농약과학회지 (Korean J. Pestic. Sci.)
Vol. 30, No. 3, pp. 256-265 (2026)
Open Access https://doi.org/10.7585/kjps.2026.30.3.256
ORIGINAL ARTICLES

Online ISSN 2287-2051
Print ISSN 1226-6183
Check for updates

왕벚나무와 느티나무, 양버즘나무에서 수간주입 주입구의 간격이 emamectin benzoate와 acetamiprid의 효과에 미치는 영향

박기형[1] · 서상태[1] · 이상명[2] · 정영학[2] · 이동운[3,4]*

[1]국립산림과학원 산림병해충연구과, [2]㈜에스엠바이오비전, [3]경북대학교 곤충생명과학과,
[4]경북대학교 질병매개무척추동물연구소

Effect of Trunk Hole Spacing on Trunk Injection Efficacy of Emamectin benzoate and Acetamiprid in *Prunus* × *yedoensis*, *Platanus occidentalis*, and *Zelkova serrata*

Ki-Hyeong Park[1], Sang-Tae Seo[1], Sang-Myeong Lee[2], Young-hak Jeong[2], and DongWoon Lee[3,4]*

[1]Forest Entomology and Pathology Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea
[2]SM Biovision Co., Jinju, Korea
[3]Department of Entomology, and [4]Research Institute of Invertebrate Vector,
Kyungpook National University, Sangju, Korea

(Received on August 26, 2026. Revised on September 13, 2026. Accepted on September 14, 2026)

Abstract Trunk injection involves injecting substances into the trunk to control pests and diseases. It is a method that controls the sprayed substance to act only on the target pests and diseases, while minimizing the exposure risk for non-target organisms or the environment. Depending on the composition and types of phloem cells, the movement of the trunk-injected substance within the tree varies. We investigated the distribution, residue, and effects of pesticides (emamectin benzoate 2.15% emulsifiable concentration, acetamiprid + emamectin benzoate 10 + 6% soluble concentration) on target pests by injecting the pesticides into the trunks of conifers and broadleaf trees with different types of phloem cells (*Prunus* × *yedoensis* and *Platanus occidentalis*: diffuse-porous wood, *Zelkova serrata*: ring-porous wood). The residual amount of pesticide did not significantly differ based on the spacing (number) of the boreholes. However, the number of detection points for each orientation increased as the spacing between the boreholes narrowed, reaching its highest level at 8 boreholes (perforation spacing of 15 cm). As the spacing of the trunk injection widened, we noted a decrease in the insecticidal effect against *Hyphantria cunea* and the same trend observed against *Corythucha ciliata*. Since dispersion within the tree differed on the basis of the pesticide, the number of detection points for acetamiprid was higher than that for emamectin benzoate. We recommend minimizing the spacing between holes when injecting pesticides into the trunks of broadleaf trees, as this influences dispersion, distribution, and efficacy against target pests.

Key words: Acetamiprid, Diffuse porous wood, Emamectin benzoate, *Hyphantria cunea*, Ring porous wood

서 론

나무의 수간부에 구멍을 뚫고 농약을 비롯한 병해충 방제 물질을 물관부로 주입하여 수관으로 직접 전달시키는 수간주입법은 기존의 살충제 살포에 의한 사용자나 환경에 대한 위험을 감소시킬수 있는 대안으로 관심이 증가하고 있다 (Berger and Laurent, 2019; Cha et al., 2020). 수간주입법은 물 소비량이 거의 없고, 나무의 목질부 내에 정밀하게 방제 물질을 투입할 수 있어 외부 환경에 미치는 영향이 적어 조류나 곤충, 야생동물과 같은 비표적 생물에 대한 위험성도 최소화 할 수 있는 방안으로 과수는 물론이고 산림이나

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

관상수, 생활권 수목에도 활용할 수 있다(Benigno et al., 2025; Cha et al., 2020).

수간주입의 방제대상은 서울호리비단벌레(*Agrilus planipennis*)나 유리알락하늘소(*Anoplophora glabripennis*)와 같은 해충(Flowera et al., 2015; Ugine et al., 2013)뿐만 아니라 사과의 과수화상병(*Erwinia amylovora*)이나 감귤의 황룡병(Huanglongbing)과 같은 병 방제에도 활용되고 있다(Aćimović et al., 2014; Hu and Wang, 2016).

우리나라에서도 수간주입 방법에 관한 연구들은 다양하게 이루어졌는데 수간주입 시기에 따른 잔류량과 소나무재선충에 대한 방제 효과(Lee et al., 2021), 수간주입 천공 직경에 따른 잔류량과 소나무재선충 증식억제 효과(Kwon et al., 2021), 수간주입 위치별에 따른 잔류량과 소나무재선충에 미치는 효과(Kang et al., 2022) 등의 연구가 이루어졌었다. 그러나 우리나라에서 살선충제와 살충제들이 등록되어 사용되고 있지만(RDA, 2026) 실제 수간주입과 관련 된 연구들은 침엽수에 피해를 주는 소나무재선충 방제를 위한 연구들이 대부분으로 살충제의 농약등록시험 약효.약해분야 세부지침에서도 소나무재선충병 예방 나무주사 방법만이 제시되어 있다(RDA, 2017).

수간주입은 주입한 물질이 적용이 필요한 부분까지 충분한 이동이 이루어져야 하는데 주입 된 물질의 수체내 이동은 수목 자체의 특성인 해부학적 특성과 생리학적 특성의 영향 및 수목 생장환경적 요인인 토성, 온도, 강우 등 요인과, 수간주입 물질의 이화학적 특성이나 수간주입 처리 방법 등의 다양한 요인들의 영향을 받는다 (Bager and Laurent, 2019; Cha et al., 2020; Archer et al., 2022).

수간주입 물질의 이동에 관계하는 다양한 요인들 중 식물의 생리, 해부학적 특성과 관련된 나무 자체의 특성으로는 수분이동과 관계된 관다발계의 해부학적 구조차이가 수간주입 물질의 이동에 영양을 미치는 기본 요인이다(Chaney, 1986). 따라서 수간주입 시 도관의 길이나 나이테의 구조와 같은 해부학적 특성을 고려하여 주입위치나 방법이 고려되어야 한다. 나무에서 물의 이동은 목질부 형태와 구조에 영향을 받는데 물관, 헛물관, 섬유, 유조직의 네 가지 세포로 이루어진 목질부는 구성세포의 종류에 따라 물질 이동 속도에 영향을 받는다(Chaney, 1986). 침엽수 물관부는 헛물관으로 주로 구성되어 있고, 활엽수 물관부는 물관과 헛물관으로 구성되어 있어 물질의 이동 속도와 양상에 차이가 있다(Chaney, 1986; Cha et al., 2020). 또한 이러한 차이로 인해 목질부내 수분 이동에 관여하는 변재부의 나이테도 차이를 보이는데 무공재의 경우 최근 만들어진 1~5개의 나이테를 통해 주로 물이 이동되고, 산공재는 최근 만들어진 1~3개 나이테, 환공재는 최근 만들어진 1개 나이테를 통해 주로 수분이 이동된다(Chaney, 1986; Umeyabashi et al., 2007).

무공재인 침엽수는 변재부를 따라 물이 주로 이동하여 천공 깊이가 5 cm를 넘지 않는 것이 좋다고 하였는데(Cha et al., 2020) 소나무재선충의 감염 기주인 잣나무와 곰솔, 소나무의 경우 잣나무의 변재 길이가 가장 짧아 수간 주입 시 상대적으로 천공 깊이를 짧게 할 필요성이 제시되었으나 천공 후 수간 주입 위치별에 따른 소나무재선충의 증식 수나 에마멕틴벤조에트의 잔류량은 차이가 없었다(Kang et al., 2020). 아울러 곰솔에서 수간주입 한 에마멕틴벤조에이트의 방위별 검출양은 차이를 보이지 않았다(Kwon et al., 2021).

한편 소나무재선충 예방 나무주사는 흉고직경 당 1 mL를 주입하는 약제의 경우 흉고직경 32 cm나무에는 7개의 천공구멍을 뚫고 약제를 주입하는데(KFS, 2026) 활엽수인 미국물푸레나무(*Fraxinus americana*)에서는 16개의 천공구멍을 내고 약제를 주입하여(Sadof et al., 2022) 주입 구의 수나 간격에 많은 차이를 보인다. 그러나 우리나라에서는 침엽수인 무공재에서는 수종별 변재부와 심재부의 조성, 수간주입 위치나 천공구의 크기에 따른 약효나 잔류량과 관련된 연구들이 수행되었으나(Kang et al., 2020; Kwon et al., 2021), 관다발계의 해부학적 구조의 차이가 있는 활엽수에서는 수간주입 한 나무의 상처 최소화를 위한 관점의 연구만 수행되었다(Cha et al., 2019). 그럼에도 불구하고 우리나라에서 수간주입 방법은 기존의 소나무재선충 방제에 적용하던 방법을 준용하여 사용하고 있어, 산공재와 환공재 활엽수에 대한 수간주입 방법 정립이 필요하다. 따라서 본 연구는 활엽수에서 효율적인 해충방제에 적용 할 수 있는 수간주입 방법을 알아보기 위한 연구의 일환으로 기존의 무공재 침엽수의 수간주입 방법과 가장 큰 차이점의 하나인 주입 구멍의 간격에 따른 수간주입 효과와 잔류 및 분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

수종별 수간주입 거리(주입구 수)에 따른 약제 검출량

공시목, 공시약제 및 수간주입

수간주입 거리별에 따른 수간주입 약제의 잔류량 조사를 위하여 실험에 사용한 활엽수는 산공재(diffuse porous wood)인 왕벚나무와 양버즘나무, 환공재(diffuse porous wood)인 느티나무를 이용하였는데 왕벚나무와 느티나무는 생활권에 식재 빈도가 높은 교목으로 생활권 수목에 대한 약해 시험 대표 추천 수종이며(Lee et al., 2026) 양버즘나무를 포함한 이들 세 개 수종에는 수간주입용 농약이 등록되어 있는 수종들이었다. 각각의 수종들은 조경수로 식재되어 있는 유사한 년령대의 나무를 사용하였다. 왕벚나무는 경남 진주시 대평면 상촌리 산 146-3번지에서 시험을 수행하였는데 평균 흉고직경은 26.7~33.3 cm였고, 수간주입을 위한 천공구의 수는 1, 2, 4, 8개로 달리 하였는데 각 천공수에 따른 천공부위 간 간격은 Table 1과 같았다.

Table 1. Breast height diameter and spacing between boreholes by tree species

Tree species	No. of drilling holes	Diameter at breast height (cm)	Distance between the injection holes (cm)
Prunus × *yedoensis*	1	28.7±1.2bc[a)]	90.0±3.6a
	2	26.7±1.2c	41.9±1.8b
	4	30.0±0.0b	23.6±0.0c
	8	33.3±2.0a	13.1±0.5d
Zelkova serrata	1	31.3±3.1a	98.4±9.6a
	2	29.3±2.3a	46.1±3.6b
	4	30.7±1.2a	24.1±0.9c
	8	29.3±1.2a	11.5±0.5c
Platanus occidentalis	1	43.0±2.6a	135.0±8.3a
	2	47.7±1.5a	74.9±2.4b
	4	41.7±5.5a	32.7±4.3c
	8	41.7±5.5a	16.3±2.2d

[a)]Means followed by same lowercase letters within the column in each tree species are not significantly different (Tukey's studentized range test, $p < 0.05$).
Pesticides were injected at chest height, and samples for residue analysis and efficacy investigation were collected from the middle of the tree trunk.

느티나무는 경남 진주시 집현면 대암리 192-7번지에서 시험을 수행하였는데 공시목의 평균 흉고직경은 29.3~31.3 cm 였는데, 수간주입을 위한 천공구의 수는 왕벚나무와 동일하게 1, 2, 4, 8개로 하였으며 각 천공구 수에 따른 천공구간 거리는 Table 1과 같았다.

양버즘나무는 경남 창원시 마산합포구 진전면 봉암리 118-1번지에서 수행하였는데 공시목의 평균 흉고직경은 41.7~47.7 cm이었고, 각 천공구 수에 따른 천공구간 거리는 Table 1과 같았다.

왕벚나무에서는 2025년 5월 22일 미국흰불나방 나무주사 약제로 등록되어 있는 에마멕틴벤조에이트 2.15% 유제를 흉고 직경 cm당 0.5 mL씩 수간주입하였다(RDA, 2026).

느티나무에서는 5월 22일 느티나무알락진딧물에 나무주사 약제로 등록되어 있는 아세타미프리드+에마멕틴벤조에이트 10+6% 액제를 흉고직경 cm당 0.5 mL씩 수간주입하였다 (RDA, 2026).

양버즘나무에서는 6월 19일 버즘나무방패벌레와 미국흰불나방에 나무주사 약제로 등록되어 있는 아세타미프리드+에마멕틴벤조에이트 10+6% 액제를 처리하였는데 약량은 버즘나무방패벌레의 경우 흉고직경 cm당 1.0 mL이고, 미국흰불나방의 경우 흉고직경 cm당 0.19 mL로 차이가 있어 버즘나무방패벌레 약량을 기준으로 수간주입하였다(RDA, 2026). 수간 주입한 약제의 총량은 흉고직경을 기준으로 결정되었으며 각 천공구의 수에 따른 주입 약량은 흉고직경별로 투입 되어야 하는 약량을 천공구 수로 나누어 동일 약량으로 주입하였다. 각각의 살충제들은 농약상에서 시판중인 제품을 구입하여 사용하였다.

수간주입 방법

약제의 수간 주입은 수목별로 주간 50 cm 높이에 충전드라이브드릴(GSR 18-2-LIPLUS, 보쉬, 말레이시아)을 사용하여 직경 8 mm, 길이 5~7 cm 구멍을 사선으로 뚫고, 각 약제를 중력식으로 주입하였다.

천공구 1개는 남쪽 방향, 천공구 2개는 남쪽과 북쪽 방향, 천공구 4개는 동, 서, 남, 북 방향으로, 천공구 8개는 동, 서, 남, 북 방향과 그 사이 사이에 구멍을 뚫었다.

1개 천공구에서 약제 주입은 약제의 양이 많아 주입병을 이용하였고, 2개, 4개, 8개 천공구 처리에서의 약제 주입은 10 mL 피펫팁 끝부분 2 mm를 전정가위로 자른 다음 천공구멍에 끼워 넣고, 피펫을 사용하여 약제를 주입하였다(Fig. 1). 각 천공구 수별로 한 그루의 나무를 한 반복으로 3반복 처리하였으며 처리는 완전임의배치법으로 하였다.

잔류분석 시료 채취 및 잔류 분석

잔류분석용 시료 채취

주입구 거리(수)에 따른 수간주입 농약의 검출량을 알아보기 위하여 왕벚나무와 느티나무는 6월 19일(약제 처리 후 28일차), 양버즘나무는 버즘나무방패벌레에 대한 효과 조사 시기에 맞추어 9월 13일(약제처리 후 83일 차)에 잎을 채취하여 조사하였다. 수목별 엽 채취는 동·서·남·북 4방위로 나누어 채취 하였는데 각 방위에서 수간 중부의 3가지를 채취하여 20엽씩 총 60엽을 따서 지퍼팩에 담아 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하였다. 각 나무의 수고는 측정하지 않았다. 1본을 1반복으로 3반복 수행하였다.



Fig. 1. Photo of the process of drilling one injection hole (A) and eight holes (B) in a *Prunus* × *yedoensis* tree.

추출 및 분배

각 시료 5 g을 정밀히 달아 50 mL 용량의 원심분리관에 넣고, 3차 증류수 10 mL를 첨가하여 30분 동안 방치 후 Acetonitrile 10 mL를 넣은 뒤 1분간 강하게 흔들어 섞고, QuEChERS (EN15562_ 4.0 g Magnesium sulfate, 1.0 g Sodium chloride, 1.0 g Trisodium citrate dihydrate, 0.5 g Disodium hydrogencitrate sesquihydrate)를 첨가한 후 다시 1분간 강하게 흔들어 섞은 다음 4°C, 4000 G에서 10분간 원심분리하여 상층액 1 mL를 취하였다. dSPE 정제를 위해 무수황산마그네슘 150 mg 및 1차·2차 아민(PSA) 25 mg이 미리 담겨져 있는 2 mL 원심분리관에 상층액 1 mL를 첨가하고 30초간 강하게 진탕하였다. 이후 원심분리하여 층을 분리한 후 상층액을 PTFE 멤브레인 필터(0.2 μm)로 여과하여 시험용액으로 하였다.

시험용액은 Shimadzu 액체크로마토그래프-질량분석기 LC-MS-8050 (Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)에 주입하여 분석대상물질의 피크면적을 이용하여 작성한 검량선으로부터 시험용액 중 분석대상물질의 농도를 산출하였다.

분석기기 조건과 회수율

분석기기는 Shimadzu LCMS-8050(Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)을 사용하였으며, 분석용 컬럼은 Shim-pack XR-ODS II C18(75 mm × 2.0 mm, 2.2 μm)을 사용하였다. 컬럼 온도는 40°C로 유지하였으며, 이동상은 0.1% 포름산과 5 mM 아세트산암모늄 함유한 메탄올과 물을 사용하여 최적화된 기울기 용리 조건으로 분석대상물질을 분리하였다.

이온화는 Electrospray ionization(ESI) Positive-ion mode를 적용하였으며, 각 분석대상물질에 대해 선구이온(precursor ion) 및 생성이온(product ion)을 선정하여 정량이온(quantifier ion)과 정성이온(qualifier ion)을 설정함으로써 multiple reaction monitoring(MRM) 조건을 확립하였다. 세부 LC-MS/MS 분석조건은 Supplementary Table 1에 제시하였다.

시험법 유효성 검증

시험법 검증은 식품의약품안전처 식품의약품안전평가원의 '식품 등 시험법 마련 표준절차에 관한 가이드라인'에 근거하여 선택성(selectivity), 직선성(linearity), 검출한계(Limit of detection, LOD), 정량한계(Limit of quantitation, LOQ) 회수율(recovery), 반복성(repeatability)에 대해 유효성 확인을 실시하였다.

혼합표준원액을 0.005~0.02 μg/mL의 농도가 되도록 무처리 시험용액으로 희석하여 질량분석기로 분석 후 각 농도 범위에 대한 피크 면적으로 검량선(matrix-matched calibration)을 작성하였고, 검량선의 결정계수(correlation coefficient; R^2)로 직선성을 확인하였다. 또한 검출한계(LOD) 및 정량한계(LOQ)는 0.005 mg/kg 농도에서 매질 보정 표준용액을 7회 반복 분석한 뒤 표준편차를 구하는 통계적 방식으로 3.3배수를 계산하여 LOD를 산출하고 10배수를 계산하여 LOQ를 산출하였다. 회수율 실험은 무처리 시료에 혼합표준용액을 정량한계(0.005 μg/mL), 정량한계 2배(0.01 μg/mL), 정량한계 4배(0.02 μg/mL)에 해당하는 농도로 첨가하고 3반복 실험을 수행하여 정확성과 반복성을 평가하였다. 표준품은 emmamectin benzoate와 acetamiprid를 사용하였다.

수간주입 주입구 수에 따른 해충에 대한 약효 평가

미국흰불나방에 대한 방제효과

천공수별 약제를 수간주입 한 다음 왕벚나무와 양버즘나무에서 미국흰불나방에 대한 방제효과를 조사하였다. 수간주입한 나무에서 수간 중앙부분의 가지를 각 방위별로 한 가지씩 채취한 후 잎들을 이용하여 실험실에서 생물검정을 수행하였다. 직경 90 mm 페트리디쉬(10090, SPL, Pocheon, Korea)에 여과지(00021090, ADVANTEC, Tokyo, Japan) 한 장을 깔고, 증류수 1 mL을 처리한 다음 채취한 잎을 1장씩 넣고, 야외에서 채집한 미국흰불나방 2령충 10마리씩을 접종하였다. 수분 증발을 막기 위해 처리한 페트리디쉬는 파라필름(PM-996, Amcor plc/Bemic company, Neenah,

USA)으로 감은 다음 25±3ºC 실내에 7일 간 보관 후 미국흰불나방 유충의 치사 유무를 확인 하였다. 1개의 페트리디쉬를 한 반복으로 3반복 수행하였다. 무처리구는 약제를 수간주입하지 않은 나무의 잎을 채취하여 처리하였다. 미국흰불나방에 대한 약효검증은 2화기와 3화기 발생 유충을 대상으로 수행하였는데 왕벚나무에서는 2화기 발생 유충 대상 실험은 8월 3일 수행하였으며 3화기 발생 유충 대상 실험은 9월 23일 수행하였다. 양버즘나무에서는 2화기 유충은 8월 2일, 3화기 유충은 9월 10일 처리하였다.

버즘나무방패벌레에 대한 방제효과

천공수별로 수간주입 한 양버즘나무에서 버즘나무방패벌레에 대한 방제효과는 약제 검출량 조사 시기인 약제 처리 83일후에 조사하였다. 버즘나무방패벌레는 자연 발생한 개체수를 조사하였는데 약제 검출량 조사를 위해 각 방위별로 한 가지씩 채취한 가지에서 임으로 3개 잎을 대상으로 버즘나무방패벌레 약충의 생충수를 조사하였다. 한 그루를 한 반복으로 3반복으로 조사하였다.

통계처리

각 수종의 주입공의 수에 따른 방위별 잔류량과 왕벚나무와 양버즘나무에서 2화기와 3화기 미국흰불나방의 주입공 수에 따른 방제효과와 양버즘나무에서 버즘나무방패벌레 보정사충율은 처리평균간 차이를 Tukey test로 분산분석하였다.

결 과

수간주입 주입구 거리(주입구 수)에 따른 농약 검출량

왕벚나무에서 수간주입 천공구 수에 따른 에마멕틴벤조에이트 약제 검출량을 조사한 결과 천공수가 많을수록 네 방위별 내의 약제 검출부분 수가 증가하여 8개 천공구 처리에서는 평균 3방향에서 약제가 검출되었지만 1개나 두 개 주입구의 경우 1.7곳과 1.3곳에서 약제가 검출되었다(df=3, 8, F=6.56, P=0.0151)(Table 2). 반면 에마멕틴벤조에이트 검출량은 천공구 수 간에 차이를 보이지 않았다(df=3, 8, F=0.8, P=0.5301)(Table 2).

느티나무에서도 수간주입 천공구 수에 따른 방위별 약제 검출 부분 수는 에마멕틴멕틴벤조에이트(df=3, 8, F=6.56, P=0.0151)나 아세타미프리드(df=3, 8, F=11.56, P=0.0028) 모두 천공구의 수가 많을수록 증가하였으나 약제 검출량은 천공구 수에 따라 통계적 차이는 없었다(Table 2).

반면 양버즘나무의 경우 방위별 약제 검출 부분 수가 에마멕틴벤조에이트(df=3, 8, F=3.24, P=0.0815)는 천공구의 수에 따라 통계적 차이를 보이지 않았으나 아세타미프리드의 경우 1개 천공구에 비해 4개나 8개 천공구 유의하게 높은 검출 부분을 나타내었다(df=3, 8, F=11, P=0.0033). 에마멕틴벤조에이트와 아세타미프리드의 검출량은 천공구 수에 따라 차이를 보이지 않았다(Table 2).

왕벚나무에서 수간주입 위치에 따른 각 방위별 약제 검출

Table 2. Number of pesticide detection points within the four cardinal directions and average pesticide detection amount according to the number of injection holes by tree species

Tree species	No. of drilling holes	Emamectin benzoate		Acetamiprid	
		No. of detection sites[a)]±SD	Detected concentration[b)] (mg/kg)±SD	No. of detection sites±SD	Detected concentration (mg/kg)±SD
Prunus × *yedoensis*	1	1.7±0.6b[c)]	0.291±0.145a	-	-
	2	1.3±0.6b	0.438±0.062a	-	-
	4	2.3±0.6ab	0.806±0.003a	-	-
	8	3.0±0.0a	1.652±0.068a	-	-
Zelkova serrata	1	1.7±0.6b	1.849±2.244a	1.7±0.6a	2.959±2.608a
	2	1.3±0.6b	1.02±1.708a	2.0±0.0a	5.69±9.431a
	4	2.3±0.6ab	1.299±1.207a	3.3±0.6a	5.066±5.072a
	8	3.0±0.0a	1.177±1.125a	3.7±0.6a	6.342±5.73a
Platanus occidentalis	1	0.0±0.0a	0.0±0.0a	1.7±0.6b	5.747±4.638a
	2	1.7±0.6a	0.282±0.432a	3.0±1.0ab	30.338±22.537a
	4	1.0±1.0a	0.013±0.019a	4.0±0.0a	13.725±9.358a
	8	2.3±1.5a	0.115±0.168a	4.0±0.0a	35.843±25.596a

[a)]Number of detection sites where each pesticide was detected in samples from the four cardinal directions (east, west, south, and north).
[b)]The detected concentration is the average concentration excluding non-detection.
[c)]Means followed by same lowercase letters within the column in each tree species are not significantly different (Tukey's studentized range test, $p < 0.05$).

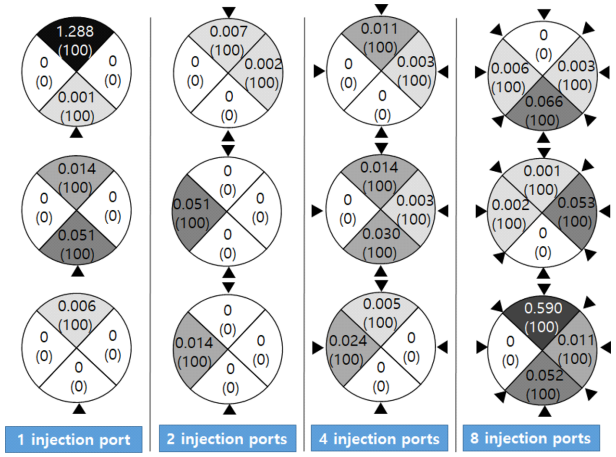


Fig. 2. Detected concentration of emamectin benzoate in *Prunus* × *yedoensis* trees (number, mg/kg) and mortality against *Hyphantria cunea* larvae (number in parentheses, %). ▲: Trunk injection site.

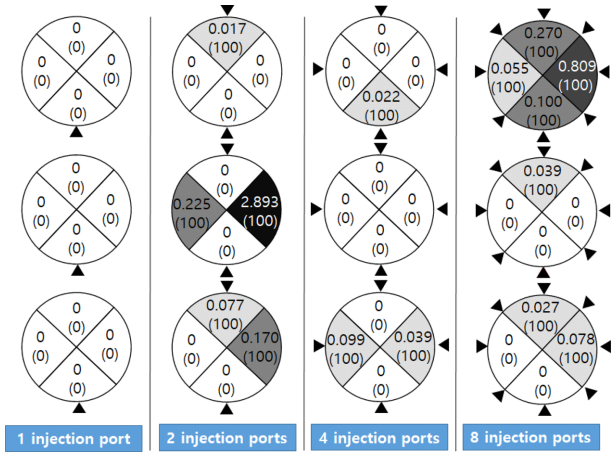


Fig. 4. Detected concentration of emamectin benzoate in *Platanus occidentalis* trees (number, mg/kg) and mortality against *Hyphantria cunea* larvae (number in parentheses, %). ▲: Trunk injection site.

부분은 수간주입 방위와 동일한 방위부분에서 약제가 검출되는 경우가 많았으나 주입부와 동일 방위에서 검출이 되지 않거나 주입부와 반대 부분에서 검출되는 경우도 있었다(Fig. 2).

느티나무에서는 에마멕틴벤조에이트와 아세타미프리드 합제를 수간 주입하였는데 에마멕틴벤조에이트에 비하여 아세타미프리드의 검출 부분이 상대적으로 많았다(Fig. 3). 특히 동일 위치에서 아세타미프리드는 검출 되는데 비하여 에마멕틴벤조에이트가 검출되지 않는 나무가 1개 천공구에서 두 그루, 2개와 4개 천공구에서 한 그루씩 나타났다.

양버즘나무에서도 느티나무와 동일한 합제를 수간주입하였는데 에마멕틴벤조에이트의 검출부분이 아세타미프리드 검출부분에 비하여 현저히 적었다(Figs. 4, 5). 한 개 천공구의 경우 모든 나무에서 에마멕틴벤조에이트가 검출되는 부분이 없었으나 아세타미프리드는 한 부분 이상에서 검출이 확인되었다. 또한 아세타미프리드는 4개와 8개 주입공 처리에서는 네 방향 모두에서 약제가 검출되었지만 에마멕틴벤조에이트는 8개 주입공 처리 한 그루를 제외하고는 불검출되는 부분이 많았다.

수간주입 주입구 수에 따른 해충에 대한 약효

수간주입 한 왕벚나무의 잎을 공급한 미국흰불나방의 치사율은 천공구의 수가 증가할수록 높아지는 경향을 보였다. 수간주입 28일차인 2화기 유충에 대한 방제가(df=3, 8, F=5.83, P=0.0202)보다 51일후의 3화기 유충에 대한 방제가

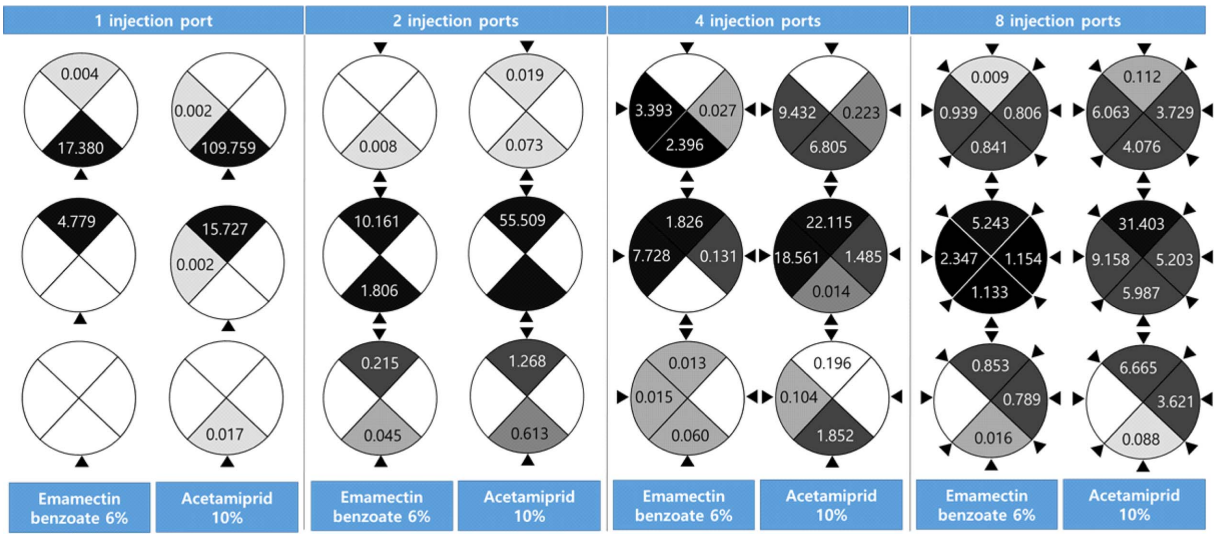


Fig. 3. Detected concentration (mg/kg) of emamectin benzoate and acetamiprid injected into the trunk of *Zelkova serrata* trees. ▲: Trunk injection site.

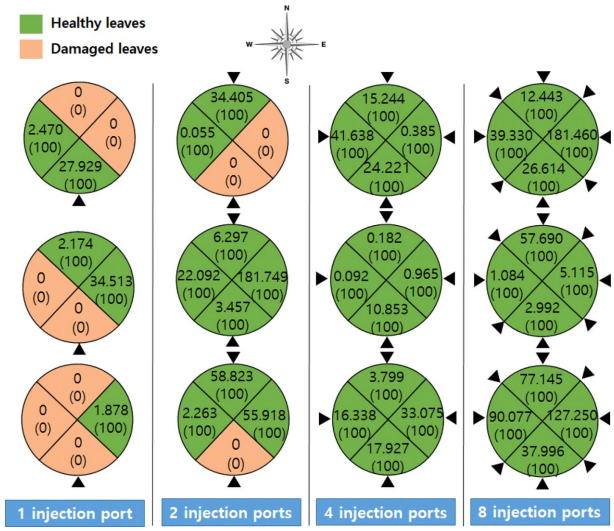


Fig. 5. Detected concentration of acetamiprid in *Platanus occidentalis* trees (number, mg/kg) and mortality against *Corythucha ciliata* (number in parentheses, %). ▲: Trunk injection site.

(df=3, 8, F=6.56, P=0.0151)가 다소 높게 나타나는 경향을 보였는데 특히 1개 천공구 처리에서는 2세대 유충보다 3세대 유충에서의 치사율이 높게 나타났다(Table 3).

양버즘나무에 대한 미국흰불나방의 방제가는 왕벚나무에 비하여 낮게 나타났는데 특히 주입공 1개 처리의 경우 2화기나 3화기 유충 모두 치사되지 않았다(Table 2). 주입구의 수의 증가에 따른 방제가의 변화는 왕벚나무에 비해 편차가 커서 2화기(df=3, 8, F=2.21, P=0.1646)나 3화기(df=3, 8, F=3.24, P=0.0815) 모두 통계적 유의성은 없었다. 반면 버즘나무방패벌레에 대한 방제가는 미국흰불나방에 비하여 높게 나타났으며 천공구 수가 4개 이상인 경우 99%이상의 방제가를 나타내었다(df=3, 8, F=11.48, P=0.0029).

고 찰

세 종의 활엽수를 대상으로 주입구 수에 따른 수간주입 농약의 잔류량과 방위별에 따른 검출지 수를 조사한 결과 잔류량은 주입구 수에 따른 통계적 차이가 없었지만 약제가 검출되는 위치 수는 천공구의 수가 증가할수록 많아지는 경향을 보였다. 왕벚나무의 경우 에마멕틴벤조에이트의 전체 방위에 대한 평균 검출량은 한 개 주입부 처리에서 가장 많은 검출량을 보였고, 다음으로 8개 천공에서 검출량이 많았으나 통계적 유의성은 천공부 수에 따라 차이가 없었다. 이는 검출량이 위치별에 따라 편차가 많고, 동일 처리간에도 반복별로 편차가 많았기 때문으로 나무의 종류나 농약의 종류와 관계없이 동일한 양상을 나타내었다. 수간주입 한 에마멕틴벤조에이트의 검출량은 소나무나 곰솔, 잣나무에서도 나무간에 편차가 커서 평균 검출량이 30배 이상의 차이가 있음에도 불구하고 통계적 차이가 없는 경우도 있었다(Kang et al., 2022). Takai et al.(2004)도 수간주입 한 에마멕틴벤조에이트의 수간주입 거리별에 따른 잔류량이 동일 방향에서 일정하게 높거나 낮은 경향성을 보이지 않고, 나무 간에도 차이를 보여 잔류량의 불균일성을 개선하기 위해서는 주입구멍의 수를 늘릴 필요가 있다고 하였다. 또한 Kwon et al. (2021)은 나무주사 한 농약의 수체 내 잔류가 나무의 통도조직을 따라 이동하기 때문에 동일 약제를 동일 약량으로 처리하여도 겉씨식물 목질부의 경우 헛물관에 있는 벽공을 통해 사선방향으로 이동하여 대경목의 경우 주입한 약제의 이동부위의 사각지대가 생겨 잔류량에 차이가 있을 수 있다고 하였다. 또한 잔류분석을 위한 시료량은 1 g 정도로 적은 양이기 때문에 채취한 시료가 동일 두께나 길이의 가지나 동일한 조직이 분석되는 것이 아니기 때문에 시료 간 편차가 많이 발생할 수 있다. 한편 동일한 합제를 수간주입 한 느티

Table 3. Control effects of *Hyphantria cunea* and *Corythucha ciliata* according to the number of injection holes by tree species

Tree species	No. of drilling holes	100% lethal parts for the *H. cunea* in each generation[a)]		Corrected mortality of *H. cunea* in each generation (%)		Corrected mortality of *C. ciliata* (%)±SD
		2nd±SD	3rd±SD	2nd±SD	3rd±SD	
Prunus × yedoensis	1	0.3±0.6b[b)]	1.7±0.6b	8.3±14.4b	41.7±14.4b	-
	2	1.0±1.0ab	1.3±0.6b	25.0±25.0ab	33.3±14.4b	-
	4	1.7±0.6ab	2.3±0.6ab	41.7±14.4ab	58.3±14.4ab	-
	8	3.0±1.0a	3.0±0.0a	75.0±25.0a	75.0±0.0a	-
Platanus occidentalis	1	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	47.2±7.3b
	2	0.7±0.6a	1.7±0.6a	16.7±14.4a	41.7±14.4a	74.7±24.3ab
	4	1.7±1.5a	1.0±1.0a	47.5±41.3a	25.0±25.0a	99.2±1.3a
	8	0.7±1.2a	2.3±1.5a	32.5±18.9a	58.3±38.2a	99.4±0.5a

[a)]The number of each direction parts in which *Hyphantria cunea* larvae are 100% lethal when fed leaves from branches in the four cardinal directions (east, west, south, and north).
[b)]Means followed by same lowercase letters within the column in each tree species are not significantly different (Tukey's studentized range test, $p<0.05$).

나무와 양버즘나무에서 에마멕틴벤조에이트와 아세타미프리드의 잔류량은 편차가 많았지만 에마멕틴벤조에이트는 느티나무에서 검출량이 10배 이상 많았으나 아세타미프리드는 양버즘나무에서 높게 나타났다. 두 수종에서 각각의 농약 잔류량 조사는 느티나무에서는 수간주입 4주 후, 양버즘나무에서는 83일 후에 이루어져 직접적으로 차이를 비교할 수는 없다. 이는 통도조직의 세포 크기에 따라 물의 이동속도가 다르기 때문에 수간주입 한 약액의 상승 속도가 산공재에 비하여 환공재 활엽수에서 빠르다(Cha et al., 2020; Chaney, 1986). 따라서 환공재인 느티나무가 산공제인 양버즘나무에 비하여 약액의 이동속도가 빠르고, 이는 특정 위치에서의 잔류량에 영향을 미칠수 있다. 또한 수간주입 후 잔류 분석을 위한 시료 채취 시기가 동일한 산공재 왕벚나무와 환공재 느티나무의 경우 수간주입한 에마멕틴벤조에이트의 유효성분 함량이 각각 2.15%와 6%로 차이가 있어 직접적인 양적 비교를 할 수 없지만 함량이 높은 느티나무에서 에마멕틴벤조에이트의 검출량이 10배이상 높게 나타났는데 직경과 길이가 더 큰 도관을 가진 환공재의 특성(Chaney, 1986)으로 인해 이동량이 많아져 검출량이 많은지 여부에 대해서는 추후 동일 함량 처리 후 연구가 수행되어야 할것으로 생각된다.

수간주입 한 농약의 잔류량이 편차가 많아 주입구의 수에 따라 차이가 없었던 것과는 달리 동일 높이의 네 방향에서 주입한 농약의 검출이 확인된 곳의 수는 양버즘나무의 에마멕틴벤조에이트와 느티나무의 아세타미프리드를 제외하고 통계적으로 유의한 차이를 보여 에마멕틴벤조에이트는 8개 처리구에서 가장 높았고, 아세타미프리드는 양버즘나무에서 4개 이상 주입구 처리에서 모든 방향에서 검출이 확인되었다. 또한 에마멕틴벤조에이트의 검출이 확인 된 위치의 잎에서는 미국흰불나방이 100% 치사가 확인되었으며 잔류량이 확인되지 않는 위치에서는 치사충이 없었다. 특히 양버즘나무의 경우 한 개 주입구 처리에서는 치사되는 흰불나방이 확인되지 않았는데 동일한 산공재인 왕벚나무에서 치사되는 미국흰불나방이 발생한 것과는 차이를 보였다. 이는 두 수종에서 수간주입 시기가 양버즘나무에서 30일정도 후에 이루어져 충분히 약액의 이동이 이루어지지 못하였기 때문으로 생각되지만 천공구의 수는 한 개로 동일하지만 양버즘나무의 경우 흉고직경의 크기가 왕벚나무보다 커서 실제 주입구 간격이 90.0 cm와 135.0 cm로 차이가 있어(Table 1) 주입구 간격의 차이로 인한 약액 이동의 제한으로 치사율에 차이를 보일수도 있었을 것으로 생각된다.

양버즘나무에서 에마멕틴벤조에이트의 검출량이나 검출위치의 수가 느티나무에 비하여 적었던 것에 반해 아세타미프리드의 검출량이나 검출위치의 수는 양버즘나무에서 높게 나타났다. 이는 잔류량 조사시기의 차이로 인해 수체 내에서 상대적인 이동속도에 차이를 보이는 두 약제의 특성에 따른 차이 일 것으로 생각되지만 시간 경과에 따른 잔류량에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 아보카도에서 디노테퓨란과 아세페이트는 이미다클로프리드에 비해 빠른 이동성을 보여 나무의 수체 내에서 약제간 이동성에 차이를 보였다(Byrne et al., 2012). 한편 합제 처리 두 수종에서 아세타미프리드의 검출량은 에마멕틴벤조에이트에 비하여 상대적으로 높게 나타났고, 검출 위치도 많아 아세타미프리드가 상대적으로 이동과 확산성이 나은 것으로 생각된다. 또한 아세타미프리드의 영향을 받는 버즘나무방패벌레의 치사율도 미국흰불나방에 비하여 높게 나타났으며 천공구의 수가 4개 이상에서는 99%이상의 치사율을 보여 높은 방제효과를 나타내었다.

본 연구는 우리나라에서 침엽수만을 대상으로 수간주입에 대한 연구가 수행되어 활엽수에서 수간주입 방법에 대한 고려가 이루어지지 못한 부분을 보완하기 위하여 기초적으로 수간 주입구의 수(주입구의 간격)에 따른 약액의 잔류량과 대상 해충에 대한 방제효과를 검토하였는데 수종의 종류나 농약의 종류에 따라 검출 위치의 수에 차이를 보였고, 대상 해충별에 따른 방제효과도 차이를 보였다. 특히 주입 간격이 20 cm이상 간격이 늘어날 경우 약액의 잔류와 방제 효과를 담보할 수 없어 침엽수에서 주입병을 이용하여 대량의 약액을 한 곳에 주입하는 방법의 활엽수 적용은 지양되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 활엽수에서 유기화합물들은 주로 바깥쪽 1~3개의 연륜을 통해 이동하는데 환공재 나무의 경우 수분 이동의 90%가 현재의 연륜에서 일어나기 때문에 얕은 주입이 효과적이며 산공재 나무의 경우 바깥쪽 3개의 연륜을 주로 이용하여 여러 연륜에 주입하는 것이 바람직한 점을 감안하여(Chaney, 1986) 주입구의 간격뿐만 아니라 천공 깊이별에 따른 약액의 잔류와 이동성, 방제 효과에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 주입된 화합물이 수관 전체에 불균일하게 분포되는 것을 줄이기 위해서는 줄기 주위에 방사형 배치의 여러 개의 주입구가 필요한 점(Aćimović et al., 2014)을 고려하여 'W'자 형태의 천공도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 '활엽수 나무주사 매뉴얼 작성'의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

Author Information and Contributions

Ki-Hyeong Park (ORCID http://orcid.org/0000-0002-8832-7643), and Sang-Tae Seo, National Institute of Forest Science, PhD.

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

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

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

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literate Cite

Aćimović S, Van Woerkom A, Reed P, Vandervoort C, et al., 2014. Spatial and temporal distribution of trunk-injected imidacloprid in apple tree canopies. Plant Management Sci. 70:1751-1760.

Archer L, Crane JH, Albrecht U. 2022. Trunk injection as a tool to deliver plant protection materials—An overview of basic principles and practical considerations. Horticulturae, 8:552. https://doi.org/10.3390/ horticulturae8060552

Benigno A, Aglietti C, Papini V, Riolo M, Moricca S. 2025. Tree endotherapy: A comprehensive review of the benefits and drawbacks of trunk injection treatments in tree care and protection. Plants, 14:3108. https://doi.org/10.3390/ plants14193108

Berger C, Laurent F. 2019. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases. Crop Prot. 124:104831. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.025

Byrne FJ, Urena AA, Robinson LJ, Krieger RI, Doccola J, et al., 2012. Evaluation of neonicotinoid, oganophosphate and avermectin trunk injections for the management of avocado thrips in California avocado groves. Pest Manag. Sci. 68:811-817.

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)

Cha B, Kim MY, Kim JK, Kim CE, Lee KJ. 2019. Influence of the injection wound size and the crown condition on the trunk-injection efficiency in Zelkova trees. J. Agric. Life Sci. 53(1):73-84. (In Korean)

Chaney WR. 1986. Anatomy and physiology related to chemical movement in trees. J. Arboric. 12(4):85-91.

Flowera CE, Daltona JE, Knightb KS, Brikhaa M, Gonzalez-Melera 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. 14:790-795.

Hu J, Wang N. 2016. Evaluation of the spatiotemporal dynamics of oxytetracycline and its control effect against citrus Huanglongbing via trunk injection. Phytopathology, 106:1495-1503.

Kang H, Lee H, Choi J, Lee J, Kwon O, et al., 2022. 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. Korean J. Pestic. Sci. 26(4):273-280. (In Korean)

Korea Forest Service (KFS). 2026. Methods to prevent pine wood nematode. https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000837&mn=AR04_02_04_03. (Accessed Aug. 15, 2026). (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 DG, Lee SM, Jung YH, Kim YS, Kang GR, et al., 2026. Recommendation of representative tree species for pesticide efficacy and phytotoxicity testing considering tree species and planting structure in residential areas. Korean J. Pestic. Sci. 30(3):153-171. (In Korean)

Lee SM, Jung YH, Seo S, 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)

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)

Rural Development Administration (RDA), 2026. Pesticide safety information system. Rural Development Administration. Jeonju, Korea. https://psis.rda.go.kr/psis (Accessed Aug. 1, 2026). (In Korean)

Sadof C, Gula S, Purcell L, Ginzel M. 2022. Factors affecting efficacy of trunk-injected emamectin benzoate to manage emerald ash borer. Arboric. Urban For. 48(3):165-175.

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. 60:42-48.

Ugine, T.A., Gardescu, S., Hajek, A.E., 2013. The within-season and between-tree distribution of imidacloprid trunk-injected into *Acer platanoides* (Sapindales: sapindaceae). J. Econ. Entomol. 106:874-882. https://doi.org/10.1603/EC12329.

Umebayashi T, Utsumi Y, Koga S, Inoue S, Shiba Y, et al., 2007. Optimal conditions for visualizing water-conducting pathways in living trees by the dye injection method. Tree Physiol. 27(7):993-999.

왕벚나무와 느티나무, 양버즘나무에서 수간주입 주입구의 간격이 emamectin benzoate와 acetamiprid의 효과에 미치는 영향

박기형[1] · 서상태[1] · 이상명[2] · 정영학[2] · 이동운[3,4]*

[1]국립산림과학원 산림병해충연구과, [2]㈜에스엠바이오비전, [3]경북대학교 곤충생명과학과,
[4]경북대학교 질병매개무척추동물연구소

요 약 나무에서 병해충 방제를 위하여 수간부위에 물질을 주입하는 수간주사(=나무주사)는 살포 된 물질이 비표적 생물이나 환경에 노출될 우려가 적고, 대상 병해충에만 작용 가능한 방제방법이다. 수간주입 된 물질의 수체 내 이동은 나무의 통도세포 구성과 종류에 따라 이동양상에 차이를 보인다. 본 연구는 침엽수와 통도세포의 종류가 다른 활엽수(왕벚나무, 양버즘나무-산공재, 느티나무-환공재)를 대상으로 수간주입 시 천공구의 간격(수)이 주입한 농약(에마멕틴 벤조에이트 2.15% 유제, 아세타미프리드+에마멕틴벤조에이트 10+6% 액제)의 분포와 잔류, 대상해충에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다. 농약의 잔류량은 천공구멍의 간격(수)에 따라 유의한 차이를 보이지 않았으나 각 방위별 검출 지점의 수는 천공 구멍의 간격이 좁을수록 많아져 8개 천공(천공 간격 5 cm)에서 가장 높았다. 수간주입 간격이 넓을수록 미국흰불나방에 대한 살충효과가 감소하였으며 버즘나무방패벌레도 동일한 경향을 보였다. 농약의 종류에 따라 수체 내 분산의 차이가 있어 에마멕틴벤조에이트에 비해 아세타미프리드의 검출 지점 수가 많았다. 활엽수에서 농약의 수간주입은 주입구의 간격에 따라 분산과 분포, 대상 해충에 대한 약효에 영향을 미치기 때문에 주입구 간격을 최소화하여야 할 것으로 판단된다.

핵심어: 미국흰불나방, 산공재, 아세타미프리드, 에마멕틴벤조에이트, 환공재

Supplementary table 1. Analysis instrument conditions

Parameter	Condition
Instrument	LC: Nexera HPLC 40D X3 UPLC (Shimadzu, Kyoto, Japan) MS/MS: LCMS-8050 (Shimadzu, Kyoto, Japan)
Column	Shim-pack XR-ODS II, C18 (75 mm × 2.0 mm, 2.2 μm)
Flow rate	0.2 mL/min
Injection volume	10 μL
Oven temp.	40°C
Mobile phase	A: 0.1%(v/v) formic acid, 5 mM ammonium acetate in Water B: 0.1%(v/v) formic acid, 5 mM ammonium acetate in MeOH

Gradient	Time (min)	A (%)
1.00	95	5
1.50	45	55
5.00	40	60
10.00	10	90
12.00	2	98
15.00	2	98
15.10	95	5
17.00	95	5

MS/MS condition	
Interface temp.	150°C
Heating block temp.	400°C
Desolvation line temp.	261°C
DL Temperature	250°C
Heating Gas Flow	10.00 L/min
Drying Gas Flow	10.00 L/min
Nebulizer Gas Flow	3.00 L/min