)	98.9±1.4a
Eb micro-emulsion recommendation rate (2 mL/DBH) [IV]	1,423	8 (86.7)	0 (100.0)	0 (100.0)	95.6±7.7a
Acetamidrid·Eb (8+2)% dispersible concentration recommendation rate (1 mL/DBH) [V]	896	2 (94.5)	5 (94.1)	8 (90.6)	93.1±2.1ab
Acetamidrid·Eb (10+6)% soluble concentration recommendation rate (1 mL/DBH) [VI]	1,112	2 (95.7)	4 (96.2)	2 (98.1)	96.7±1.3a
Control [VII]	1,802	76 (0.0)	163 (0.0)	150 (0.0)	-

^{a)}Means followed by same lowercase letters within the column are not significantly different (Tukey test, p<0.05).

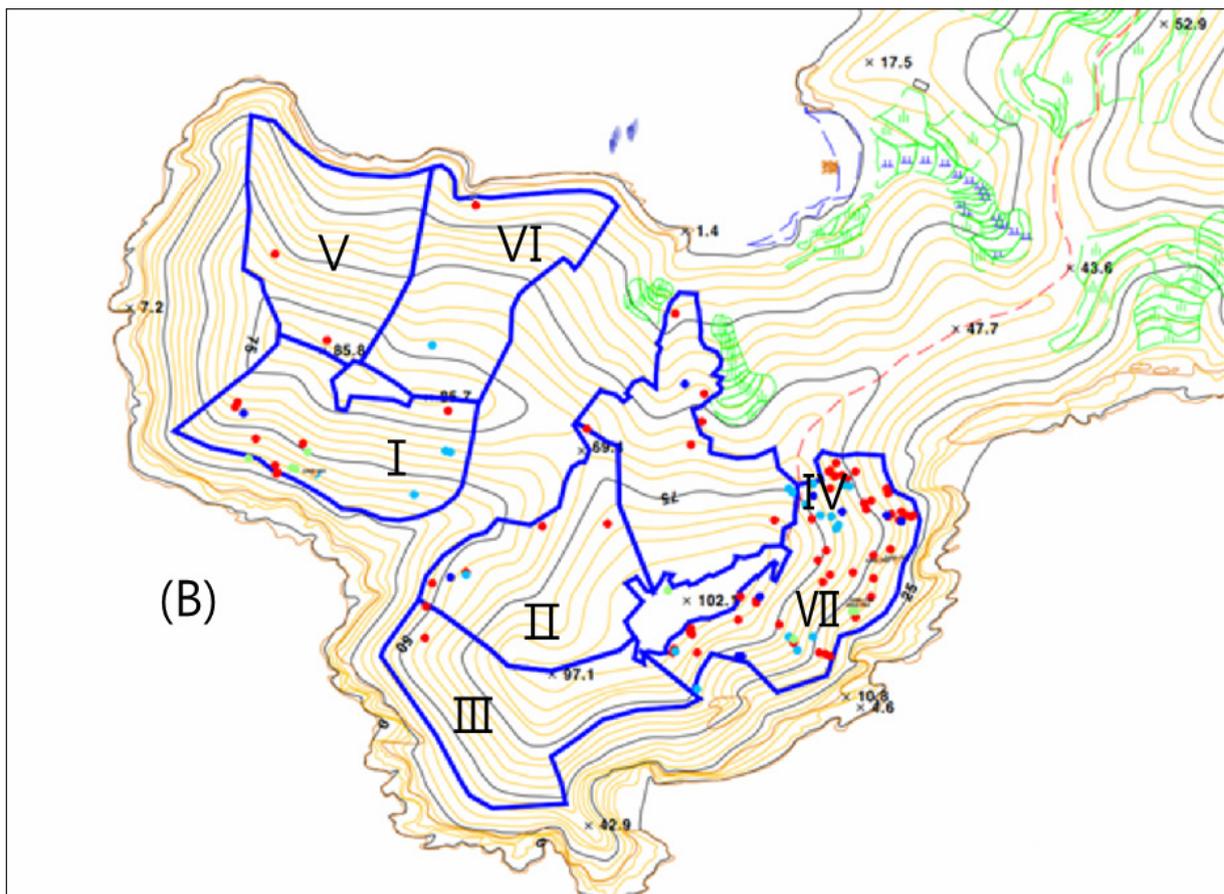
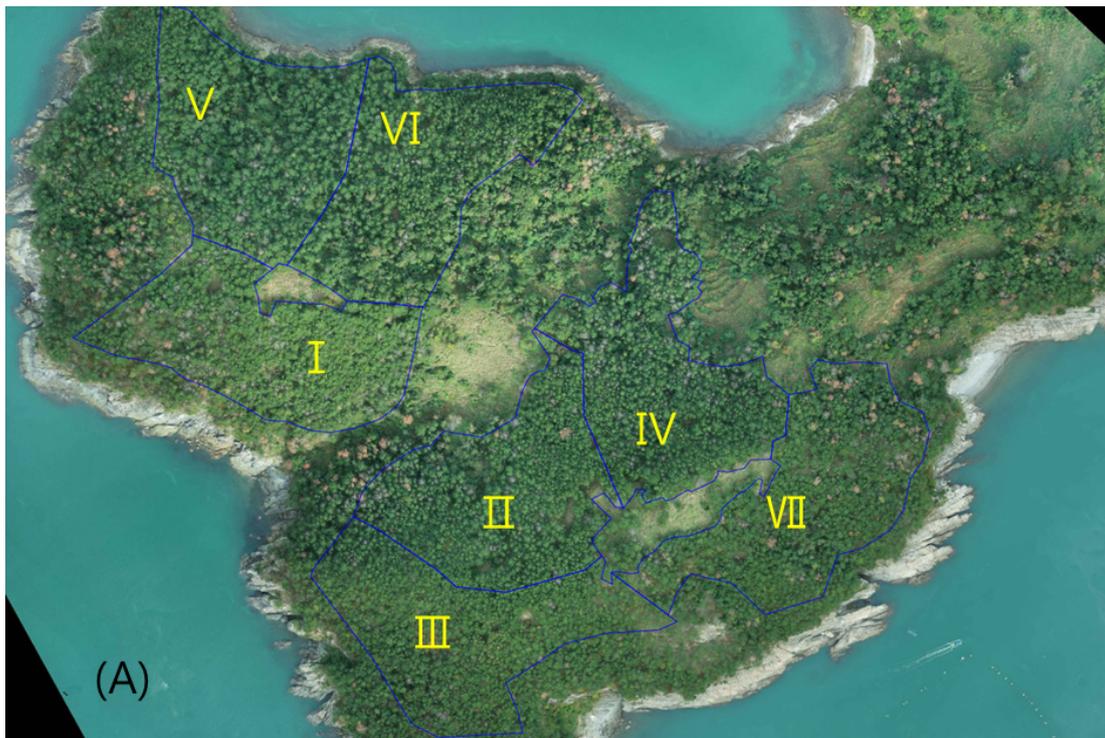


Fig. 4 Current status of dead trees in the test plot in the first year of trunk injection. (A); drone photo, (B); confirmation point on the ground. I-VII; referred from Table 1. Each circular dot represents a dead tree.

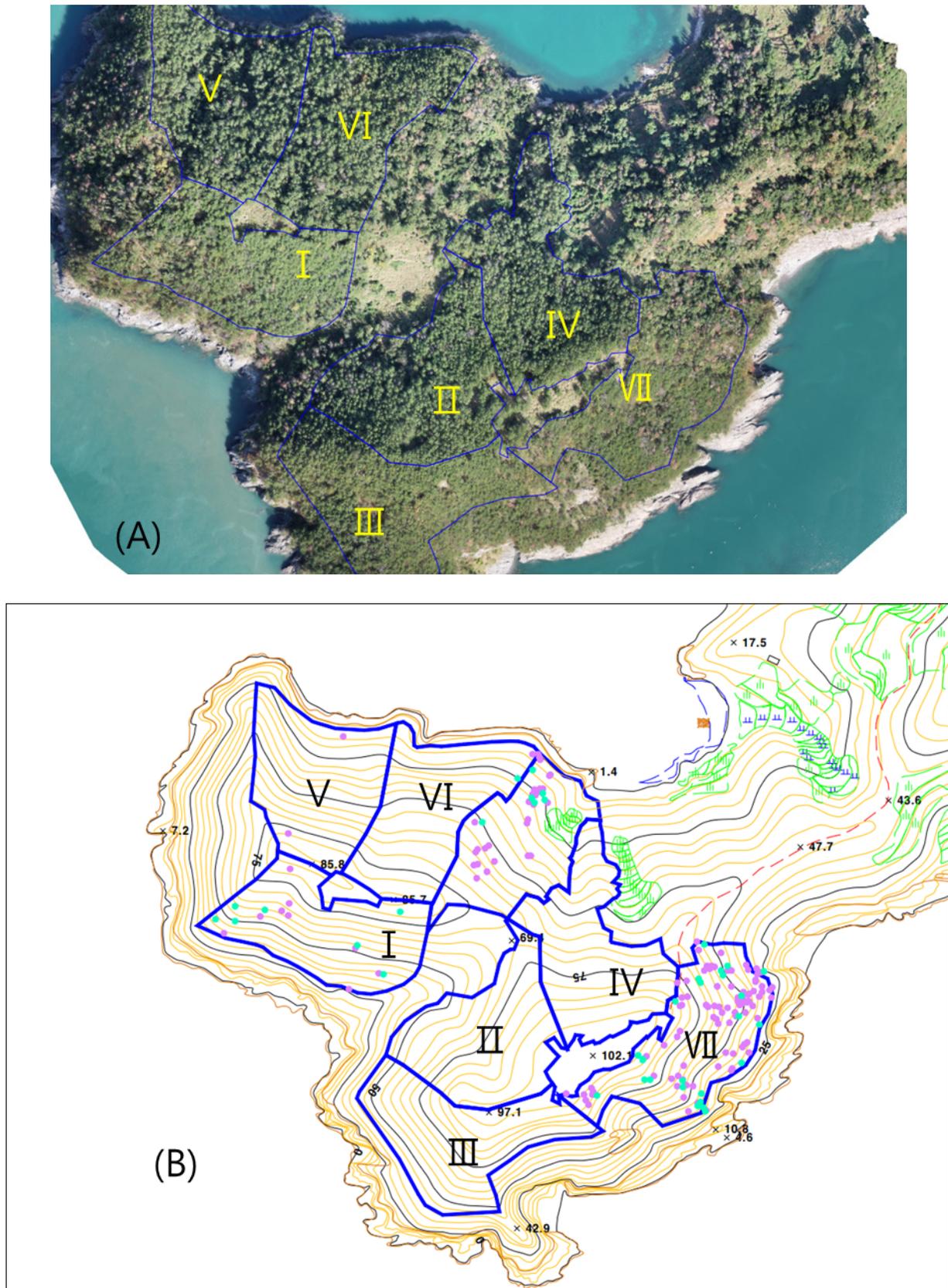


Fig. 5 Current status of dead trees in the test plot in the second year of trunk injection. (A); drone photo, (B); confirmation point on the ground. I-VII; referred from Table 1. Each circular dot represents a dead tree.

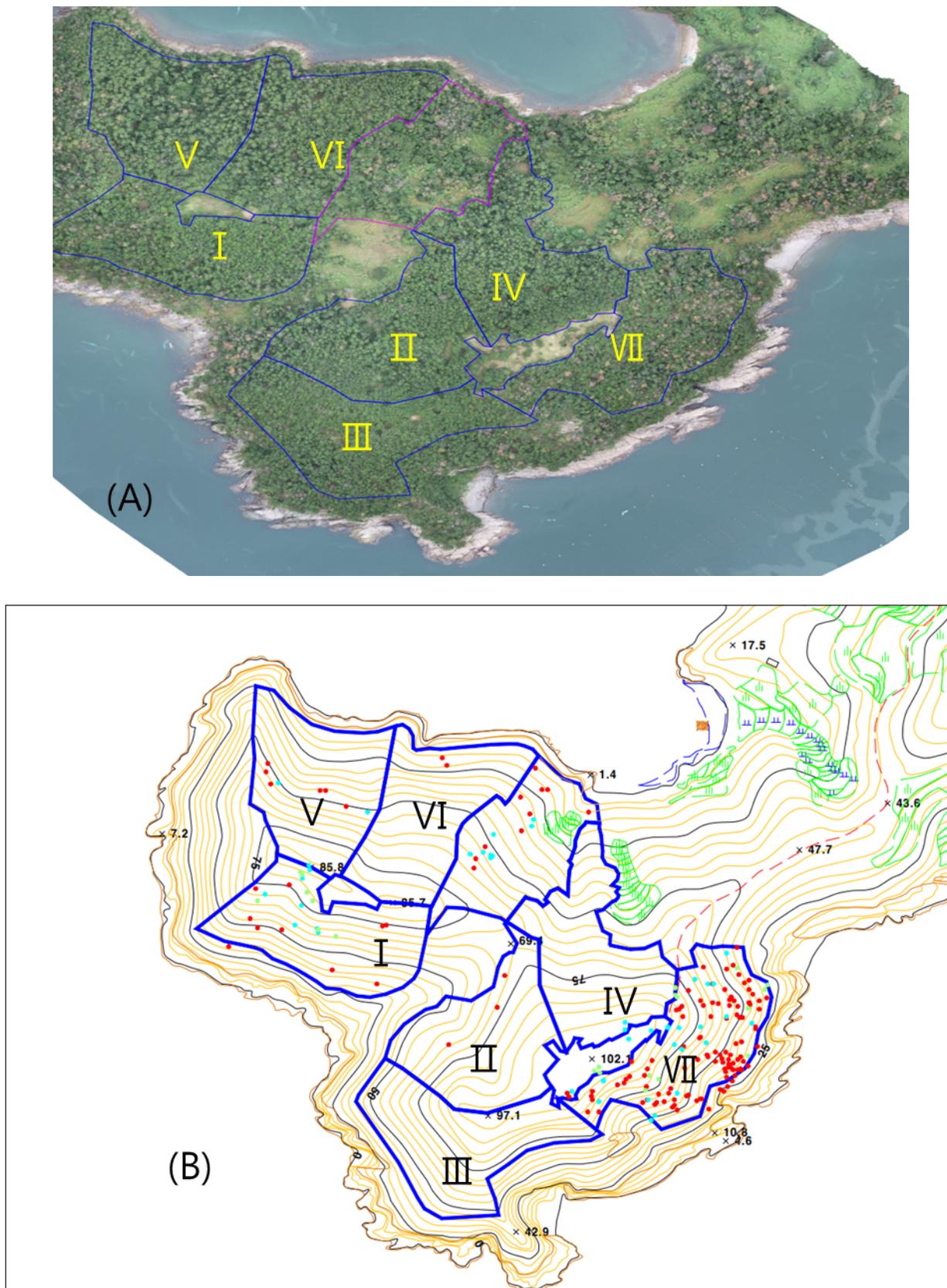


Fig. 6 Current status of dead trees in the test plot in the third year of trunk injection. (A); drone photo, (B); confirmation point on the ground. I-VII; referred from Table 1. Each circular dot represents a dead tree.

Table. 3 Number of dead black pine trees extracted from drone photo and number of dead pine trees confirmed in actual survey in Gonrido island

Survey period	Number of dead black pine tree in (mean ± SD)	
	Drone photo	Actual survey
1 st (October)	55.0±34.8 ^{a)}	74.7±50.5a
2 nd (December)	17.1±13.6b	24.6±19.7b

^{a)}Means fo

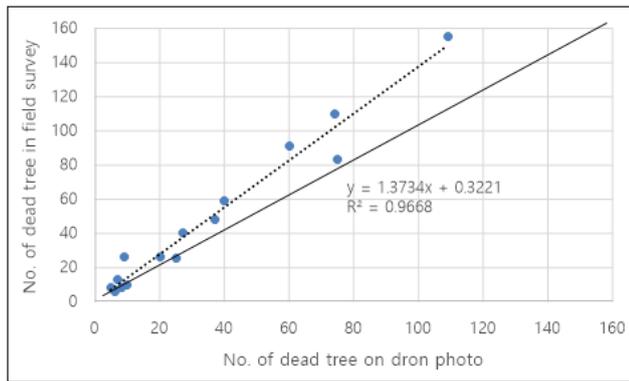


Fig. 7. Difference between the number of dead pine trees extracted by drone imaging and the number of dead pine trees confirmed in actual investigation. The diagonal line is the trend line for the difference between the two data and the solid line is an imaginary line when there is no difference between the two data.

전체적으로 고사목 수가 많을수록 드론 영상에서 추출된 고사목 수에 비해 실제 임내에서 확인 된 고사목의 수가 증가되는 경향을 보였다(Fig. 7).

소나무재선충 감염 증상을 보이면서 고사한 곰솔의 수는 10월의 1차 조사와 12월의 추가 조사간에 차이를 보였다(Table 3). 드론 영상에서 추출된 고사목 수는 10월 조사에 비해 12월 조사에서 37.9±9.4그루 적었는데(df=1, 12, F=7.18, P=0.02) 동일 지역 내 고사목 수를 비교한 쌍체비교에서도 통계적 차이를 보였다(Pr>|t|=0.007). 임내 현장 조사의 결과도 동일한 경향을 보여 10월 조사에 비하여 12월 조사 시 50.1±12.1그루 적었는데(df=1, 12, F=5.99, P=0.0307) 동일 지역 내 고사목 수를 비교한 쌍체비교에서도 통계적 차이를 보였다(Pr>|t|=0.006).

고 찰

본 연구는 기존의 소나무재선충 예방 나무주사 약제의 효과 검증 시 인위적으로 소나무재선충을 접종하여 효과를 평가하였으나 소나무재선충의 자연 발생지에서 자연발생에 의한 효과를 3년 동안 조사한 최초의 연구였는데 무처리구에서 고사목 발생율은 1년차에 4.2%, 2년차에

9.4%, 3년차에 9.6%로 매년 증가하는 경향을 보였다. 자연 발생지에서 방제를 하지 않고 방치 할 경우 고사목 발생의 경과를 개략적으로 유추 해 볼 수 있는 자료로 판단되는데 소나무재선충 자연 발생지에서 년도별 피해목의 변동 경과를 실제적으로 평가한 결과는 없다. 이는 소나무재선충병은 발생 시 모든 나라에서 대부분 방제작업을 하기 때문에 실제적인 피해 경과나 피해량 변화를 과학적으로 입증할 수 있는 시험을 수행하기 어려운 현실 때문으로 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 매개충의 이·출입이나 인위적 전파가 차단되어 있는 도서지역을 대상으로 3년간 조사하였는데 1년차에 비하여 2년차에서는 두 배정도 많은 피해목이 발생하였다. 경남 진주지역 소나무재선충 자연 발생지에서 2004년 연구의 경우 1년차에는 11.7%의 소나무재선충 감염목이 발생하였으나 2년차에는 19.0%의 감염목이 발생하였다(Lee et al., 2009)

소나무재선충병의 확산은 임상의 구조나 매개충의 밀도, 매개충 이동이나 소나무재선충의 감염 이후의 온도나 강수 등 여러 인자에 의해 영향을 받을 수 있다(Park et al., 2018; Shim et al., 2021). 따라서 곤리도에서 수행한 본 연구의 결과를 단편적으로 모든 소나무재선충 피해지에 대해 피해 예측 자료로 활용하는 것은 제한점이 있겠지만 소나무재선충병 발생지를 방치하였을 경우 연차 별로 피해목 발생이 증가될 것으로 예상된다. 따라서 소나무재선충병 발생지를 무방제 상태로 방치하는 것은 기존 소나무림의 급격한 손실을 유발시킬 것으로 판단된다.

시험에 사용한 나무주사 살선충제들 중 Abamectin에 비하여 Emamectin benzoate의 효과가 3년 동안 안정적으로 유지되었다. 제조사나 제형별에 따른 소나무재선충 나무주사 살선충제의 효과를 2년간 연구한 결과에서도 Emamectin benzoate의 경우 유탁제 1종을 제외하고는 2년간 96.7%이상의 방제가를 보였으나 Abamectin의 경우 7종의 시험 약제 모두에서 Emamectin benzoate에 비해 낮은 방제가를 보였으며 높은 엽변색율을 보였다(Lee et al., 2023c). Emamectin benzoate의 경우 일본의 6개 지역 곰솔이나 소나무에서 소나무재선충에 대한 예방 나무주사 효과 검증에서도 모든 지역에서 3년동안 91% 이상의 방제효과를 보였고(Takai et al., 2003), 우리나라에서도

3년간 효과가 지속되었다(Kwon et al., 2021). 한편 소나무재선충과 매개충을 동시 방제하기 위해 사용되는 Emamectin benzoate와 살충제 혼합제의 경우 Emamectin benzoate 단제에 비해 효과가 높지 않았는데 실내 실험에서도 소나무재선충에 대한 살선충 활성이나 증식억제력이 합제가 단제에 비해 효과가 낮았다(Lee et al., 2022). 수간주사용 Abamectin의 경우 단제가 합제에 비하여 소나무재선충에 대한 살선충 활성이나 활동억제력이 우수하였는데 두 살선충제 모두 단제간에도 제조사별에 따라 효과에 차이가 있었다(Lee et al., 2023a; 2023b). 따라서 소나무재선충병 예방 나무주사 시 emamectin benzoate를 사용하면 3년 동안 효과가 지속되기 때문에 현재의 등록기준과 같이 1년 단위의 나무주사는 불필요할 것으로 판단되며 향후 소나무재선충병 예방 나무주사의 시험방법을 나무주사 후 2~3년차에 소나무재선충을 접종 한 뒤 효과를 평가하는 것을 제안한다.

드론과 같은 무인항공기는 원격탐사 기술과 데이터 처리 속도의 개선으로 사용자가 원하는 시기에 사람이 직접 접근하기 어려운 곳에도 신속하게 공간적 정보를 취득할 수 있는 장점이 있어 농작물 작황 분석이나 각종 병해충 발생과 피해 분석 등의 다양한 농업분야나 산림분야에 접목되어 이용되고 있다(Lehmann et al., 2015; Park et al., 2015). 근래에는 소나무재선충병 의심목을 탐지하는 곳에도 다양한 연구들이 시도되고 있다(Lee et al., 2019; Sun et al., 2022).

드론 영상에서 추출된 고사목 수에 비하여 실제 임내에서의 고사된 소나무의 수가 평균 42.9%가 많았다. 이는 임내에 분포하는 소나무의 수고 차이가 있어 아래쪽에 고사된 나무가 겹쳐져 있는 것이 영상으로 판별이 되지 않거나 여러 고사목이 겹치게 발생하여 고사목 수를 영상에서 정확히 분리할 수 없는 경우 또는 영상 촬영 시기에 이미 솔잎이 떨어져 갈변화된 색의 차이로 고사목을 추출하는 영상 판별 시스템을 적용시키지 못할 경우가 생기는 등의 변수가 존재하기 때문으로 생각된다. 강원도 춘천지역의 소나무재선충 피해지에서 무인항공기를 이용한 고해상도 영상을 획득하고, ANN과 SVM을 사용하여 감독 분류를 수행하여 토지피복도를 작성한 뒤 정확도를 계산한 결과 80%이상의 정확도가 산출되었으며(Lee et al., 2019), 중국에서 UAV 원격탐사 기술을 이용하여 초고공간 해상도의 소나무 영상을 획득한 뒤, 개선된 mobileNetv2-YOLOv4 알고리즘을 이용하여 소나무재선충병으로 인한 비정상적으로 변색된 나무를 식별한 결과 평균 정밀도가 86.85%에 이르렀다(Sun et al., 2022). UAV로부터 얻어진 영상을 통한 소나무재선충 피해목 탐지는 임상의 구조나 고사목의 발생 정도, 영상 촬영 시기 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 향후 영상에

대한 해상도와 판별력을 증가시키는 것뿐만 아니라 임상에 따른 오차발생 부분을 보정할 수 있는 다양한 연구들이 수반되어야 할 것으로 생각된다.

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; Jung YH, Lee DW, Writing – original draft preparation; Lee DW, Lee SM, Writing – review and editing; Lee SM, Jung YH, Lee DW.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

- 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)
- CABI Compendium, 2022. *Bursaphelenchus xylophilus* (pine wilt nematode). CABI Compendium. [HTTPS://WWW.CABI.ORG/CPC/DATASHEET/10448](https://www.cabi.org/cpc/datasheet/10448)
- Cha BJ, Yun JK, 1995. The size of infection wound, tree diameter, and injection wound healing of a tree – response to pospam injection wound. Jour. Korean For. Soc. 84(1):22-30. (In Korean)
- Choi J, Lee J, Lee H, Jang C, Kim YS, et al., 2022. Time-dependent change of host by nematicide tree injection

- and pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* inoculation in two pine species, *Pinus densiflora* and *P. thunbergii*. Korean J. Pestic. Sci. 26(1):43-54. (In Korean)
- Hong S, Lee S, 2015. Report on forests damaged due to cutting trees infected by pine wilt disease. Korean J. Environ. Ecol. 29(4): 590-598. (In Korean)
- Jones JT, Haegeman A, Danchin EGJ, Gaur HS, Helder J, et al., 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology 14(9):946-961.
- Kamata N, 2008. Integrated pest management of pine wilt disease in Japan: tactics and strategies. pp.304-232. (In Korean) (eds. Zhao BG., Futai F., Sutherland JR., Takeuchi Y.), Spring. Tokyo, Japan.
- Kim J, Kim B, Lee S, Kim J, Han S, et al., 2012. Distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in naturally infected *Pinus densiflora* and *P. koraiensis* and migration of *B. xylophilus* in artificial inoculated *P. densiflora* seedlings. Res. Plant Dis. 18(2):101-108. (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 JW, Mwamula AO, Choi JH, Lee HW, Kim YS, et al., 2022. Comparison of nematicidal and propagation inhibitory effect of emamectin benzoate mixture for tree injection agents against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Korean J. Pestic. Sci. 26(4):307-316.
- 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 S, Park S, Baek G, Kim H, Lee C, 2019. Detection of damaged pine tree by the pine wilt disease using UAV image. Korean J. Remote Sensing, 35(3):359-373. (In Korean)
- 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, 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, 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)
- Lehmann JRK, Nieberding F, Prinz T, Knoth C, 2015. Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry—a new perspective to monitor pest infestation levels. Forests 6:594-612.
- Park J, Das A, Park J, 2015. Application trend of unmanned aerial vehicle (UAV) image in agricultural sector: review and proposal. CNU J. Agricultural Sci. 42(3):269-276. (In Korean)
- Park W, Ko DW, Kwon T, Nam Y, Kwon YD, 2018. Analysis of pinewood nematode damage expansion in Gyeonggi province based on monitoring data from 2008 to 2015. J. Korean Soc. For. Sci. 107(4):486-496. (In Korean)
- Rural Development Administration (RDA), 2017. Detailed guidelines for the field of efficacy and phytotoxicity in the pesticide registration test (insecticides). National Institute of Agricultural Sciences. Wanju, Korea. (In Korean)
- SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shim ST, Lee S, Lee CY, Nam YW, 2021. Analysis of occurrence characteristics of pine wilt disease in Korea based on monitoring data from 2016 to 2018. J. Korean Soc. For. Sci. 110(2): 280-288. (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.
- Sun Z, Ibrayim M, Hamdulla A, 2022. Detection of pine wilt nematode from drone images using UAV. *Sensors*, 22:4704. <https://doi.org/10.3390/s22134704>.
- 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.* 59:365–370.
- 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.
- Zhao J, Huang J, Yan J, Fang G, 2020. Economic loss of pine wood nematode disease in mainland China from 1998 to 2017. *Forests* 11(10):1042; <https://doi.org/10.3390/f11101042>

곤리도 소나무재선충 자연 발생지 곰솔림에서 수간주입용 살선충제의 효과와 지속성

이상명¹, 정영학¹, 이동운^{2,3}

¹(주)에스엠바이오비전, ²경북대학교 곤충생명과학과, ³경북대학교 질병매개무척추동물연구소

요약 소나무재선충에 의한 소나무시들음병은 우리나라 산림의 가장 중요한 선충병이다. 나무주사는 소나무재선충병을 예방하기 위해 사용할 수 있는 유일한 실용적 대안이다. 본 연구는 나무주사용 살선충제로 사용되고 있는 Abamectin과 Emamectin benzoate 단제와 합제의 효과를 소나무재선충 자연 발생지에서 3년간 조사하였다. Emamectin benzoate 단제와 합제는 3년간 90%이상의 소나무재선충 방제효과가 있었으며 단제와 합제간 효과 차이는 없었다. 드론 영상에서 추출된 소나무 고사목 수에 비하여 실제 임내에서 확인된 고사목의 수가 많았는데 이러한 경향은 고사목 수가 많을수록 차이가 커지는 양상을 보였다. 소나무재선충병 예방 나무주사제 등록 시험 시 효과 조사를 2년 또는 3년 후에 시행할 것을 제안한다. 드론 영상을 이용하여 소나무재선충 피해목 산정 시 추출된 수에 비하여 현장에서 실제 고사된 피해목 수에 차이가 있기 때문에 예찰이나 방제 계획 시 고려하여야 할 것으로 생각된다.

색인어 아바멕틴, 고사목, 드론, 에마멕틴벤조에이트, 합제