

합성 접촉페로몬을 이용한 꽃노랑총채벌레의 성충 행동 교란과 이를 이용한 방제기술

박현재 · 김철영 · 정성채¹ · 김영운¹ · 김용균*

안동대학교 식물의학과, ¹㈜에이디

Behavioral Disruption of *Frankliniella occidentalis* Adults by a Synthetic Contact Pheromone and its Application to Control the Insect Pest

Hyunje Park, Chulyoung Kim, Seongchae Jung¹, Youngun Kim¹ and Yonggyun Kim*

Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong 36729, Korea

¹AD, Corp., Andong 36729, Korea

ABSTRACT: Thrips are usually not exposed to insecticide spray due to hiding at holes, gaps, or crevices of host plants with their relatively small body sizes. This study devised a strategy to use a contact pheromone to suppress the seclusive behavior of the thrips, A contact pheromone identified as 7-methyltricosane (7TM) in the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*, was added to the diet to test the preference of the thrips. Although 7TM did not change the larval behavior, it significantly induced the avoiding behavior in male adults. In contrast, the contact pheromone was preferred by the female adults. Similar behavioral changes were also observed in another flower thrips, *Frankliniella intonsa*. Based on the behavioral changes induced by the contact pheromone, a mixture of 7TM and insecticide was applied to thrips infesting hot peppers in field conditions. Compared to spinetoram treatment, its mixture treatment with 7TM enhanced the control efficacy against thrips. Interestingly, 7TM treatment alone also gave slight reduction in *F. intonsa* density, suggesting a behavioral disruption of thrips by the contact pheromone. This study suggests a novel technology to control insect pests using contact pheromone by suppressing the seclusive behavior to avoid exposure to insecticide spray.

Key words: contact pheromone, *Frankliniella occidentalis*, behavior, disruption, control

초록: 소형 곤충으로 좁은 틈새에 있는 총채벌레는 종종 살충제 살포에 노출되기 어렵다. 이에 접촉페로몬을 처리하여 은둔행동을 막으려는 행동 교란 방제 전략을 세웠다. 꽃노랑총채벌레(*Frankliniella occidentalis*)에서 밝혀진 접촉페로몬은 7-methyltricosane (7TM)으로 본 연구에서는 먹이에 이 물질을 처리하여 행동 교란 유무를 생물검정하였다. 이 접촉페로몬은 유충에게 영향을 주지 않았지만 수컷 성충으로 하여금 처리된 먹이로부터 회피하려는 행동을 유발하였다. 반면에 암컷 성충에게는 오히려 7TM이 처리된 지역으로 이동하는 행동을 유발하였다. 동일한 접촉페로몬에 대해서 대만총채벌레(*Frankliniella intonsa*)에서도 유사한 행동 변화가 관찰되었다. 이러한 7TM에 기인한 총채벌레의 행동 변화를 살충제 처리와 연결하여 고추를 가해하는 총채벌레류를 대상으로 방제효과를 검정하였다. 스피네토람 살충제 단독 처리에 비해 7TM과 혼합하여 처리하면 총채벌레류 방제효율이 증가하였다. 흥미로운 점은 7TM 단독 처리로도 대만총채벌레 밀도에 일부 감소 효과를 보여 이 물질이 총채벌레의 행동교란을 주는 것을 뒷받침하였다. 본 연구는 접촉페로몬 처리로 총채벌레의 살충제 회피 행동을 줄여 방제효과를 높인 새로운 해충방제기술을 제시한다.

검색어: 접촉페로몬, 꽃노랑총채벌레, 스피네토람, 행동, 교란, 방제

*Corresponding author: hosanna@anu.ac.kr

Received July 8 2023; Revised August 15 2023

Accepted August 16 2023

꽃노랑총채벌레(*Frankliniella occidentalis*)는 전 세계적으로 광범위하게 분포하며 유충과 성충 모두가 섭식 행동으로 채소, 과일 등 원예 농작물에 직접 피해를 주는 해충이다(Reitz et al., 2020). 이 해충은 또한 간접적으로 토마토위조반점바이러스(TSWV: tomato spotted wilt virus)를 매개하여 손실을 가중시키고 있다(Pappu et al., 2009; Webster et al., 2011; Zhao et al., 2014). 특히 이들이 가해하는 작물 가운데 고추는 이 해충이 매개하는 TSWV 바이러스에 의해 일명 칼라병을 유발하여 막대한 경제적 손실을 유발하고 있다(Kwon et al., 2018). 국내 최대 고추 산지인 안동에서 꽃노랑총채벌레는 대표적 우점종으로 전체 총채벌레 발생밀도의 약 80% 이상을 차지하고 있다(Kim et al., 2022). 따라서 안정된 고추 생산을 추구하기 위해서는 이 총채벌레는 반드시 방제되어야 할 주요 해충이다.

다양한 화학 살충제가 등록되어 총채벌레 방제에 이용되고 있다. 이 가운데 국내는 물론이고 전 세계적으로 가장 많이 처리되는 화학 약제가 스피노사드(spinosad)이다(Jones et al., 2005). 스피노사드는 방선균의 일종인 *Saccharomyces spinosa*의 배양액에서 분리된 spinosyn A와 spinosyn D가 17:3으로 혼합된 약제로서 곤충의 중추신경계인 아세틸콜린수용체(acetylcholine receptor)와 결합하여 살충효과를 주게 된다(Sparks et al., 2021). 스피노사드 유사체인 스피네토람(spinetoram)이 spinosyn J와 spinosin L을 약 3:1 비율로 혼합하여 개발되어 살충효과를 높여주었다. 그러나 이들의 유사한 작용점을 기반으로 빈번한 약제 처리는 작용점 둔감화에 기반을 둔 약제 저항성을 유발하였다(Wan et al., 2018). 이러한 약제저항성 발달은 자연히 비화학적 총채벌레 방제기술의 개발로 이어지게 하였다. 더욱이 꽃노랑총채벌레는 기주의 틈 속에 숨어 지내는 행동 습성으로 살포된 농약에 노출되기 어려워 높은 살충효과를 지닌 약제라 하더라도 방제 효율이 떨어지게 된다(Reitz et al., 2020). 이러한 방제의 어려움을 극복하기 위해 페로몬을 이용하여 꽃노랑총채벌레의 행동 교란을 유발하고 이를 해충 방제에 응용하려는 시도가 제기되었다(Kirk et al., 2021).

꽃노랑총채벌레로부터 다양한 페로몬이 발견되었다. 먼저 먹이 이용과 교미를 위해 수컷 성충이 집합페로몬을 방출하여 암수를 모두 유인한다(Hamilton et al., 2005). 두 가지 페로몬 성분이 동정되었는데 최근 이 페로몬 성분의 생합성 과정을 탐구하면서 암수 모두에서 이들 물질의 생합성이 일어나고 실제로 암컷에서도 집합페로몬을 방출한다는 연구 결과를 발표하게 되었다(Khan et al., 2023). 또한 유충에서 분비되는 경보페로몬은 비교적 분자량이 낮은 decyl acetate (10:Ac)와 dodecyl acetate (12:Ac)가 휘발성 물질로서 유충은 물론이고 성충에도 기피 행동을 보여(Teering et al., 1993) 시설재배지의 울타리

처리로 응용하게 되었다(Kim et al., 2023). 접촉페로몬은 주로 체벽의 지질성 물질로 존재하는데, 꽃노랑총채벌레의 암컷에 비해 수컷 성충 체벽에 다량으로 존재하는 탄화수소인 7-methyltricosane이 암컷 성충으로 하여금 수컷을 인식하게 하는 접촉페로몬으로 작용한다고 보고하였다(Olaniran et al., 2013). 이 물질은 암컷으로 하여금 수컷 인식으로 교미 자세를 준비하게 하는 반면 다른 수컷들에는 상호 공격적 자세를 유발하는 상호 인식 물질로 작용하였다. 따라서 이 접촉페로몬 물질에 노출은 꽃노랑총채벌레의 행동을 교란시킬 수 있을 것으로 추정하였다.

본 연구는 접촉페로몬을 이용하여 꽃노랑총채벌레의 행동을 교란하여 살충제 접촉을 높여 방제 효율을 높이는 가설을 세우고 이를 증명하는 실험을 진행하였다. 이를 위해 접촉페로몬에 대한 유충과 성충의 행동 반응을 분석하였다. 이를 기반으로 꽃노랑총채벌레 대한 살충효과가 스피네토람 약제를 기반으로 야외 고추 재배지에서 접촉페로몬과 혼합한 약제와 단독 살충제의 각각의 방제효과를 비교 분석하였다.

재료 및 방법

공시충 실내사육

꽃노랑총채벌레는 국립농업과학원 작물보호부에서 분양받아 온도 25±2°C, 상대습도 65±5%, 14시간 광주기 조건에서 실내 사육하였다. 원형 사육용기(지름 100 mm, 높이 40 mm)를 이용하여 알부터 성충까지 사육하였다. 먹이로 5일 동안 발아시킨 강낭콩(*Phaseolus coccineus*)을 유충과 성충에게 제공하였다. 대만총채벌레(*Frankliniella intonsa*)는 충청북도 괴산군에 위치한 고추재배지에서 채집하여 상기의 사육 조건으로 실내 세대를 증식시켰다.

시험물질

7-Methyltricosane (7MT)은 경북 안동에 소재한 ㈜에이디에 주문하여 다음 합성과정(Fig. 1A 참조)으로 진행되었다.

시약, 장치 및 기기. 관 크로마토그래피는 머크사의 실리카겔(70 ~ 230 mesh ASTM)을 사용하였다. 합성된 페로몬 성분의 가스 크로마토그래피 분석은 GC 기기(Agilent, Santa Clara, CA, USA)와 DB-1 컬럼(15 m × 0.350 mm, Agilent)을 이용하여 오븐 온도 280°C, 흐름속도 1.0 ml/min, 주입 시료량 1 µl로 분석되었다.

Triphenyl(tetradecyl)phosphonium bromide (3). 1-Bromotetradecane **2** (100 g, 360.6 mmol)을 톨루엔 1 L에 넣고 다시 trip-

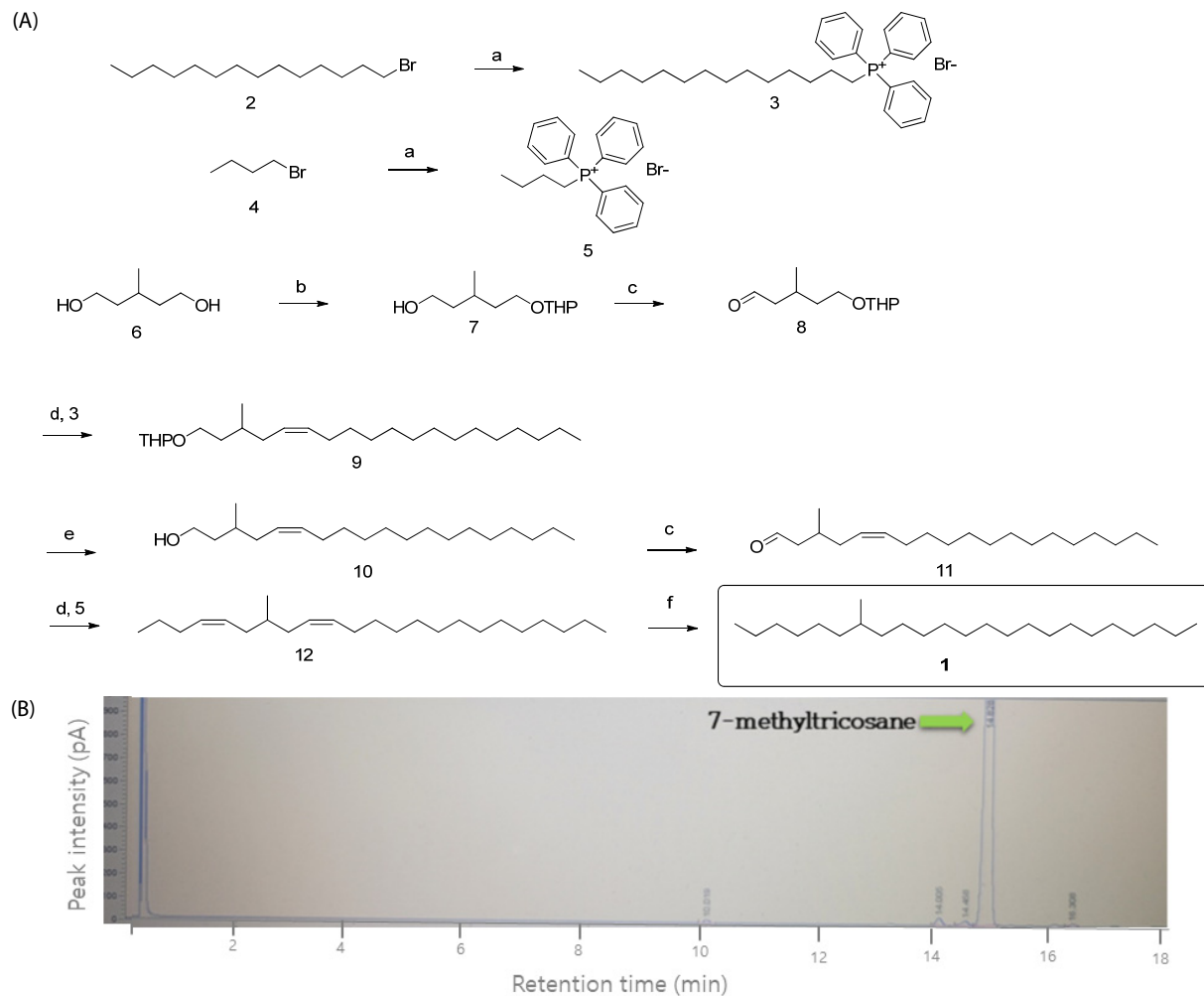


Fig. 1. Chemical synthesis of 7-methyltricosane. (A) A schematic summary of the synthesis. Reagents and conditions in each synthetic step are (a) triphenylphosphine, toluene, reflux, (b) 3,4-dihydropyran, pyridinium *p*-toluenesulfonate, tetrahydrofuran, room temperature, (c) Pyridinium chlorochromate, dichloromethane, 0°C, (d) Potassium tert-butoxide, tetrahydrofuran, room temperature, (e) *p*-toluenesulfonic acid, methanol, and (f) Palladium on carbon, methanol. Compounds in the synthetic scheme are 7-methyltricosane (1), 1-bromotetradecane (2), triphenyl(tetradecyl)phosphonium bromide (3), 1-bromobutane (4), butyltriphenylphosphonium bromide (5), 3-methyl-1,5-pentanediol (6), 3-methyl-5-((tetrahydro-2H-pyran-2-yl)oxy)pentan-1-ol (7), 3-methyl-5-((tetrahydro-2H-pyran-2-yl)oxy)pentanal (8), (*Z*)-2-((3-methylnonadec-5-en-1-yl)oxy)tetrahydro-2H-pyran (9), (*Z*)-3-methylnonadec-5-en-1-ol (10), (*Z*)-3-methylnonadec-5-enal (11), and (4*Z*,9*Z*)-7-methyltricosane-4,9-diene (12). (B) Gas chromatogram of the synthesized 7-methyltricosane.

henylphosphine (94.6 g, 360.6 mmol)을 넣고 환류하여 24 시간 교반했다. 반응 완결 후 톨루엔을 농축 및 제거하고 diethyl ether를 넣어 12 시간 교반 후 감압 건조하여 화합물 **2** (205 g, 99%)를 얻었다.

Butyltriphenylphosphonium bromide (5). 1-Bromobutane (**4**) 100 g (729.8 mmol)을 톨루엔 1 L에 넣고 다시 triphenylphosphine 179 g (729.8 mmol)을 넣고 환류하여 24 시간 교반했다. 반응 완결 후 톨루엔을 농축 및 제거하고 diethyl ether를 넣어 12 시간 교반 후 감압 건조하여 화합물 **2** (291 g, 99%)를 얻었다.

3-Methyl-5-((tetrahydro-2H-pyran-2-yl)oxy)pentan-1-ol (7). 3-Methyl-1,5-pentanediol 229.5 g (1.94 M)을 tetrahydrofuran에 넣고 교반했다. Pyridinium *p*-toluenesulfonate (4.87 g, 0.0194 M, 0.01 eq)을 넣고 교반 후 3,4-dihydropyran (177 ml, 1.94 M, 1 eq)을 방울로 첨가한 후 상온에서 12 시간 교반했다. 반응 종결 후 농축하여 용매를 제거 후 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 화합물 **7** (196 g, 50%)를 합성하였다.

3-Methyl-5-((tetrahydro-2H-pyran-2-yl)oxy)pentanal (8). Pyridinium chlorochromate (80 g, 0.37 M, 1.5 eq)를 디클로메탄 500 mL에 넣고 화합물 **7** (50 g, 0.24 M)을 천천히 일정하게

투입한 후 2 시간 교반했다. 반응 완결 후 여액(filtrate)을 농축 및 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 화합물 **8** (27 g, 54%)을 합성하였다.

(Z)-2((3-methylnonadec-5-en-1-yl)oxy)tetrahydro-2-H-pyran (9). 화합물 **5** (51 g, 94.5 mmol, 1.3 eq)을 tetrahydrofuran에 넣고 교반한 후 potassium tert-butoxide (8.4 g, 74.85 mmol, 1 eq)을 넣고 상온에서 30 분간 교반했다. 화합물 **8** (15 g, 74.85 mmol)을 tetrahydrofuran에 녹여 상온에서 천천히 투입했다. 2 시간 교반 후 물을 넣어 반응을 종결하고 ethyl acetate로 추출 및 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 화합물 **9** (15.5 g, 62%)을 합성하였다.

(Z)-3-methylnonadec-5-en-1-ol (10). 화합물 **6** (15.5 g, 46.89 mmol)을 메탄올에 넣고 교반한 후 *p*-toluenesulfonic acid (0.23 g, 0.94 mmol, 0.02 eq)을 넣고 상온에서 다시 3 시간 교반했다. 반응 종결 후 NaHCO₃ (4 g)를 넣어 농축하고, 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 화합물 **10** (12.3 g, 88.4%)을 합성하였다.

(Z)-3-methylnonadec-5-enal (11). Pyridinium chlorochromate (13.4 g, 62.2 mmol, 1.5 eq)를 디클로메탄 100 ml에 넣고 화합물 **10** (12.3 g, 41.48 mmol)을 천천히 일정하게 투입한 후 2 시간 교반했다. 반응 완결 후 여액을 농축 및 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 화합물 **11** (5 g, 41%)을 합성하였다.

(4Z,9Z)-7-methyltricos-4,9-diene (12). 화합물 **5** (8.8 g, 22.07 mmol, 1.3 eq)를 tetrahydrofuran에 넣고 교반한 후 potassium tert-butoxide (1.9 g, 16.98 mmol, 1 eq)를 넣고 상온에서 30분간 교반했다. 화합물 **11** (55 g, 16.98 mmol)을 tetrahydrofuran에 녹여 상온에서 천천히 투입한다. 2 시간 교반 후 물을 넣어 반응을 종결하고 ethyl acetate로 추출 및 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 화합물 **12** (3.2 g, 57%)을 합성하였다.

7-methyltricosane (1). 화합물 **12** (3.2 g, 9.56 mmol)을 메탄올에 녹이고 palladium on carbon (Pd/C) (160 mg, 5%)을 넣고 수소가스 하에서 교반했다. 반응 완결 후 Pd/C를 여과하고 여액을 농축 및 컬럼 크로마토그래피로 정제하여 최종화합물 **1** (3 g, 97%)을 합성하였다.

합성된 7-methyltricosane은 헥산을 용매로 시험농도를 제조하였다. 살충제 스피네토람은 액상수화제(상품명: 액셀트)로 동방아그로 제품을 구매하였다.

행동 검정

행동시험장(Fig. 1A)으로 90 × 15 mm 크기의 Petri Dish (Life Science, Seoul)를 이용하였고, 여기에 여과지를 깔고 유인 먹이인 강낭콩 두 개를 50 mm 거리를 두고 설치하였다. 이

먹이 위에 시험물질을 설치하였다. 시험물질 처리는 5 mm 원형 여과지에 10 µL의 7TM 물질을 분주하였다. 대조구에는 같은 부피의 헥산을 처리하였다. 처리된 원형 여과지를 각각 두 강낭콩에 올려놓았다. 이후 시험 개체를 양쪽 먹이로부터 40 mm 떨어진 중앙에 위치하게 하였다. 이후 상온에서 10분 동안 각 먹이에 이르는 개체를 계수하였다. 매 시험에 10마리를 설치하였고 4 반복하였다. 매 반복 대조구와 처리구의 위치를 교환하였다. 시험에 사용된 총채벌레는 2령 유충 및 우화 후 3일 이내의 성충을 각각 이용하였다.

야외 방제 시험

경북 안동시 송천동에 소재한 노지 고추재배지에서 각 처리를 난괴법 3반복으로 배치하였다. 각 시험구는 고추 개체이고 이들 개체가 거리는 최소 6 m를 유지하였다. 각 고추 개체 처리한 약제 분무량은 30 mL로서 개체 전체에 충분히 살포하였다. 처리는 두 가지 단독처리로서 0.01% 7MT과 250 ppm 스피네토람 그리고 한 가지 혼합 처리로서 0.01% 7MT + 250 ppm 스피네토람으로 구성되었다. 대조구는 약제를 희석한 물을 이용하였다. 전수 조사로 진행된 총채벌레 밀도는 처리전 밀도와 처리 후 1일 및 3일 후 밀도를 산출하였다. 방제가 산출은 대조구와 생존율 대비 백분율로 환산하여 산출하였다. 총채벌레의 구분은 Kim et al. (2021)이 제시한 성충의 형태 동정법을 이용하였다.

통계분석

실내 행동실험은 SAS의 PROC FREQ (SAS Institute, 1989)을 이용하여 빈도분석(X^2)으로 검정하였다. 야외 방제 효과는 생존율을 산정한 후 two-way ANOVA 분석을 실시하였다. 처리 평균간 비교는 최소유의차(Least Significant Difference: LSD) 검정방법을 이용하여 제Ⅱ형 오류 확률 0.05를 기준으로 판별하였다.

결과

접촉페로몬 화학합성

본 연구를 실시하기 위해 화학합성을 통해 접촉페로몬을 확보하였다(Fig. 1). 탄소 골격은 1-bromotetradecane (**2**)과 1-bromobutane (**4**)을 triphenylphosphine과 반응하여 Wittig 반응 (Vedejs and Marth, 1990)의 중간체 **3**, **5**를 각각 합성하였다 (Fig. 1A(a)). 3-Methyl-1,5-pentanediol (**6**)의 양쪽 알코올기가

운데 하나를 tetrahydrofuran (THF) 보호기를 도입하여 7을 합성하였다(Fig. 1A(b)). 한편 다른 알코올기를 알데하이드기로 산화시켰으며(Fig. 1A(c)), 이후 3과 Wittig 반응을 진행하여 9를 합성하였다(Fig. 1A(d)). 9의 THF 보호기를 제거하기 위하여 *p*-toluenesulfonic acid를 사용하여 알코올 화합물 10을 얻었다(Fig. 1A(e)). 이후 pyridinium chlorochromate로 알코올을 산화시켜 11을 만들었고, 이를 5와 Wittig 반응을 통하여 화합물

12를 얻었다. 중간체 12를 환원시켜 최종화합물 1을 합성하였다(Fig. 1A(f)). 합성된 물질의 순도는 약 97%였다(Fig. 1B).

접촉페로몬에 대한 총채벌레의 행동반응

접촉페로몬에 대한 행동 반응을 분석하기 위해 페트리디시를 이용하여 행동분석용기(Fig. 2A)를 제작하였다. 처리된 먹

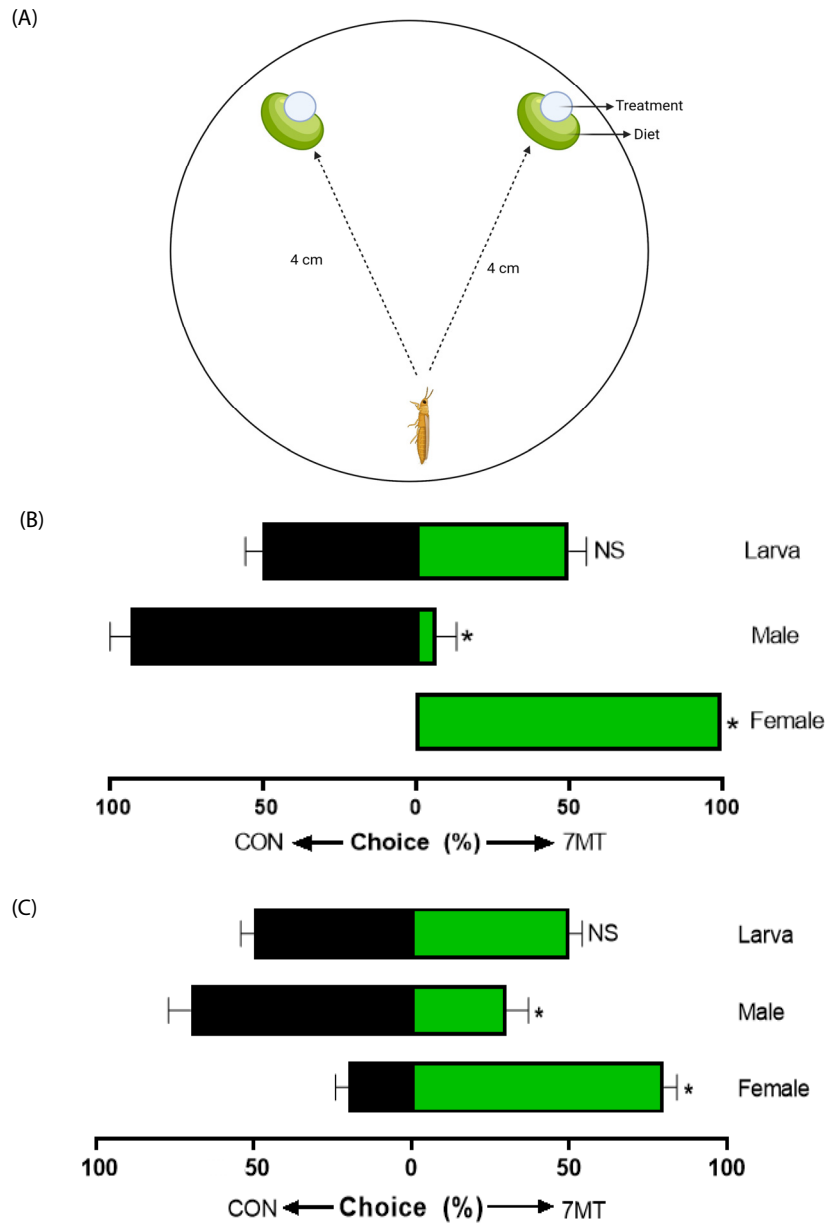


Fig. 2. Behavioral test in an arena (A) of two thrips species of *F. occidentalis* (B) and *F. intonsa* (C). In an arena, 7-methyltricosane (7TM) was treated on filter paper disc on soy bean diet. Control diet was treated with hexane solvent. After 10 min, the number of thrips reached to each diet were counted. Each treatment was replicated four times by exchanging the treatment and control positions. Asterisk stands for significant difference at Type I error = 0,05 (LSD test) while 'NS' stands for no significant difference.

이에 총채벌레를 투입하고 10분간 행동 반응을 통해 처리 먹이에 머무르는 총채벌레를 계수한 결과 유충의 경우는 두(꽃노랑총채벌레, 대만총채벌레) 총채벌레 종 모두에서 특이적 선택행동을 보이지 않았다(Figs. 2B,C). 반면에 성충의 경우는 암수에서 상반된 행동 반응을 보였다. 수컷의 경우 접촉페로몬이 설치된 먹이를 회피하는 반응을 보인 반면에 암컷은 높은 선호성을 보였다.

접촉페로몬을 이용한 스피네토람 방제 효율 증가

비교적 총채벌레에 대한 방제 효율이 높은 스피네토람에 행동교란을 일으키는 접촉페로몬을 추가하여 야외 방제 효율을 증가시키려는 연구가 실시되었다(Fig. 3). 연구가 진행된 2023년 5월말 안동지역의 노지 고추에는 꽃노랑총채벌레와 대만총채벌레가 발생하였다. 이 포장을 이용하여 단독 약제 처리 및 혼합 약제 처리가 실시되었다. 대조구인 무처리에서는 두 총채벌레의 밀도증가가 나타났다. 그러나 스피네토람과 혼합처리에

서는 전체적 밀도 감소가 뚜렷이 나타났다. 이를 구체적으로 분석하기 위해 처리 3일차의 방제가를 산출하였다(Table 1). 평균 생충율은 무처리 대비 모든 처리에서 낮아졌다. 접촉페로몬을 처리한 경우 대만총채벌레에서는 통계적으로 차이가 나게 밀도가 줄어들었지만 꽃노랑총채벌레에서는 그렇지 않았다. 스피네토람 처리는 두 총채벌레 모두에서 뚜렷하게 방제 효과를 보여 꽃노랑총채벌레에 대해서는 71.9%, 대만총채벌레에서는 80.3%의 방제가를 기록하였다. 이때 접촉페로몬을 추가하는 경우 두 총채벌레 모두에서 방제가의 증가를 보였다. 전체 총채벌레를 기준으로 방제가를 확인한 결과 스피네토람 단독 처리는 76.2%의 방제가를 보였는데, 접촉페로몬과 혼합 처리를 통해 86.2%의 방제가로 증가하였다.

고찰

농작물에 해를 주는 총채벌레를 대상으로 다양한 화학살충제가 등록되어 시판되고 있다(Park et al., 2019; Kim et al., 2022).

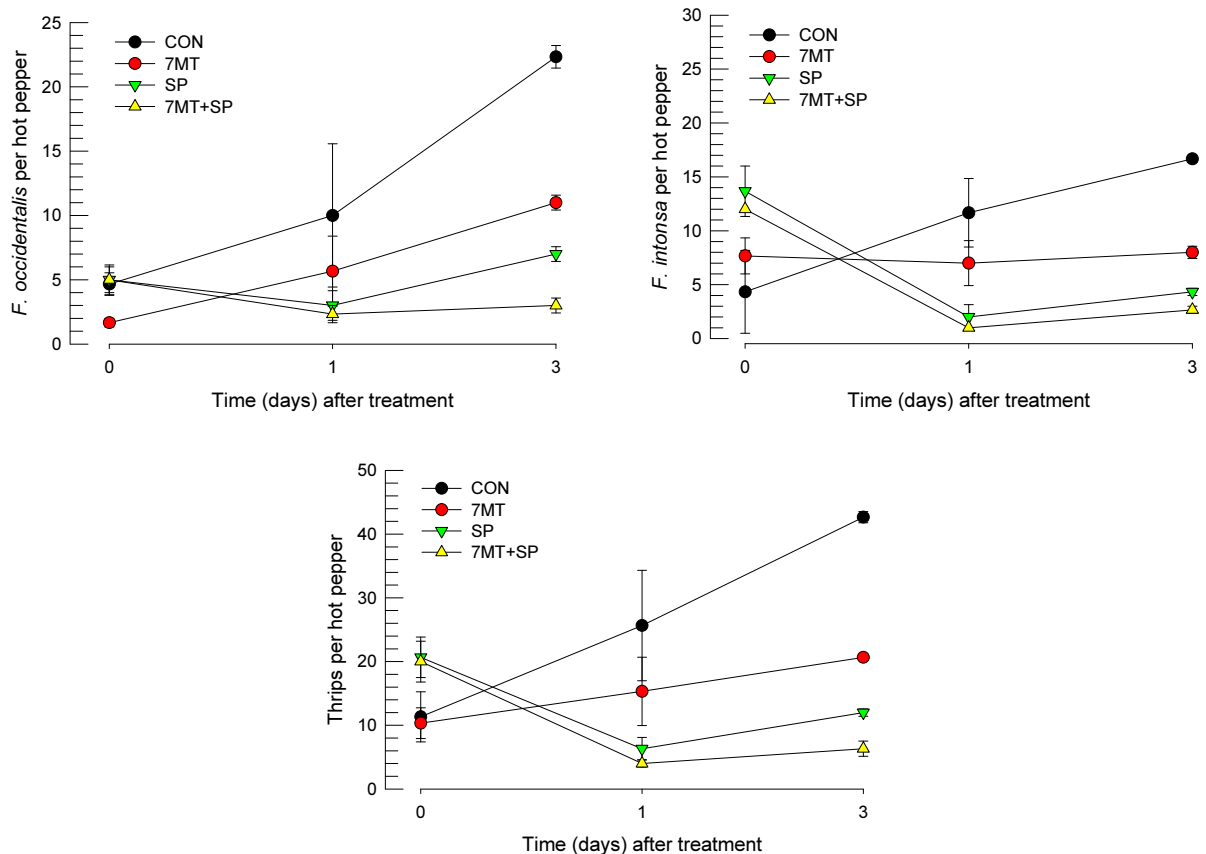


Fig. 3. Control effect of a mixture of 7-methyltricosane ('7MT', 100 $\mu\text{g/ml}$) and spinetoram ('SP', 25 $\mu\text{g/ml}$) against thrips infesting hot peppers in an open field. Control ('CON') represents no spray. A hot pepper was an experimental unit. A total number of thrips were counted in each plant at 0, 1, and 3 days after treatment. Each treatment was installed by a randomized block design with three replications.

Table 1. Control efficacy of a mixture of 7-methyltricosane (7MT) and spinetoram against thrips infesting hot peppers in an open field at three days after treatment. Survival rate was calculated in percentage by dividing the thrips number at 3 days after treatment with the initial number. Three replications are denoted by I, II, and III

Treatment	Dose (a.i. µg/mL)	Thrips before treatment per plant	Survival (%)				LSD	Control efficacy (%)
			I	II	III	Mean		
<i>F. occidentalis</i>								
Control	-	4.7	733.3	350.0	480.0	521.1	a	-
7MT	100	3.4	500.0	300.0	275.0	358.3	a	31.2
Spinetoram	12.5	5.0	150.0	175.0	114.3	146.4	b	71.9
7MT+Spinetoram	100+12.5	5.0	42.9	40.0	133.3	72.1	c	86.2
<i>F. intonsa</i>								
Control	-	10.0	170.0	200.0	141.7	170.6	a	-
7MT	100	7.7	133.3	150.0	63.6	115.7	b	32.2
Spinetoram	12.5	13.7	40.0	22.2	38.5	33.6	c	80.3
7MT+Spinetoram	100+12.5	12.0	25.0	16.7	25.0	22.2	c	87.0
Total thrips								
Control	-	17.0	293.3	241.2	226.3	253.6	a	-
7MT	100	10.3	300.0	233.3	133.3	222.2	a	12.4
Spinetoram	12.5	20.6	73.3	46.2	61.1	60.5	b	76.2
7MT+Spinetoram	100+12.5	20.0	26.9	21.1	53.3	33.8	c	86.7

비교적 높은 살충력으로 농작물을 관리하는 데 필수적 방제 수단으로 화학살충제가 널리 사용되었지만, 이들 살충제들에 대한 총채벌레의 저항성 발달은 농생태계에 더 많은 독성물질을 투여하게 하는 환경 오염과 새로운 작용기작의 화학 약제의 개발이 필요성에 대한 경제적 및 과학기술적 부담을 증가시켰다. 더욱이 총채벌레가 갖는 행동 습성을 살펴보면 비교적 소형의 곤충으로 좁은 틈새에 숨어 사는 습성으로 가해 작물체에 살포 되는 약제 처리에 노출을 줄였다. 이러한 총채벌레의 행동 습성은 살충제 처리에 의한 효과적 방제를 더욱 어렵게 하였다. 본 연구에서는 이러한 총채벌레의 은둔행동을 교란하여 살충제에 노출 기회를 보다 확대시키기 위해 행동 교란용 페로몬 처리를 적용하였고 이에 대한 가설 기반 결과를 얻어 본 고찰에서 논하고자 한다.

접촉페로몬(7MT)은 유충에게는 영향을 주지 않았지만, 성충에게는 뚜렷한 행동 변화를 유발하였다. 본 행동 분석 장치를 통해 암컷은 처리 지역에 유인되는 반면 수컷은 피하려는 상이한 반응을 보였다. 이 물질은 꽃노랑총채벌레 수컷 성충 체벽으로부터 유기용매인 헥산을 처리하여 유리한 것으로 수컷 특이적 지질성 물질로 여겨진다(Olaniran et al., 2013). 즉, 접촉을 통해 꽃노랑총채벌레 암컷이 수컷을 인지하는 반면, 수컷 상호간에는 접촉 후 경쟁적 신호로 의사소통이 이뤄지는 것으로 추정된다. 따라서 암컷은 이 물질이 처리된 먹이를 선호하였고,

수컷은 회피한 것으로 해석된다. 흥미로운 사실은 이 물질이 유사종인 대만총채벌레에서도 유사한 결과를 얻었다. 이는 아직 이 곤충에서 접촉페로몬이 보고된 적은 없지만 7MT이 대만총채벌레 수컷 특이적 물질로서 존재하여 접촉페로몬으로 작용하면서 암수 행동 반응을 매개한 것으로 해석된다.

접촉페로몬을 스피네토람 살충제에 부가한 결과 이 살충제의 살충효과를 증가시켰다. 스피네토람은 스피노사드 계열의 살충제로서 2007년에 등록되어 기존의 스피노사드에 비해 빠른 살충력 및 긴 잔효성을 보이며 다양한 해충에 적용되었다(Bacci et al., 2016). 스피네토람은 스피노사드와 같이 곤충의 니코틴계 아세틸콜린수용체(nicotinate acetylcholine receptor: nAChR)에 대한 작용점을 갖는 신경독이다(Sparks and Nauen, 2014). 이 약제에 대한 총채벌레의 저항성 기작으로 작용점 변화가 주목받고 있다. 이는 스피노사드 약제의 작용점인 nAChR의 일부 단위체($\alpha 6$)에서 점돌연변이가 일어나 궁극적으로 아미노산이 치환되어(Gly → Glu) 약제와 작용점 사이의 결합 변화가 일어난 것으로 알려졌다(Puinean et al., 2013). 더불어 비교적 작용점이 상이한 약제 사이에 교차저항성이 총채벌레에서 나타나는 데 이는 단일산화효소와 같은 약제 대사를 촉진하는 반응에 기반한 해독효소 활성 증가로 해석되고 있다(Espinosa et al., 2005). 따라서 총채벌레는 화학약제에 대해서 작용점 변화는 물론이고 해독효소 증가와 같이 복합 저항성 기작을

발달시켜 이들 화학살충제로 방제하는 데 어려움을 주고 있다. 본 연구에서는 효과적 살충효과를 나타내는 데 또 다른 걸림돌로 작용하였던 총채벌레의 은둔행동을 교란하는 데 접촉페로몬을 이용하였다. 결과적으로 접촉페로몬 추가로 증가된 살충 효과는 이 페로몬에 의해 은둔행동을 교란하여 약제 노출을 증대시켜 방제 효과를 제고시킨 것으로 해석된다.

이상의 결과는 접촉페로몬을 이용하여 총채벌레 해충 방제에 이용한 사례로 응용적 의미를 갖는다. 향후 접촉페로몬 살포에 따른 총채벌레의 공간 이동에 대한 실증적 연구가 뒷받침될 필요가 있다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01578901)의 지원으로 이루어졌습니다.

저자 직책 & 역할

박현제: 안동대, 학부생; 총채벌레 행동분석 및 야의 생물검정

김철영: 안동대, 대학원생; 행동분석

정성채: (주)에이디, 본부장; 화학합성

김영운: (주)에이디, 연구소장; 화학합성

김용균: 안동대, 교수; 실험설계 및 논문작성

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

Literature Cited

- Bacci, L., Lupi, D., Savoldelli, S., Rossaro, B., 2016. A review of spinosyns, a derivative of biological acting substances as a class of insecticides with a broad range of action against many insect pests. *J. Entomol. Acarol. Res.* 48, 40-52.
- Espinosa, P.J., Contreras, J., Quinto, V., Grávalos, C., Fernández, E., Bielza, P., 2005. Metabolic mechanisms of insecticide resistance in the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Pest Manag. Sci.* 61, 1009-1015.
- Hamilton, J.G., Hall, D.R., Kirk, W.D., 2005. Identification of a male-produced aggregation pheromone in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis*. *J. Chem. Ecol.* 31, 1369-1379.
- Jones, T., Scott-Dupree, C., Harris, R., Shipp, L., Harris, B., 2005. The efficacy of spinosad against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*, and its impact on associated biological control agents on greenhouse cucumbers in southern Ontario. *Pest Manag. Sci.* 61, 179-185.
- Khan, F., Kim, K., Sung, J., Lim, H., Kim, S.G., Choi, M.Y., Kim, Y., 2023. A novel physiological function of pheromone bio synthesis-activating neuropeptide in production of aggregation pheromone. *Sci. Rep.* 13, 5551.
- Kim, C., Choi, D., Kang, J., Ahmed, S., Kil, E., Kwon, G., Lee, G., Kim, Y., 2021. Thrips infesting hot pepper cultured in greenhouses and variation in gene sequences encoded in TSWV. *Korean J. Appl. Entomol.* 60, 387-401.
- Kim, C., Choi, D., Lee, D., Khan, F., Kwon, G., Ham, E., Park, J., Kil, E.J., Kim, Y., 2022. Yearly occurrence of thrips infesting hot pepper in greenhouses and differential damages of dominant thrips. *Korean J. Appl. Entomol.* 61, 319-330.
- Kim, C., Khan, K., Kim, Y., 2023. A push-pull strategy to control the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*, using alarm and aggregation pheromones. *PLoS ONE* 18, e0279646.
- Kirk, W.D.J., de Kogel, W.J., Koschier, E.H., Teulon, D.A.J., 2021. Semiochemicals for thrips and their use in pest management. *Annu. Rev. Entomol.* 66, 101-119.
- Kwon, S.J., Cho, I.S., Yoon, J.Y., Chung, B.N., 2018. Incidence and occurrence pattern of viruses on peppers growing in fields in Korea. *Res. Plant Dis.* 24, 66-74.
- Olaniran, O.A., Sudhakar, A.V., Drijfhout, F.P., Dublon, I.A., Hall, D.R., Hamilton, J.G., Kirk, W.D., 2013. A male-predominant cuticular hydrocarbon, 7-methyltricosane, is used as a contact pheromone in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis*. *J. Chem. Ecol.* 39, 559-568.
- Pappu, H.R., Jones, R.A.C., Jain, R.K., 2009. Global status of tospovirus epidemics in diverse cropping systems: Successes achieved and challenges ahead. *Virus Res.* 141, 219-236.
- Park, Y.U., Lee, J.S., Jeong, J.H., Min, J.H., Chang, W.B., Kim, G.H., 2019. Occurrence and susceptibility to several insecticides of *Thrips tabaci* and *Acrolepiopsis sapporensis* on northern-type garlic fields in Chungbuk province. *Korean J. Appl. Entomol.* 58, 251-258.
- Puinean, A.M., Lansdell, S.J., Collins, T., Bielza, P., Millar, N.S., 2013. A nicotinic acetylcholine receptor transmembrane point mutation (G275E) associated with resistance to spinosad in *Frankliniella occidentalis*. *J. Neurochem.* 124, 590-601.
- Reitz, S.R., Gao, Y., Kirk, W.D.J., Hoddle, M.S., Leiss, K.A., Funderburk, J.E., 2020. Invasion biology, ecology, and management of western flower thrips. *Annu. Rev. Entomol.* 65, 17-37.
- SAS Institute, Inc., 1989. SAS/STAT User's Guide. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Sparks, T.C., Nauen, R., 2014. IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pestic. Biochem. Physiol.* 121, 122-128.
- Sparks, T.C., Crouse, G.D., Benko, Z., Demeter, D., Giampietro, N.C., Lambert, W., Brown, A.V., 2021. The spinosyns, spinosad, spinetoram, and synthetic spinosyn mimics - discovery, exploration, and evolution of a natural product chemistry and the

-
- impact of computational tools. *Pest Manag. Sci.* 77, 3637-3649.
- Teerling, C.R., Pierce, H.D. Jr., Borden, J.H., Gillespie, D.R., 1993. Identification and bioactivity of alarm pheromone in the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *J. Chem. Ecol.* 19, 681-697.
- Vedejs, E., Marth, C.F., 1990. Mechanism of Wittig reaction: Evidence against betaine intermediates. *J. Am. Chem. Soc.* 112, 3905-3909.
- Wan, Y., Yuan, G., He, B., Xu, B., Xie, W., Wang, S., Zhang, Y., Wu, Q., Zhou, X., 2018. Foc α 6, a truncated nAChR subunit, positively correlates with spinosad resistance in the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Insect Biochem. Mol. Biol.* 99, 1-10.
- Webster, C.G., Reitz, S.R., Perry, K.L., Adkins, S.A., 2011. Natural mRANA reassortant arising from two species of plant- and insect-infecting bunyaviruses and comparison of its sequence and biological properties to parental species. *Virology* 413, 216-225.
- Zhao, M., Ho, H., Wu, Y., He, Y., Li, M., 2014. Western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*) transmits Maize chlorotic mottle virus. *J. Phytopathol.* 162, 532-536.