농약과학회지 (Korean J. Pestic. Sci.)
Vol. 30, No. 2, pp. 145-152 (2026)
Open Access https://doi.org/10.7585/kjps.2026.30.2.145
ORIGINAL ARTICLES

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

토마토뿔나방 방제를 위한 국내 등록 살충제들의 약효와 Cyantraniliprole의 토양 관주 효과

선현오[1] · 차욱현[1] · 김광호[1] · 김이선[1] · 서인후[2] · 정인홍[1]*
[1]국립농업과학원 해충잡초방제과, [2]전북대학교 농생물학과

Testing Efficacy of 11 Insecticides and Cyantraniliprole Soil Drench Against Tomato Leaf Miner (*Phthorimaea absoluta*) to Develop Effective Management Strategies in Greenhouse Tomatoes

Hyunoh Sun[1], Wook-Hyun Cha[1], Kwang-Ho Kim[1], Leesun Kim, In hu Seo[2], and In-Hong Jeong[1]*
[1]Pest and Weed Control Division, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea
[2]Department of Plant Medicine, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea
(Received on May 8, 2026. Revised on June 18, 2026. Accepted on June 18, 2026)

Abstract As an invasive pest native to South America, the tomato leaf miner, *Phthorimaea absoluta*, was first detected in greenhouse tomatoes in Korea in 2024. We evaluated the leaf-dipping efficacy of 11 registered insecticides and the residual activity of cyantraniliprole that is applied as a soil drench, targeting the 2nd to 3rd instar larvae. Pyrethroid insecticides were associated with low mortality (40–56.7%), whereas eight non-pyrethroid products achieved 93.3-100% mortality. Spinetoram, emamectin benzoate, and cyantraniliprole were also highly effective against large larvae (≥ 5 mm). In foliar spray assays, conducted 4 to 72 hours after inoculation, cyantraniliprole and emamectin benzoate showed limited mortality (< 60%). However, the soil drench application of cyantraniliprole produced complete mortality (100%) from day 3 post treatment and remained at ≥63.3% through 28 days post treatment. In a separate leaf infestation assay using cyantraniliprole, damaged leaf rates were 45.6% in the untreated control, 11.8% in the simultaneous adult release and insecticide treatment group, and 6.1% in the 5-day pre-treatment group (soil drench application before adult release). Our results suggest that early soil drench application combined with rotational foliar sprays could be an effective, integrated management strategy to inhibit *P. absoluta* in greenhouse tomato production.

Key words: Cyantraniliprole, Greenhouse tomatoes, Soil drench, Systemic insecticides, Tomato leaf miner

서 론

토마토뿔나방(*Phthorimaea absoluta*, tomato leaf miner)은 뿔나방과(Gelechiidae)에 속하는 남미 기원의 침입해충으로, 2006년 스페인에서 최초 보고된 이후 유럽, 지중해 연안, 아프리카, 아시아 등 전 세계로 빠르게 확산되어 토마토 재배에 심각한 경제적 피해를 유발하고 있다(Biondi et al., 2018; Desneux et al., 2010). 본 종의 학명은 기존에 *Tuta absoluta*로 알려져 왔으나 최근 분류학적 재검토를 통해 *Phthorimaea absoluta*로 재분류되었으며(Chang and Metz, 2021), 두 학명이 국내외 문헌에서 혼용되는 경우가 있어 방제 연구 및 등록 정보 해석 시 주의가 필요하다. 토마토뿔나방 유충은 부화 직후 짧은 시간 내에 잎, 줄기 및 과실의 조직 내부로 잠입하여 엽육(mesophyll)을 가해하며, 고밀도 발생 시 수량 감소와 상품성 저하를 초래한다(Desneux et al., 2010).

토마토뿔나방은 세대 기간이 짧고, 연간 발생 세대수가 많아 살충제에 대한 노출 빈도가 높으며, 남미와 지중해 지

*Corresponding author
E-mail: ihjeong1@korea.kr

역에서는 이미 피레스로이드계(IRAC MoA 3a), 스피노신계(5), 디아마이드계(28) 등 여러 작용기작의 살충제에 대한 저항성이 광범위하게 보고되어 있다(Campos et al., 2014; Haddi et al., 2012; Roditakis et al., 2015). 국내에서는 2024년 3월 경기도 파주시 시설 토마토 재배지에서 처음 공식 확인되었고(Lee et al., 2024), 이후 경기지역 여러 시군으로 확산이 보고되었다(Lee and Lee, 2025). 이러한 상황은 국내 시설 토마토 재배지에서 본 해충의 조기 정착과 확산 가능성이 높음을 시사하며, 신속하고 체계적인 방제 대응이 필요하다 할 수 있다.

현재 국내에는 토마토, 가지, 감자, 고추 등 7개 가지과 작물을 대상으로 피레스로이드계, 스피노신계, 디아마이드계, 아버멕틴계, 옥사디아진계 등 다양한 작용기작의 살충제 11품목이 긴급 직권등록되어 사용되고 있다(RDA, 2024). 침입 초기 단계에서 국내 유입 개체군의 약제 감수성 수준을 파악하는 것은 저항성 발달을 예방하고 장기적 방제 전략을 수립하는 데 필수적이다(IRAC, 2023). 그러나 토마토뿔나방 유충은 부화 후 빠르게 엽육조직 내부로 잠입하므로, 경엽 살포 약제의 효과는 처리 시점과 유충의 잠입 정도에 따라 크게 달라질 수 있다. 따라서 잎 내부로 잠입한 유충에 대해서도 일정 기간 약효를 유지할 수 있는 침달성 또는 침투이행성 약제의 활용이 중요하다.

국내 토마토뿔나방을 대상으로 한 최근 연구에서도 spinosad, chlorfenapyr, cyantraniliprole 및 broflanilide가 경엽 처리 조건에서 엽육조직 내 유충에 대해 높은 침달성 효과를 보였으며, 이 중 cyantraniliprole은 뿌리흡수 후 전신이행성도 뚜렷하게 나타난 것으로 보고되었다(Kwon et al., 2025). 또한 침투이행성 약제는 토양에 처리한 후 뿌리를 통해 흡수되어 지상부 조직으로 이동함으로써 잎 내부에 잠입한 유충에 대해서도 일정 기간 살충 효과를 발휘할 수 있다(Cloyd et al., 2011). 특히 cyantraniliprole은 토마토에서 엽조직으로의 흡수와 식물체 내 이동성이 보고되어 있으며(Anderson et al., 2013; Barry et al., 2015), 정식 초기 토양 관주 처리는 과실 내 잔류 문제를 줄이면서 초기 밀도를 억제하는 데 유리할 것으로 기대된다. 또한 담배가루이 방제를 위한 침투이행성 약제의 트랩 식물 처리 연구에서도 유사한 방제 효과가 보고된 바 있다(Kim et al., 2023).

따라서 본 연구는 국내 등록된 토마토뿔나방 방제용 살충제 11품목의 실내 약효를 엽침지 생물검정으로 평가하고, 유충 잠입 경과 시간에 따른 경엽 처리 효과를 비교하며, cyantraniliprole의 토양 관주 처리에 따른 잔류 살충 효과와 피해엽률 억제 효과를 확인하고자 수행하였다. 이를 통해 국내 토마토뿔나방 방제에 적용 가능한 초기 방제 전략과 약제 활용 방향을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

시험해충

2024년 3월 경기도 파주시 소재 시설 토마토 재배 포장에서 토마토뿔나방 유충을 채집하여 국립농업과학원 해충잡초방제과에서 누대 사육하면서 시험에 사용하였다. 사육은 온도 25 ± 5°C, 상대습도 60 ± 5%, 광주기 16L:8D 조건의 사육실에서 수행하였으며, 토마토(서광, 홍농씨앗)를 기주식물로 공급하였다. 시험에는 주로 2–3령 유충(체장 1.59–3.86 mm)을 사용하였으며, 침투이행성 약제 약효 확인 목적의 보조 시험에는 5 mm 이상의 노령 유충도 활용하였다.

Table 1. Tested insecticides registered for *Phthorimaea absoluta* control in Korea

Insecticide	Form.[a)]	A.I. (%)[b)]	DF[c)]	MoA[d)]	Target crops
Deltamethrin	EC	1	1000	3a	Eggplant, Potato, Chilli, Bell pepper, Tobacco
Bifenthrin	SC	2	1000	3a	Tobacco
Bifenthrin	EC	1	1000	3a	Chilli, Bell pepper
Spinetoram	SC	5	2000	5	Eggplant, Potato, Chilli, Bell pepper, Tomato, Cherry tomato
Emamectin benzoate	EC	2.15	2000	6	Eggplant, Potato, Chilli, Bell pepper, Tomato, Cherry tomato
Indoxacarb	SC	5	1000	22a	Eggplant, Potato, Chilli, Bell pepper
Metaflumizone	EC	20	2000	22b	Eggplant, Chilli, Bell pepper, Tomato, Cherry tomato
Cyantraniliprole	DC	5	1000	28	Tomato, Cherry tomato
			2000		Eggplant, Potato, Chilli, Bell pepper
Fluxametamide	EC	9	2000	30	Chilli, Bell pepper, Tomato, Cherry tomato
Fluxametamide	EW	4.5	2000	30	Eggplant
Pyridalyl	EW	10	1000	un	Eggplant, Chilli, Bell pepper, Tomato, Cherry tomato

[a)] Form.: formulation; DC, dispersible concentrate; EC, emulsifiable concentrate; EW, emulsion oil in water; SC, suspension concentrate
[b)] A.I.: Active ingredient concentration(%)
[c)] DF: dilution factor
[d)] MoA: IRAC mode of action group number; un, unknown.

시험 약제

토마토뿔나방 방제용으로 국내에 등록된 살충제 11품목을 대상으로 실내 약효를 검정하였다. 각 약제의 유효성분, 제형, 함량, 희석배수, 작용기작(MoA), 적용 작물 등의 세부 정보는 Table 1에 제시하였으며, 작용기작 분류는 IRAC 체계를 기준으로 하였다(IRAC, 2023).

엽침지법에 의한 약효 검정

엽침지법(leaf-dipping bioassay)을 이용하여 각 약제의 권장 희석배수에서의 살충 효과를 평가하였다. 토마토 잎을 채취하여 약제 희석액에 약 30초 동안 침지한 뒤 음건 후 습윤 여과지(Adventec No.1, Toyo Roshi Kaisha Ltd.)를 깐 페트리접시(직경 90 mm)에 준비된 잎을 넣고 2-3령 유충 10마리 접종하였다. 각 처리구는 하나의 페트리접시를 1반복으로 하여 3반복으로 수행하였으며, 처리 후 72시간 후 생존 유충 수를 조사하여 살충률을 산출하였다. 무처리구 대비 보정 살충률은 Abbott's공식(Abbott, 1925)을 적용하였다.

처리시기별 경엽 약효 검정

유충의 잎 내부 잠입 경과 시간에 따른 경엽 처리 약효 변화를 평가하였다. 토마토 소엽이 10-12개 있는 복엽을 절단하고 절단면을 증류수가 들어있는 삼각플라스크에 꽂아 시들지 않게 준비하고, 토마토뿔나방 2–3령 유충 10마리를 각 소엽당 1마리 수준으로 접종하여 잎의 내부 침입을 유도하였다. 충 접종 후 4, 24, 48 및 72시간째에 약제를 플라스틱 건 스프레이(TRUSCO, TSG-500F-R, 500 ml)를 이용하여 복엽에 약제가 흐르도록 충분히 경엽 스프레이 처리하였다. 이 때 약제가 삼각플라스크 내에 들어가지 않도록 복엽을 미리 밖으로 꺼내어 스프레이 하였으며, 30분 음건 후 다시 삼각플라스크에 꽂았다. 시험 약제는 emamectin benzoate 유제(2,000배)와 cyantraniliprole 분산성액제(1,000배)를 사용하였으며, 각 처리구는 3반복으로 구성하였다. 약제처리 72시간 후 엽육 속의 생존 유충 수를 조사하여 살충률을 산출하였다.

토양 관주 처리에 의한 침투이행 효과 평가

화분(이색포트 12호, Ø120 × 105 mm)에 원예용 상토(바로커, ㈜서울바이오)를 넣고 토마토 유묘를 정식하여 적당한 크기(초장 평균 33 cm)까지 생육을 유도하였다. Cyantraniliprole 분산성액제를 1,000배(50 ppm) 농도로 조제하여 화분당 40 mL를 토양 관주하였으며, 이후 관수는 화분받침에 물을 분무하여 서서히 공급함으로써 약제 용탈을 최소화하였다. 이 처리량(50 ppm × 40 mL = 2.0 mg a.i./pot)은 국내 등록 cyantraniliprole 액상수화제의 정식기 토양 관주 약량(약 1.866–2.330 mg a.i./pot)을 참고하여 설정하였다. 무처리 대조구는 약제를 처리하지 않고 동일한 조건에서 관리하였다.

토양 처리 3, 7, 14, 24, 28일째에 각 처리구에서 식물 초장의 중간부위에서잎을 채취하고 토마토뿔나방 2–3령 유충 10마리를 접종하여 습윤 여과지가 있는 페트리접시에 놓고, 접종 72시간 후 생존 유충 수를 조사하여 살충률을 산출하였다. 각 처리구는 3반복으로 구성하였으며, 토마토 잎을 채취할 때 식물체 초장(cm)도 함께 기록하였다.

토양처리에 따른 피해엽률 조사

토양 관주 처리 후 신규 산란에 의한 유충 발생 억제 효과를 피해엽률로 평가하였다. 시험은 8월말 국립농업과학원 종합유리온실 내에 측창은 열어둔 조건(온도 30 ± 10°C, 상대습도 60 ± 15%)에서 실시하였다. Cyantraniliprole 분산성액제를 1회 토양 관주 처리한 후, 우화 3일이내의 암컷 성충을 처리구당 10마리씩 방사하여 산란을 유도하였다. 처리 조건은 ① 무처리(Untreated, A), ② 성충 방사와 약제 동시 처리(Simultaneous, B), ③ 성충 방사 5일 전 약제 사전 처리(Pre-applied, C)의 3개로 구성하였으며, 각 조건의 처리에는 작물을 3그루씩을 넣어 반복으로 사용하였다. 성충 방사 14일 후 토마토 잎 전체를 조사하여 피해엽수를 기록하고, 총 엽수 대비 피해엽 비율(피해엽률, %)을 산출하였다.

통계 분석

살충률 및 피해엽률 데이터는 시험 목적에 따라 일원배치 또는 이원분산분석으로 처리구 간 유의성을 검정하였다. 처리시기별 경엽 스프레이 약효 시험은 약제 종류와 처리 시점을 고정요인으로 하는 이원분산분석(two-way ANOVA)으로 분석하였고, 그 외 처리구 비교는 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 후 Tukey의 HSD (Honestly Significant Difference, HSD)검정을 적용하였다. 통계분석은 SPSS v.13 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하였다.

결 과

권장 희석배수에서의 살충효과

국내 등록 살충제 11품목의 권장 희석배수에서 2–3령 유충에 대한 살충 효과를 엽침지법으로 평가한 결과(Table 2), 약제 간 살충 효과의 유의한 차이가 확인되었다(Tukey's HSD test, $p < 0.05$). 피레스로이드계 약제인 deltamethrin 유제와 bifenthrin 현탁제·유제는 상대적으로 낮은 살충률을 보인 반면, 스피노신계, 아버멕틴계, 옥사디아진계, 디아마이드계, 이속사졸린계 및 미분류계 약제는 전반적으로 높은 살충 효과를 나타내었다.

유충 잠입 경과 시간에 따른 경엽 처리 약효 변화

유충 접종 후 4–72시간에 cyantraniliprole 분산성액제와

Table 2. Mortality of *Phthorimaea absoluta* larvae at recommended concentration of 11 registered insecticides

Insecticide	Form.	Mortality (%)[a]	
		2–3 instar	5 mm+ instar
Deltamethrin	EC	40.0 ± 10.0 b	-
Bifenthrin	SC	56.7 ± 15.3 b	-
Bifenthrin	EC	40.0 ± 17.3 b	-
Spinetoram	EC	100.0 ± 0.0 a	96.7 ± 5.8 a
Emamectin benzoate	EC	100.0 ± 0.0 a	93.3 ± 11.5 a
Indoxacarb	SC	100.0 ± 0.0 a	-
Metaflumizone	EC	93.3 ± 11.5 a	-
Cyantraniliprole	DC	100.0 ± 0.0 a	93.3 ± 5.8 a
Fluxametamide	EC	100.0 ± 0.0 a	-
Fluxametamide	EW	100.0 ± 0.0 a	-
Pyridalyl	EW	100.0 ± 0.0 a	-

[a] Means ± SD within each column followed by different letters are significantly different [Tukey's HSD test, $F(15, 32) = 62.024$, $p < 0.05$]. -: not tested.

Table 3. Mortality of *Phthorimaea absoluta* larvae after foliar spray treatment at different time intervals after larval inoculation on tomato leaves

Time after larval inoculation	Mortality (%)[a]	
	Cyantraniliprole DC	Emamectin benzoate EC
4 hr	56.7 ± 5.8	40.0 ± 10.0
24 hr	43.3 ± 11.5	40.0 ± 10.0
48 hr	50.0 ± 10.0	33.3 ± 11.5
72 hr	56.7 ± 5.8	43.3 ± 5.8

[a]Values represent Abbott's corrected mortality (means ± SD of three replicates). Two-way ANOVA indicated a significant insecticide effect [$F(1,16) = 11.25$, $p = 0.004$], but no significant effects of treatment time [$F(3,16) = 1.38$, $p = 0.284$] or insecticide × treatment time interaction [$F(3,16) = 0.72$, $p = 0.556$].

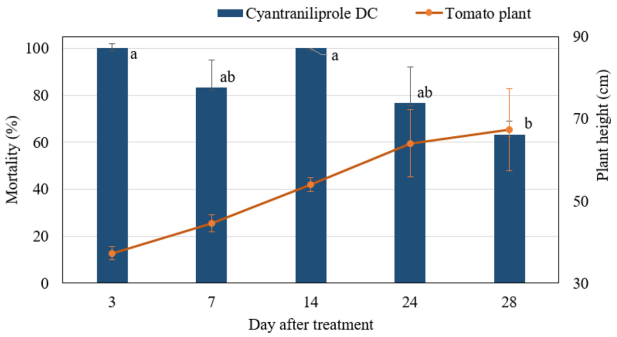

Fig. 1. Mortality of *Phthorimaea absoluta* larvae on tomato leaves at various intervals after soil drench application of cyantraniliprole DC (50 ppm, 40 mL/pot). Mortality and plant height were presented in dependently to show temporal changes in insecticidal activity and plant growth after treatment. Bars (left axis) represent mean mortality ± SD (n = 3). Line (right axis) indicates mean plant height ± SD (n=3).

emamectin benzoate 유제를 경엽 처리한 결과(Table 3), 두 약제 모두 잎 내부에 잠입한 유충에 대해 제한적인 살충 효과만을 나타냈다(무처리 대조구 살충력은 0%였음). 이원분산분석 결과 약제 종류에 따른 차이는 유의하였으나, 처리 시점에 따른 차이와 약제 × 처리시점 상호작용은 유의하지 않았다. Cyantraniliprole이 emamectin benzoate보다 전반적으로 높은 살충률을 보였으나, 두 약제 모두 60% 이하의 살충률에 머물러 잠입 후 경엽 살포의 방제 효과는 제한적이었다.

침투이행성 약제의 토양 관주에 따른 살충 효과

Cyantraniliprole 분산성액제를 토양 관주한 후 처리 3일부터 28일까지 토마토 잎에서 높은 살충 효과가 유지되었다(Fig. 1). 처리 후 경과 일수가 증가함에 따라 살충률은 다소 변동했지만, 전 조사 시점에서 무처리 대조구(0%)보다 높았다($F(4,10) = 9.29$, $p < 0.05$). 또한 처리 기간 동안 식물체 초장이 지속적으로 증가했음에도 살충 효과가 유지되어, 토양 처리된 약제가 생장 중인 식물체의 신생 조직으로 이행되었음을 시사하였다.

토양 처리에 따른 피해엽률 억제 효과

Cyantraniliprole 토양 관주 후 성충을 방사하여 산란을 유도한 결과(Fig. 2), 전체 처리구의 토마토 총엽수는 평균 128개였으며, 무처리구의 피해엽률은 45.6%, 성충 방사와 동시에 처리한 구는 11.8%, 5일 전 사전 처리한 구는 6.1%였다. 세 처리구 간 피해엽률은 모두 유의한 차이를 보였으며(Tukey's HSD test, p < 0.05), 사전 처리구에서 가장 낮은

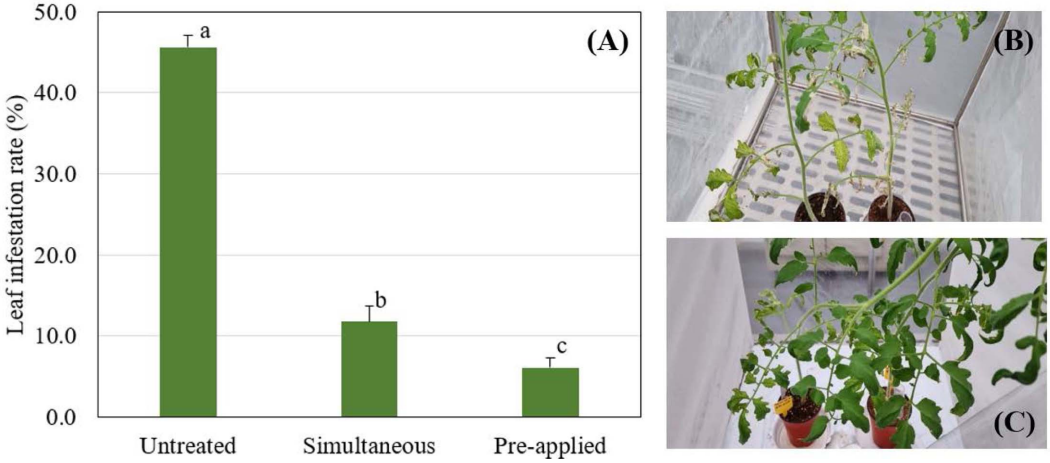

Fig. 2. (A) Leaf infestation rate of *Phthorimaea absoluta* on tomato plants under three soil-treatment regimes. Untreated (no insecticide treatment), Simultaneous (cyantraniliprole DC applied on the same day as adult release), and Pre-applied (cyantraniliprole DC applied 5 days before adult release). Bars represent mean ± SD; different letters indicate significant differences (Tukey's HSD test, $p < 0.05$). (B) Photo of untreated control plants; (C) Photo of pre-applied treatment plants after 14-day infestation.

피해엽률이 확인되었다. 방제가[(무처리구 피해엽률-처리구 피해엽률)/무처리구 피해엽률 × 100]로 환산하면 성충 방사와 동시에 처리한 구는 74.2%, 5일 전 사전 처리한 구는 86.6% 였다.

고 찰

본 연구에서 피레스로이드계 약제(deltamethrin, bifenthrin)는 2–3령 유충에 대해 40.0–56.7%의 낮은 살충률을 나타내었다. 이는 감수성 표준 계통에서 피레스로이드계 약제의 살충률이 95% 이상으로 보고된 것과 비교할 때(Haddi et al., 2012), 추천농도 조건에서 국내 유입 개체군의 피레스로이드계 약제에 대한 감수성이 상대적으로 낮을 가능성을 시사한다. 본 연구는 추천농도 조건에서의 약효 비교 시험으로, 저항성 여부를 판단하기 위해서는 감수성 기준계통과의 비교 및 resistance ratio 분석이 필요하다. 토마토뿔나방에서 피레스로이드 저항성의 주요 기작으로는 kdr 돌연변이와 CYP450 단일산소화효소에 의한 산화적 대사 저항성이 확인된 바 있으며(Haddi et al., 2012), 침입 개체군의 원산지와 침입 경로가 저항성 수준에 중요한 영향을 미친다. 따라서 국내 유입 계통에 대한 저항성 비율(resistance ratio)의 정량적 산출과 저항성 기작 규명을 위한 후속 연구가 필요하다. 이러한 결과는 경기지역 토마토뿔나방 개체군을 대상으로 한 Lee and Lee (2025)의 약제감수성 결과와도 대체로 일치하였다. 이들의 연구에서도 deltamethrin EC는 실내검정에서 낮은 방제가를 보인 반면, spinetoram SC와 emamectin benzoate EC, indoxacarb SC, metaflumizone EC, fluxametamide EC는 90%이상의 살충력을 보였고, spinetoram SC와 fluxametamide EC는 포장검정에서도 90% 이상의 방제가를 나타내 국내 유입 개체군에 대해 비피레스로이드계 약제의 상대적 유효성이 확인되었다. 다만 pyridalyl의 경우 본 연구에서는 높은 살충률을 보였으나 Lee and Lee(2025)의 실내검정에서는 80% 미만의 방제가를 보여 차이가 있었다. 이는 시험 개체군, 유충 영기, 생물검정 방법, 조사 시점 또는 약제 처리 조건의 차이에 기인할 수 있으며, 국내 개체군 간 약제감수성 차이를 추가로 조사할 필요가 있다.

5 mm 이상의 노령 유충에 대한 보조 시험에서 spinetoram, emamectin benzoate, cyantraniliprole이 93.3–96.7%의 높은 살충률을 유지한 것은, 이들 약제가 적어도 본 시험 조건에서는 노령 유충에 대해서도 비교적 안정적인 살충 효과를 유지할 수 있음을 의미한다. 그러나 비피레스로이드계 약제들도 연간 8–12세대의 높은 세대수로 인해 지속적인 선택압(selection pressure)이 가해질 경우 신속하게 저항성이 발달할 수 있음이 이미 해외에서 확인되었다(Biondi et al., 2018; Campos et al., 2014). 따라서 IRAC의 저항성 관리 지침에 따른 작용기작 그룹별 교호살포 전략의 철저한 이행이 중요하다(IRAC, 2023).

처리시기별 경엽 스프레이 시험에서 cyantraniliprole과 emamectin benzoate의 살충률은 각각 43.3–56.7% 및 33.3–43.3% 수준으로 나타났으며, 처리시점에 따른 유의한 차이는 확인되지 않았다. 이는 토마토뿔나방 유충이 부화 후 비교적 짧은 시간 내에 엽육 내부로 이동하는 생태적 특성과 함께, 본 시험 조건에서 약제가 유충이 존재하는 위치까지 충분히 도달하는 데 한계가 있었기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 약제의 침달성 또는 식물체 내 이동성이 약효 발현에 중요한 요소이지만, 실제 방제 효과는 약제 특성뿐 아니라 처리시기, 약제의 제형, 잎 조직 내 이동 정도 및 유충의 잠입 상태에 의해 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 따라서 잎 내

부에 잠입한 유충을 대상으로 한 경엽처리의 경우, 약제 선택뿐 아니라 처리 시점과 방법을 함께 고려해야 할 필요가 있다. 이와 관련하여 Kwon et al.(2025)은 엽육조직 내에 존재하는 토마토뿔나방 2–3령 유충을 대상으로 spinosad, chlorfenapyr, cyantraniliprole 및 broflanilide를 경엽처리한 결과, 모든 약제에서 높은 침달성 효과가 나타났다고 보고하였다. 그러나 본 연구의 스프레이 시험에서는 유충 접종 후 4–72시간에 cyantraniliprole과 emamectin benzoate를 처리하였을 때 살충률이 60% 이하로 나타났다. 이러한 차이는 공시작물, 약제 종류와 농도, 살포량, 유충의 잠입 상태, 조사 시점 및 사충 판정 기준의 차이에 따른 것으로 판단된다. 따라서 침달성 보유 여부 자체가 모든 처리 조건에서 동일한 수준의 경엽 방제 효과를 보장하는 것은 아니며, 토마토뿔나방과 같이 엽육조직 내부에서 가해하는 해충의 경우 약제 처리 시기와 처리 방법이 방제 효과를 크게 좌우할 수 있다.

침투이행성 약제의 토양 관주 처리에서 확인된 28일간의 잔류 살충 효과는 경엽 처리의 시기 의존성 문제를 보완할 수 있는 중요한 특성이다. Cyantraniliprole은 IRAC MoA 28에 속하는 디아마이드계 살충제로 라이아노딘 수용체에 작용하는 것으로 알려져 있다. 또한 토양처리 또는 경엽처리 후 식물체 내 이동 특성은 제형, 처리방법 및 식물 생육조건 등에 따라 달라질 수 있으며, 이러한 특성이 엽육 내부에서 가해하는 해충의 방제효과에 영향을 줄 수 있다. Anderson et al.(2013)은 수경재배 조건에서 cyantraniliprole이 토마토의 엽조직과 과실로 흡수될 수 있음을 보고하였으며, Barry et al.(2015)는 cyantraniliprole의 식물체 내 이동성과 경엽처리 후 흡수 특성을 제시하였다. 본 연구의 결과는 이러한 선행연구와 함께 cyantraniliprole이 토마토에서 실제로 흡수·이행되어 토마토뿔나방에 대해 잔류 살충 효과를 발휘할 수 있음을 뒷받침한다. 특히 처리 후 식물체 초장이 37.3 cm에서 67.3 cm로 증가하는 동안에도 살충 효과가 유지된 것은 토양 내 약제가 뿌리를 통해 흡수된 후 성장 중인 식물체의 신생 조직으로 지속적으로 이행되었음을 시사한다. 이는 세대가 연속적으로 중첩되고 신규 산란이 지속될 수 있는 토마토뿔나방의 발생 특성상, 토양 관주 처리된 cyantraniliprole이 새로 전개되는 잎에서 부화·잠입하는 유충에 대해서도 일정 수준의 방제 효과를 제공할 수 있음을 의미한다. 또한 담배가루이 방제를 위한 침투이행성 약제의 트랩 식물 처리 연구에서도 유사한 방제 효율이 보고된 바 있어(Kim et al., 2023), 토양 관주에 의한 전신이행성 활용은 토마토뿔나방 방제에서도 충분히 응용 가능성이 있는 전략으로 판단된다.

피해엽률 시험에서 사전 처리구(Pre-applied)가 동시 처리구(Simultaneous)보다 피해엽률이 현저히 낮게 나타난 것은 약제가 식물체 내에 이동한 조건에서 토마토뿔나방 피해 발생이 감소하는 경향을 보여, 토양관주 처리가 초기 피해 억제에 기여할 가능성을 나타냈다. 한편, 토마토뿔나방의 알기간 약 3일과 유충기간 약 8.26일을 고려하면(Bajracharya and Bhat, 2018), 사전 처리구에서는 산란 후 부화 유충의 경우 약 3–5일 후 약제가 이행된 잎에 노출되는 조건이 형성된다고 볼 수 있다. 다만 실제 방제효과는 약제 흡수량, 식물 생육상태 및 재배환경에 따라 달라질 수 있으므로 포장 조건에서의 추가 검토가 필요하다.

Lee and Lee (2025)는 국내 포장검정 결과를 근거로, 토마토뿔나방의 빠른 발육속도를 고려할 때 3–5일 간격의 연속처리와 체계처리 전략이 필요하다고 제시하였다. 본 연구의 결과는 이러한 체계처리 전략에서 정식 초기 침투이행성 약제의 토양 관주 처리가 초기 밀도 억제와 이후 경엽처리 부담 완화에 기여할 수 있음을 보여준다. 따라서 정식 초기의 토양 관주와 이후 발생량 및 생육 단계에 따라 작용기작이 다른 비피레스로이드계 경엽 살충제를 교호 살포하는 통합 방제 체계는 국내 토마토뿔나방의 효과적인 장기 관리 전략이 될 것으로 판단된다. 다만 포장 조건에서의 토양 특성·관수 방식에 따른 약제 흡수 효율, 작물 및 과실 내 잔류성, 최적 처리 농도 및 시기 등은 추가 연구를 통해 보완되어야 하며, 국내 유입 계통에 대한 저항성 수준의 정량적 평가와 기작 규명도 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구과제(과제번호: RS-2025-02214176)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

Author Information and Contribution

In-Hong Jeong, Pests and Weed Control Division, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Principal researcher, https://orcid.org/0000-0002-4625-2268

Hyunoh Sun, Pests and Weed Control Division, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Junior researcher, https://orcid.org/0009-0007-1497-1632

Wook Hyun Cha, Pests and Weed Control Division, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Senior researcher

Kwang-Ho Kim, Pests and Weed Control Division, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Senior researcher

Leesun Kim, Pests and Weed Control Division, Department

of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Postdoctoral researcher

In Hu Seo, Department of Plant Medicine, Jeonbuk National University, Undergraduate student

Writing-Original Draft Preparation, Conceptualization & Research Design, **IH Jeong**; Methodology & Experimentation, **H. Sun**, **IH Seo**; Writing-review, **KH Kim**, **L Kim**; Data analysis & Writing-edition, **WH Cha**

이해상충관계

저자들은 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

Abbott WS, 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. J. Econ. Entomol. 18(2):265-267.

Anderson JJ, Bookhart SW III, Clark JM, Jernberg KM, Kingston CK, et al., 2013. Uptake of cyantraniliprole into tomato fruit and foliage under hydroponic conditions: application to calibration of a plant/soil uptake model. J. Agric. Food Chem. 61(38):9027-9035.

Bajracharya ASR, Bhat B, 2018. Life cycle of south american tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917) in Nepal. J. Entomol. Zool. Stud. 287(61):287-290.

Barry JD, Portillo HE, Annan IB, Cameron RA, Clagg DG, et al., 2015. Movement of cyantraniliprole in plants after foliar applications and its impact on the control of sucking and chewing insects. Pest Manag. Sci. 71(3):395-403.

Biondi A, Guedes RNC, Wan FH, Desneux N, 2018. Ecology, worldwide spread, and management of the invasive South American tomato pinworm, *Tuta absoluta*: past, present, and future. Annu. Rev. Entomol. 63(1):239-258.

Campos MR, Rodrigues ARS, Silva WM, Silva TBM, Silva VRF, et al., 2014. Spinosad and the tomato borer *Tuta absoluta*: a bioinsecticide, an invasive pest threat, and high insecticide resistance. PLoS ONE 9(8):e103235.

Chang PEC, Metz MA, 2021. Classification of *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917)(Lepidoptera: Gelechiidae: Gelechiinae: Gnorimoschemini) based on cladistic analysis of morphology. Proc. Entomol. Soc. Wash. 123(1):41-54.

Cloyd RA, Bethke JA, Cowles RS, 2011. Systemic insecticides and their use in ornamental plant systems. Floriculture Ornamental Biotech. 5:1-9.

Desneux N, Wajnberg E, Wyckhuys KAG, Burgio G, Arpaia S, et al., 2010. Biological invasion of European tomato crops by *Tuta absoluta*: ecology, geographic expansion and prospects for biological control. J. Pest Sci. 83:197-215.

Haddi K, Berger M, Bielza P, Cifuentes D, Field LM, et al., 2012. Identification of mutations associated with pyrethroid resistance in the voltage-gated sodium channel of the tomato leaf miner (*Tuta absoluta*). Insect Biochem. Mol. Biol. 42(7):506-513.

IRAC (Insecticide Resistance Action Committee), 2023. IRAC mode of action classification scheme. Version 10.3. Available at: https://irac-online.org (accessed 1 March 2024).

Kim L, Seo M, Jeong D, Seo BY, Lee JH, et al., 2023. Control of *Bemisia tabaci* in greenhouse tomato using systemic insecticide-treated trap plant. Korean J. Pestic. Sci. 27(4): 324-333.

Kwon DH, Jeon H, Yu GR, Im YI, Yang EY, et al., 2025. Translaminar and systemic activities of four synthetic insecticides against the tomato leafminer, *Phthorimaea absoluta*, in Korea. Korean J. Pestic. Sci. 29(3):188-193. (In Korean)

Lee HA, Lee YS, 2025. Occurrence and insecticide susceptibility of Tomato leaf miner (*Phthorimaea absoluta* (=*Tuta absoluta*)) in Gyeonggi region of Korea. Korean J. Appl. Entomol. 64(3):169-172. (In Korean)

Lee MH, Jeong D, Lee GS, Paik C, 2024. First report of Phthorimaea absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) in Korea. J. Integr. Pest Manag. 15(1):36.

RDA, 2025. Pesticide Safety Information System. Rural Development Administration. https://psis.rda.go.kr (accessed on 10 November, 2025).

Roditakis E, Vasakis E, Grispou M, Stavrakaki M, Nauen R, et al., 2015. First report of *Tuta absoluta* resistance to diamide insecticides. J. Pest Sci. 88(1):9-16.

토마토뿔나방 방제를 위한 국내 등록 살충제들의 약효와 Cyantraniliprole의 토양 관주 효과

선현오[1] · 차욱현[1] · 김광호[1] · 김이선[1] · 서인후[2] · 정인홍[1]*

[1]국립농업과학원 해충잡초방제과, [2]전북대학교 농생물학과

요 약 토마토뿔나방(*Phthorimaea absoluta*)은 침입해충으로, 2024년 국내 시설 토마토 재배지에서 발생이 확인되었다. 본 연구에서는 국내 긴급 등록된 살충제 11품목의 2--3령 유충에 대한 실내 엽침지법 약효를 평가하고, 침투이행성 약제(cyantraniliprole 분산성액제)의 토양 관주 처리에 따른 잔류 살충 효과 및 피해엽률 억제 효과를 조사하였다. 피레스로이드계 약제인 deltamethrin 유제와 bifenthrin 현탁제·유제는 각각 40%, 56%, 40%의 낮은 살충률을 보인 반면, 비피레스로이드계 8품목은 93.3–100.0%의 높은 살충 효과를 나타내었다. 또한 spinetoram, emamectin benzoate, cyantraniliprole은 5 mm 이상 노령 유충에 대해서도 9.3–96.7%의 높은 살충 효과를 유지하였다. 한편, 유충 접종 후 4–72시간에 실시한 경엽 스프레이 처리에서는 cyantraniliprole과 emamectin benzoate의 살충률이 60%이하로 제한적이었으나, cyantraniliprole 분산성액제의 토양 관주 처리에서는 처리 3일차에 높은 살충률(100%)이 확인되었고 이 효과는 28일까지 63.3% 이상으로 유지되었다. 별도로 수행한 피해엽률 시험에서는 무처리구 45.6%, 성충방사와 토양관주 동시처리구 11.8%, 성충방사 전 토양관주 처리구 6.1%로 처리구 간 유의한 차이를 보였다. 이러한 결과는 정식 초기 침투이행성 약제의 토양 처리와 작용기작별 경엽 살충제의 교호 살포를 결합한 통합 방제 전략이 토마토뿔나방 관리에 유효할 수 있음을 시사한다.

핵심어: Cyantraniliprole, 살충제 약효, 토양 관주, 침투이행성, 토마토뿔나방