

복숭아순나방과 복숭아순나방붙이에 대한 동시 교미교란제의 현장 적용 기술

조점래 · 박창규¹ · 박일권² · 김용균^{3*}

농촌진흥청 국립농업과학원 작물보호과, ¹한국농수산대학 산업곤충학과, ²서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부, ³안동대학교 식물의학과

Field Application Techniques of Simultaneous Mating Disruptor Against *Grapholita molesta* and *G. dimorpha*

Jum-Rae Cho, Chang-Gyu Park¹, Il-Kweon Park² and Yonggyun Kim^{3*}

Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

¹Department of Industrial Entomology, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

²Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong 36729, Korea

ABSTRACT: Mating disruption (MD) has been widely used to effectively control *Grapholita molesta* in apple orchards. A simultaneous mating disruption (SMD) techniques have been developed to control both *G. molesta* and *G. dimorpha*. This study was performed to determine the practical parameters to apply the SMD technique to field conditions. To determine the application amount of SMD lures, a dispenser containing 10 mg pheromone was placed at different numbers of trees in an orchard. Application at every other tree (= one dispenser per two trees) was relatively safe to expect effective MD efficiency in both wax and polyethylene (PE) formulations. One time application at the end of March was enough to maintain a year round MD efficacy against both species. A fence treatment using food trap was applied to prevent any immigratory mated females from nearby untreated regions. To enhance the food trap by adding host-derived secondary compounds, terpinyl acetate (TA) was screened to be effective to attract females of *Grapholita molesta* among six compounds contained in apple fruit extracts. Among different TA concentrations, 0.05% TA treatment was the most effective to attract the adults. A mixture of TA and sugar was effective to attract and kill females and called FAKT (female attract-to-kill techniques). FAKT was treated at approximately 6 m interval at the edge of the apple orchards. The females trapped by the FAKT included mated females possessing vitellogenic oocytes. SMD supplemented with FAKT maintained the high MD efficacy and significantly suppressed leaf damage induced by the two insect pests compared to control or single SMD treatment.

Key words: Oriental fruit moth, Plum fruit moth, Mating disruption, Sex pheromone, Female attract-to-kill, Apple

조 록: 교미교란(mating disruption, MD) 기술이 사과에 피해를 주는 복숭아순나방(*Grapholita molesta*) 방제에 널리 사용되고 있다. 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이를 동시에 교미교란(simultaneous MD, SMD)하는 기술이 최근에 개발되었다. 본 연구는 이 SMD 기술을 현장에 접목하는 데 필요한 요인들을 결정하기 위해 수행되었다. SMD 처리 농도를 결정하기 위해 각 처리 지점에 10 mg의 성페로몬을 여러 가지 밀도로 사과나무에 처리하였다. 처리된 세 농도 가운데 두 나무마다 하나의 SMD 처리가 비교적 안정적으로 MD 효과를 유지하였다. 이러한 SMD 효과는 왁스 및 polyethylene 제형 모두에서 나타났다. 두 사과나무마다 하나의 SMD 처리 농도로 3월 말에 1회 처리한 경우 수확기까지 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이에 대해 효과적 교미교란을 유지시켰다. 인근 무처리 과수원에서 SMD 처리 과수원으로 이주하여 들어오는 교미된 암컷의 이입을 막기 위해 울타리 처리 기술이 적용되었다. 암컷 유인제를 개발하기 위해 6종류의 사과 과일 추출물에 포함된 화합물 가운데 terpinyl acetate (TA)가 선발되었다. 서로 다른 TA 농도 처리에서 0.05%가 성충 유인에 가장 효과적이었다. TA와 설탕을 혼합한 것을 암컷유살제(female attract-to-kill technique, FAKT)라 명명하였다. 사과 과수원 가장자리를 따라 6 m 간격으로 FAKT를 설치한 울타리 처리는 교미된 암컷을 포획하였고, 이들은 난황형성과정을 진행하고 있는 난모세포를 지니고 있었다. FAKT가 가미된 SMD 처리는 높은 MD 효율을 유지하는 것은 물론이고 SMD 단독 처리에 비해 신초 피해를 현격하게 줄였다.

검색어: 복숭아순나방, 복숭아순나방붙이, 교미교란, 성페로몬, 암컷유살, 사과

*Corresponding author: hosanna@anu.ac.kr

Received July 26 2018; Revised August 19 2018

Accepted August 24 2018

복숭아순나방(*Grapholita molesta*)은 중국 북서부 지역에서 유래된 것으로 추정되며(Hallman, 2004), 현재는 전 세계 거의 모든 온대 지역에 분포하며 사과를 비롯한 배, 복숭아 등의 과실류와 함께 장미과 식물 등에도 심각한 피해를 주고 있다(Rothschild and Vicker, 1991; Knight et al., 2014). 최근 기후 변화 예측 모델을 통해 미국 워싱턴 주에서 실시된 발생 예측을 보면 이 해충의 가해 분포가 더 확장될 것으로 예견되고 있고(Neven et al., 2018), 더욱이 야외 조건에서 발육된 개체들의 환경 적응력과 집단 증식율이 높아 환경 조건에 따라 돌발 발생의 가능성이 높을 것으로 예견된다(Chen et al., 2018a).

복숭아순나방은 농작물의 신초와 과실을 직접 가해하는 일차해충이다. 더욱이 심식충으로 과실 내부가 유충의 서식지이기에도 살포 약제에 직접 노출되지 않아 효과적 방제가 어려우며, 이에 따른 과도한 약제 살포는 살충제 저항성 및 인축 독성의 우려를 자아내고 있다(Pree et al., 1998; Borchert et al., 2004). 따라서 이 해충의 효과적 방제를 위해 과실 밖에서 활동하는 시기인 성충 발육태에 주목하게 되었다. 복숭아순나방과 달리 복숭아순나방붙이(*G. dimorpha*)는 한국, 일본, 중국, 연해주를 포함하는 러시아 등 극동아시아 지역에만 분포한다(Park and Kim, 1986; Yan et al., 1999; Yoshizawa et al., 2008).

복숭아순나방과 마찬가지로 복숭아순나방붙이(*G. dimorpha*)도 심식충으로 과실 내부를 가해하여 피해를 유발시키는 일차해충이며, 연 3회(일본 Iwate 현) 또는 4회(국내 지역) 발생한다(Arai et al., 2009; Choi et al., 2009). 이 두 종은 형태적으로 거의 유사하여(Jung et al., 2012), Jung and Kim (2013)은 이 두 종을 구별할 수 있는 분자마커를 개발하였다. 교미행동도 유사하여 저녁 해가 지기 전후에 두 종이 각각 교미하는 것으로 알려져 있다(Murakami et al., 2005; Kim et al., 2011). 따라서 이들 두 종의 동소적 종분화가 흥미로운 연구주제가 되어 왔다(Jung and Kim, 2014).

복숭아순나방의 교미신호는 성페로몬에 의존하며, 수컷은 하루 중 일정한 시기에 성페로몬에 유인된다(Kim et al., 2011). 복숭아순나방의 성페로몬은 네 가지이며 Z-8-dodecenyl acetate (Z8-12:Ac), E-8-dodecenyl acetate (E8-12:Ac), Z-8-dodecenol (Z8-12:OH) 및 n-dodecanol (12:OH)을 포함한다(Cardé et al., 1979). 국내 야외 집단 모니터링에 앞의 세 성분을 95:5:1의 조성으로 한 경우 가장 유인력이 높게 나타났다(Han et al., 2001; Yang et al., 2002). 복숭아순나방붙이의 성페로몬 조성은 복숭아순나방과 동일한 네 가지 성분에 n-dodecanyl acetate (12:Ac) 및 탄소수 14개를 지닌 세 가지 성분들(Z-8-tetradecenyl acetate (Z8-14:Ac), E-8-tetradecenyl acetate (E8-14:Ac), n-tetradecanyl acetate (14:Ac))이 추가된다(Murakami et al., 2005). 복숭아순

나방붙이는 Z8-12:Ac와 E8-12:Ac가 85:15의 혼합 비율에서 높은 야외 유인력을 나타냈다(Murakami et al., 2005; Jung et al., 2014). 따라서 두 종은 주요 성페로몬 조성인 Z8-12:Ac와 E8-12:Ac를 공통으로 포함하기에 이를 기반으로 한 합성 성페로몬은 두 종을 교차유인하게 된다(Jung et al., 2012). Z8-12:OH의 조성을 낮추어 주면 복숭아순나방붙이 수컷의 유인이 떨어지게 되는 데 이를 이용하여 Jung et al. (2013)은 복숭아순나방만 단독으로 유인하는 조성을 밝혔다. 한편 복숭아순나방붙이만 유인하기 위해 Z8-14:Ac의 성분을 두 주요 성페로몬 성분에 추가하여 복숭아순나방의 유인력을 크게 떨어뜨리고, 복숭아순나방붙이의 유인력을 유지시켰다(Jung et al., 2014).

교미교란(mating disruption, MD) 기술은 대상 해충의 성페로몬을 야외의 임의 지역에 방사하여, 야외 집단의 수컷이 정상적 암컷과 교미교신을 교란하여 교미불능으로 유도한다는 원리를 이용하고 있다(Baker and Heath, 2005). 이 기술은 환경친화형 방제 기술로서 기존의 화학방제를 대체할 수 있는 수단으로 복숭아순나방 야외 집단에 대해서 입증되었다(Cardé and Minks, 1995). 국내에서도 Jung et al. (2006, 2008)에 의해 성페로몬을 이용하여 복숭아순나방에 대한 교미교란 효과가 입증되었다. 그러나 복숭아순나방붙이에 대한 교미교란 적용 실험은 아직 실시되지 않았다.

본 연구는 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이가 같은 서식지에서 유사한 시기에 발생하고 두 개의 공통 성페로몬 성분에 교차유인된다는 사실을 기반으로 이들 두 해충을 동시에 교미교란하려는 기술(simultaneous MD, SMD)(Kim et al., 2018)을 현장에 적용하는 기술을 개발하는 데 목표를 두었다. 특히 사과원을 대상으로 SMD 처리 농도, 시기 및 횟수를 결정할 필요가 있었고, 교미교란제를 처리하지 않은 인접 과수원에서 이주하여 들어오는 교미 암컷을 방지하는 울타리 처리 기술이 개발될 필요가 있었다. 울타리 처리 기술을 개발하기 위해 복숭아순나방 암컷에 유인력이 보고된 terpinyl acetate (TA)를 이용하여(Padilha et al., 2017) 암컷유살기술(female attract-to-kill technique, FAKT)을 적용하였다.

재료 및 방법

복숭아순나방과 복숭아순나방붙이 발생 밀도 모니터링

대조구 및 SMD 처리 지역의 두 해충 발생 밀도 모니터링은 파수꾼영농조합(영주, 한국)에서 나온 제품을 이용하였다. 이 제품에는 복숭아순나방의 경우는 Z8-12:Ac와 E8-12:Ac를 95:5의 비율로 혼합하였고, 복숭아순나방붙이의 경우는 이들

두 성분이 85:15로 혼합되고 여기에 Z8-14:Ac를 추가하여 복숭아순나방의 교차 유인을 억제시켰다. 이들 각각의 트랩에 유인되는 종특이성은 95% 이상을 기록하였다(Kim et al., 2018). 델타형 점착형 트랩(파수꾼영농조합)이 이용되었으며, 처리 반 복구 별로 설치하고 매주 1회씩 주기적으로 모니터링하였다.

SMD 제조 및 처리 방법

두 페로몬 성분인 Z8-12:Ac와 E8-12:Ac를 Bedoukian Research (Danbury, CT, USA)에서 구입하였다. 각각의 성분을 헥산(Merck, Darmstadt, Germany)으로 10 mg/mL의 농도로 용해시켰다. 이후 두 제형의 SMD에 95:5의 비율로 혼합하였다. 왁스 제형은 Jung et al. (2008)의 방법으로 제형화하였으며, 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 제형은 (주)AD (안동, 한국)에 주문 제작하였다. 왁스제형은 사과나무의 그늘진 곳(주로 가지 분지 지점)에 약 10 mL 부피 크림형태로 부착하였다. PE 제형은 사과나무 가지 말단부에 걸이형으로 부착하였다.

사과휘발성분 제형 개발

실험에 사용한 사과휘발성분인 (-)- α -pinene (98%)은 AGROS Organic (NJ, USA)에서 구입하였다. (\pm)-Limonene (>95%), β -pinene (>94%), 그리고 terpinyl acetate (>80%)는 Tokyo Chemical Industry (Tokyo, Japan)에서, farnesene (mixture of isomers)과 sabinene hydrate (>97%)는 Sigma-Aldrich Corporation (MKE, USA)에서 구입하여 사용하였다. 야외 유인력 시험을 위해 각각의 화합물 용액을 각 2 g씩 폴리우레탄 (polyurethane) 필름에 채워 제형[film thickness: 0.2 mm, 60 mm x 100 mm (width x height), Sejin Poly, Seoul, Korea]화하였다. (-)- α -Pinene, (\pm)-limonene, β -pinene, terpinyl acetate, farnesene 그리고 sabinene hydrate 제형의 25°C에서 휘발량은 각각 70, 155, 75, 201, 36 그리고 14 mg/일 이었다.

SMD 처리 밀도 시험

전북 김제 지역의 사과원(약 10,000평, 홍로와 후지 품종이 1:2 비율로 혼재)에서 세 가지 SMD 처리 밀도에 따른 교미교란 효과를 분석하였다. 두 가지 서로 다른 제형의 SMD를 각각 서로 다른 밀도로 사과원에 처리하였다. 처리 밀도는 각 나무에 하나(1/1), 두 나무에 하나(1/2) 그리고 네 나무에 하나(1/4)의 밀도로 2017년 3월 30일에 처리하여 10월 말까지 두 해충의 발생을 델타트랩으로 모니터링하였다. 실험기간 동안 교미교란

제는 교체하지 않았다. 각 처리는 3반복으로 각 반복은 약 500 평으로 반복별 거리는 약 10 m를 두었다.

SMD 처리 횟수 시험

경북 안동시 기느리 지역의 사과원(약 3,000평, 후지 품종)에서 처리 횟수에 따른 교미교란 효과를 분석하였다. 2017년 3월 31일에 PE 제형의 교미교란제를 처리하였다. 처리 횟수가 1회인 경우는 더 이상 교미교란제를 투입하지 않고 전체 발육 기간 동안(8개월: 3~10월) 주별로 모니터링하였다. 처리량은 각 PE 방출기 SMD (10 mg)를 두 나무에 1개씩 처리하였다. 약 100 g/ha이 투입되었다. 처리 횟수가 2회인 경우는 6월 중순에 다시 추가 처리가 되었다. 처리횟수가 3회인 경우는 2회 처리 이후 다시 7월 하순에 추가 처리하였다. 사과원은 관행 방제 시스템을 따르고 있어 살충제 및 살균제의 투입이 없는 경북 과수원의 사과원 처리와 유사했다. 단, 이 과수원은 주변의 과수원과 최소 1 km 이상 떨어져 있고 이들 사이에는 산과 마을로 나뉘어져 있어 단독 과원으로 볼 수 있다.

FAKT 제조 및 처리 방법

FAKT는 terpinyl acetate와 갈색설탕을 각각 0.05% 및 8.69%로 물과 혼합하여 제조하였다. 이 용액을 펀넬트랩(그린아그로텍, 경산, 한국) 하단부에 약 300 mL 채워 대상 해충 포획에 이용하였다. 이때 효과적 포획을 위해 매주 용액을 새로운 FAKT로 교환하였다. FAKT 처리는 사과원 최외각 사과나무에 두 나무마다 하나씩(= 약 6 m 간격) 처리하였다.

신초피해율 조사

SMD 처리구와 대조구 각각에서 5개 지점(중앙:1, 경계:2, 사이:2)을 임의로 각 1그루의 사과나무를 대상으로 100개 신초(상:20, 중:30, 하:50)를 선발하여 총 500개를 조사했다. 이 가지들에서 복숭아순나방(붙이) 피해를 받은 어린 순을 중심으로 피해수를 산출하였다. 두 해(2017년, 2018년)에 걸친 신초피해는 모두 5월 말에 실시하였다.

암컷 교미율 분석

암컷의 교미 여부를 판단하기 위해서 Kim et al. (2007)의 방법으로 교미낭에 존재하는 정자주머니를 관찰하였다. 매 교미마다 수컷이 1개의 정자주머니를 암컷의 교미낭에 전달하기에

정자주머니의 수에 따라 교미수를 결정하였다. 또한, 난소의 난모세포 발달에 따라 난소 발육 정도를 1~5의 단위로 등급화하였다. 여기서 1은 난황축적과정이 이뤄지지 않는 난모세포이고, 2는 난황형성축적과정 시작 단계이고, 3은 중간단계, 4는 대부분은 최종단계이며, 5는 난각형성이 종료된 난모세포를 지칭하게 된다.

통계자료 분석

SMD 처리에 따른 교미교란효과는 무처리 지역의 평균유인 평균밀도(T_0) 대비 처리지역 평균유인밀도(T_1)의 비율을 1에 서 차감한 후 100분율로 산출 $\{(1-T_1/T_0) \times 100\}$ 하였다. 이 교미교란효과 자료의 통계분석은 arcsine transformation 한 후 SAS (SAS Institute, 1989)의 PROC GLM을 이용하여 two-way ANOVA로 처리효과를 분석하였다. 처리 평균간 비교는 최소

자승법(Least squared difference, LSD)을 제I형 오류가 0.05가 되는 확률 수준에서 유의성 검증이 실시되었다.

결과

SMD 처리 밀도 및 횡수에 따른 동시 교미교란 방제효과

현장 처리용으로 PE 및 왁스형의 두 가지 SMD 제형을 처리하였다. 각 제형은 각 처리 지점 별 약 10 mg씩 세 가지 밀도로 처리하였다(Fig. 1A). 대부분 SMD 농도 처리에서 무처리에 비해 낮은 포획 밀도를 두 해충($F = 7.81$; $df = 6, 28$; $P < 0.0001$)에 대해서 보여 동시 교미교란 효과를 확인하였다(Fig. 1B). 각 제형에 따라 처리 농도별로 비교하여 보면 뚜렷한 농도별 차등 교미교란 효과는 복숭아순나방($F = 1.46$; $df = 1, 28$; $P = 0.2474$)과 복숭아순나방붙이($F = 1.01$; $df = 1, 28$; $P = 0.3312$) 모두에

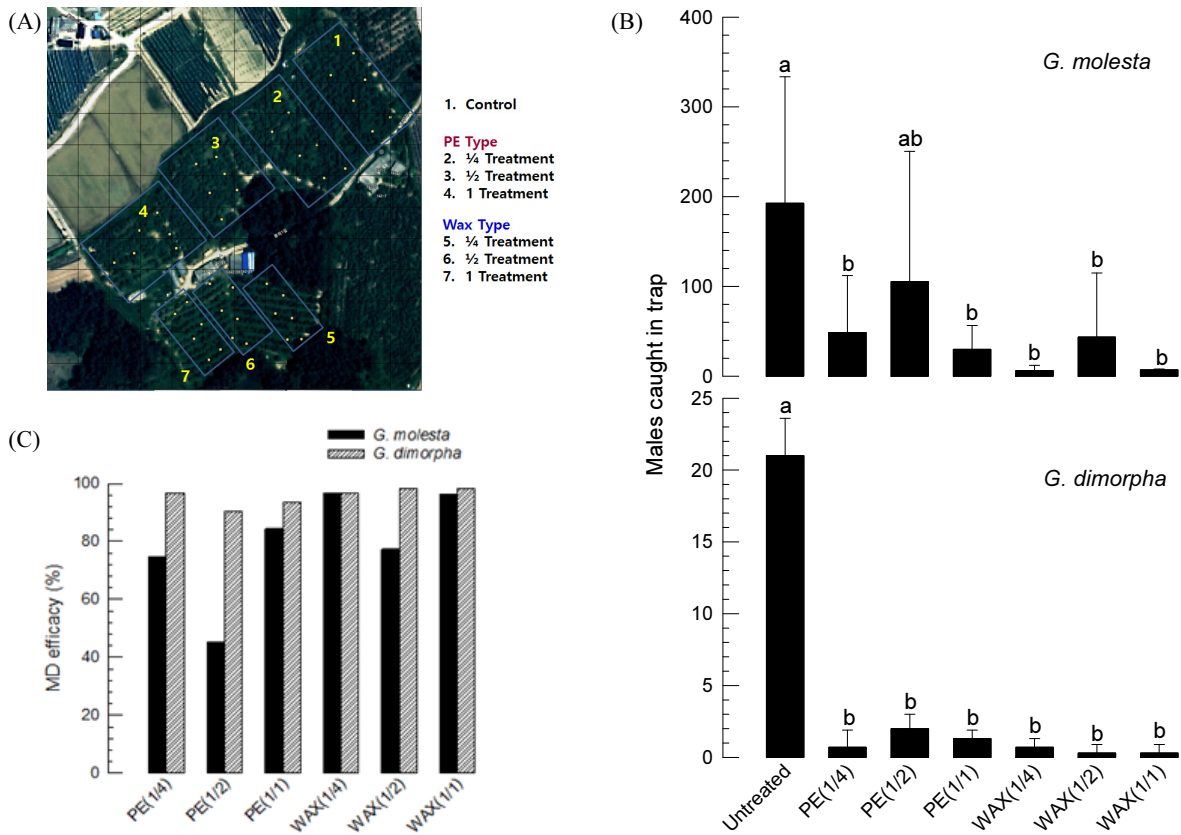


Fig. 1. SMD efficacy of different application amounts against overwintering populations of *G. molesta* (Gm) and *G. dimorpha* (Gd) in an apple orchard at Kimje from April to May in 2017. (A) Deployment of different treatments. 'Untreated' represents no treatment. 'PE' and 'Wax' indicate formation types. '1/4', '1/2', and '1' indicate SMD application concentrations for one dispenser per four trees, per two trees, and per one tree, respectively. (B) Total average number of males caught in a trap in different treatments. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test) in each species. Each treatment used three monitoring traps per species. Monitoring was performed every week against overwintering populations for three months from April to June. (C) Mating disruption (MD) efficacies and leaf damage. MD is calculated from the relative reduction of total males caught in monitoring traps compared to control.

Table 1. Effect of different simultaneous mating disruptor (SMD) concentrations on leaf damage. Experiment was performed in Kimje apple orchard in 2017

Trt ^a	Mean numbers of damaged leaves/100 young leaves ^b					Total/500 leaves	Mean damaging rate (%) ^c
	c1	m1	m3	e1	e3		
Control	5.0	2.7	4.0	2.0	5.7	19.3	3.9 ± 2.8 a
PE-MD treatment							
1	1.3	2.0	0.3	1.0	1.3	6.0	1.2 ± 0.5 ab
2	1.0	1.3	0.3	0.3	1.0	4.0	0.8 ± 0.9 b
4	1.7	1.0	0.3	1.7	3.0	7.7	1.5 ± 0.8 ab
WAX-MD treatment							
1	0.3	0.3	1.3	2.3	0.0	4.3	0.9 ± 0.1 ab
2	3.0	0.0	0.0	1.7	2.0	7.0	1.4 ± 1.1 ab
4	0.3	0.0	1.0	0.7	1.7	3.7	0.7 ± 0.8 b

^aTrt^a represents treatments consisting of four application concentrations (an application per a tree (1), two trees (2), and four trees (4)) with three replications in each formulation: polyethylene (PE) and wax formulations of SMD.

^b'c', 'm', and 'e' represent center, middle, and edge sampling sites in experimental unit, respectively.

^cDifferent letters following standard deviations represent significant difference among means in each formulation at Type I error = 0.05 (LSD test).

서 나타내지 않았다(Fig. 1C). 단, 복숭아순나방의 경우 PE 제형에서 1/2 처리 농도가 1/4 농도 처리 보다 교미교란 효과가 낮게 나왔다. 반면에 왁스 제형의 경우는 모든 농도에서 대조구 대비 뚜렷한 교미교란 효과를 주었고, 특히 복숭아순나방붙이 경우 1/4 농도 처리가 1/2 또는 1/1 농도 처리에 비해 교미교란 효과가 낮게 나오는 농도 차등적 경향을 보였다. 따라서 농도별 처리효과를 종합하여 보면 처리 농도가 높아짐에 따라 교미교란 효과는 증가하였으나, 1/2 이상의 농도에서는 큰 차이를 보이지 않아 사과원 처리 농도를 1/2로 결정하는 것이 타당하여 다음의 포장 연구에서는 SMD 처리 농도는 1/2을 이용하였다. 신초피해율로 SMD 처리 농도별 방제 효과를 분석한 결과, 무처리에 비해 처리 지역에서 뚜렷하게 낮게 나왔으며 이러한 차이가 일부 처리 농도(PE 제형에서는 1/2 농도, 왁스 제형에서는 1/4 농도)에서 더욱 뚜렷하게 나타났다(Table 1). 그러나 이러한 방제 효과가 제형에 따라서는 뚜렷하지 않았으며($F = 0.20$; $df = 1, 12$; $P = 0.6642$), 처리 농도에 따라서도 큰 차이를 보이지 않았다($F = 0.07$; $df = 2, 12$; $P = 0.9298$). 이상의 월동세대를 중심으로 한 동시 교미교란 효과를 전체 발생 기간을 통해 분석하여 보면, 모든 처리 농도에서 동시 교미교란 효과를 얻을 수 있었다(Fig. 2).

연중 처리 횟수에 따른 동시교미교란 효과를 분석하였다(Fig. 3). 처리 농도는 1/2로 고정하고 PE 제형을 이용하여 안동 지역의 사과원에서 연중 두 해충에 대한 교미교란 효과를 분석하였다. 처리 횟수가 1회인 경우는 3월 말에 처리하였고, 처리 횟수가 2회인 경우는 6월 중순에 다시 추가 처리가 되었다. 처

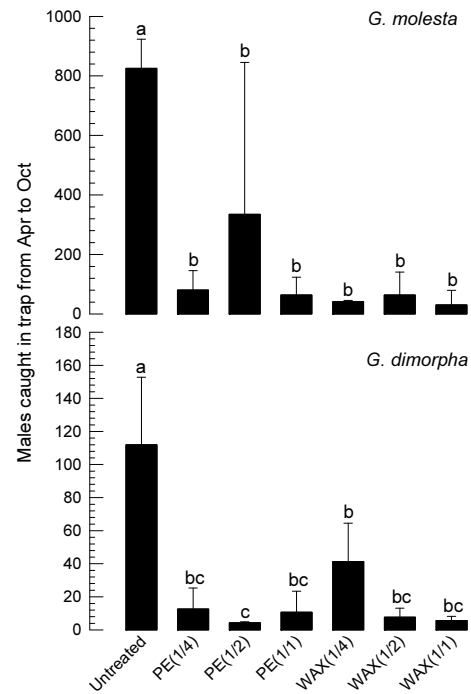


Fig. 2. SMD efficacy of different application amounts against *G. molesta* (Gm) and *G. dimorpha* (Gd) in an apple orchard at Kimje during entire growing seasons from April to October in 2017. 'Untreated' represents no treatment. 'PE' and 'Wax' indicate formation types. '1/4', '1/2', and '1' indicate SMD application amounts for one dispenser per four trees, per two trees, and per one tree, respectively. Treatment effects were presented in total average numbers of males caught in a trap in different treatments. Each treatment used three monitoring traps per species. Monitoring was performed once in a week during the investigation period. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test) in each species.

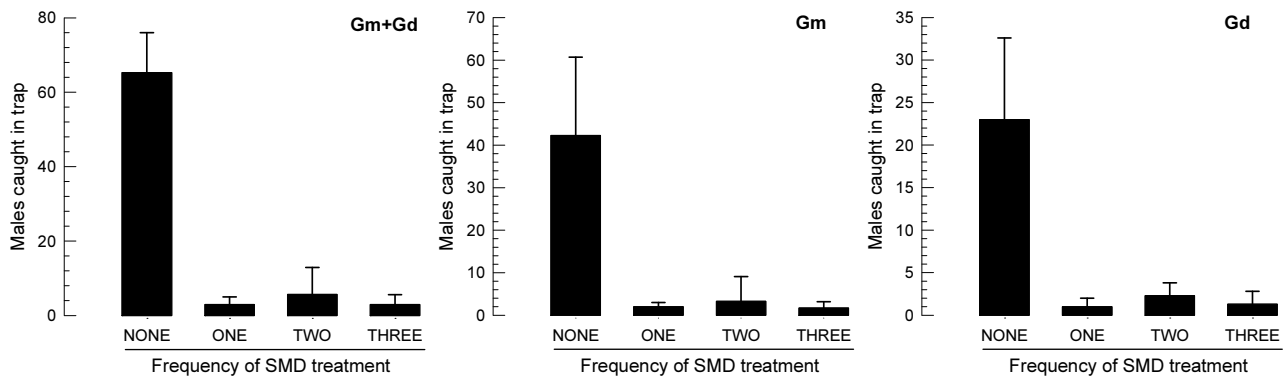


Fig. 3. SMD efficacy of different application frequencies against *G. molesta* (Gm) and *G. dimorpha* (Gd) in an apple orchard at Andong in 2017. SMD was applied with one dispenser per two trees. One time of SMD application was implemented at late March. Two times of SMD application were at late March and mid-June. Three times of SMD application was at late March, mid-June, and late July. Trap catches represent the total number of males collected from April to October.

리횟수가 3회인 경우는 2회 처리 이후 다시 7월 하순에 추가 처리가 들어갔다. 사과원은 관행 방제 시스템을 따르고 있어 살충제 및 살균제의 투입이 어느 경북 과수원의 사과원 처리와 유사했다. 단, 이 과수원은 주변의 과수원과 최소 1 km 이상 떨어져 있고 이들 사이에는 산과 마을로 나뉘어져 있어 단독 과원으로 볼 수 있다. 두 나방류는 연중 발생에서 차이를 나타내어 복숭아순나방이 복숭아순나방붙이에 비해 높은 발생을 나타냈고 ($F = 10.25$; $df = 1, 415$; $P = 0.0018$), 이들의 시기별 발생 패턴에서 차이를 나타냈다 ($F = 2.27$; $df = 25, 415$; $P = 0.0022$). SMD를 처리한 경우 두 나방류에 차이 없이 ($F = 0.75$; $df = 2, 415$; $P = 0.4750$) 처리구에서 교미교란 효과는 대체로 90% 이상을 나타냈다. 전체적으로는 교미교란 효과에 연중 처리 횟수에 차이 없이 (복숭아순나방: $F = 1.04$; $df = 75, 415$; $P = 0.3987$, 복숭아순나방붙이: $F = 1.43$; $df = 75, 415$; $P = 0.3987$) 유사한 교미교란 효과가 있었다.

올타리 처리에 따른 무처리 지역 암컷 이입 차단 기술

무처리 지역에서 SMD 처리 지역으로 들어오는 교미 암컷을 차단하려는 올타리 처리 기술을 terpinyl acetate (TA)를 이용하여 분석하였다. 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이에 대해서 먼저 TA에 대한 유인 가능성을 다른 5종의 식물체 유래 물질과 비교하였다 (Fig. 4). 두 해충이 발생하는 4주 동안 이들 물질들에 유인된 개체를 조사한 결과 TA를 제외한 다른 물질에는 전혀 유인되지 않았다. 같은 시기 성페로몬에는 주별로 20~45마리의 수컷이 포획된 반면 TA 트랩에는 1~8마리의 암컷이 포획되어 유인력에 대해서는 성페로몬에 비해 현격하게 낮았다.

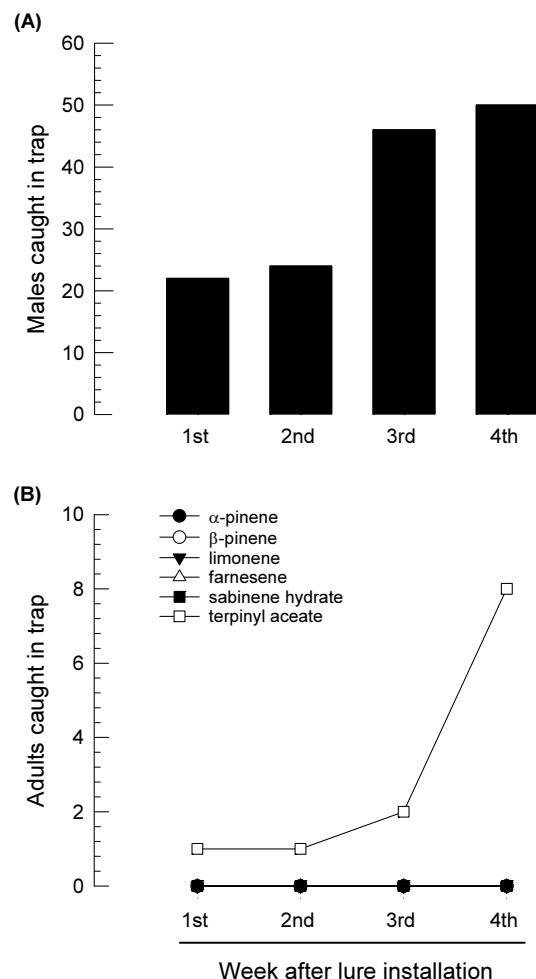


Fig. 4. Effect of fruit extract compounds on attracting *Grapholita* adults in an apple orchard at Andong in 2018. All compounds are contained in polyurethane (PU) bag as described in Materials and Method. The lure in the PU bag was installed in Delta sticky trap. (A) Occurrence of *Grapholita* males during 4 weeks using sex pheromone trap. (B) Attractiveness of terpinyl acetate against *Grapholita* adults among six compounds.

TA 농도별로 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이에 대한 유인력을 비교하였다(Fig. 5). 조사기간 동안 성페로몬 트랩에는 주별로 12~40마리의 수컷 포획 밀도를 기록하였다. 이때 TA가 포함되지 않은 암컷 유인물질(FAKT)에는 전혀 포획되지 않은 반면, 모든 TA 처리 트랩에는 복숭아순나방(붙이)이 포획되었다. 이 가운데 0.05% TA를 함유한 FAKT에서 가장 많은 포획 밀도를 나타냈다.

SMD 처리와 0.05% TA가 포함된 FAKT를 이용한 울타리(FEN) 처리 기술을 병행하여 교미교란 효과 및 기주 피해 저감 기술을 분석하였다(Fig. 6). 총 5주간 진행된 효과 분석에서 SMD 처리 지역에서는 100%의 교미교란효과를 나타냈다. 그러나 SMD와 FAKT를 병행한 처리 지역(SMD + FEN)에서는 약 85%의 교미교란 효과를 주어 SMD 단독 보다는 교미교란

효과가 낮았다. 그러나 신초 피해를 분석한 결과 무치리에 비해 SMD 또는 SMD + FEN 처리들에서 낮은 피해율을 기록하였으며, 이 가운데 SMD 단독 보다는 SMD + FEN 처리가 우수한 방제효과를 나타냈다.

FEN 트랩에 포획된 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이의 암수 비율 및 교미 정도를 분석하였다(Table 2). 전체적으로 FEN 트랩에 포획된 개체들은 암수가 모두 존재하였다. 이 가운데 암컷은 약 30%를 차지하였다. 그리고 포획된 암컷의 50%는 교미충이었으며, 난소 발육 상태는 난황형성 과정이 활발히 일어나는 시기였다.

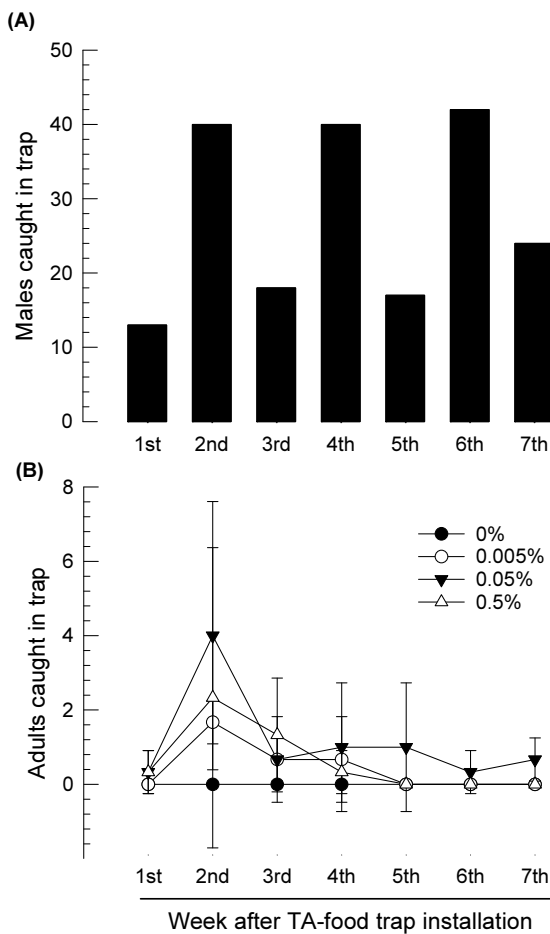


Fig. 5. Effect of terpinyl acetate (TA) in food trap on attracting *Grapholita* adults in an apple orchard at Andong in 2018. (A) Occurrence of *Grapholita* males during 7 weeks (B) Effect of different TA concentrations to attract *Grapholita* adults. Each concentration treatment was replicated three times.

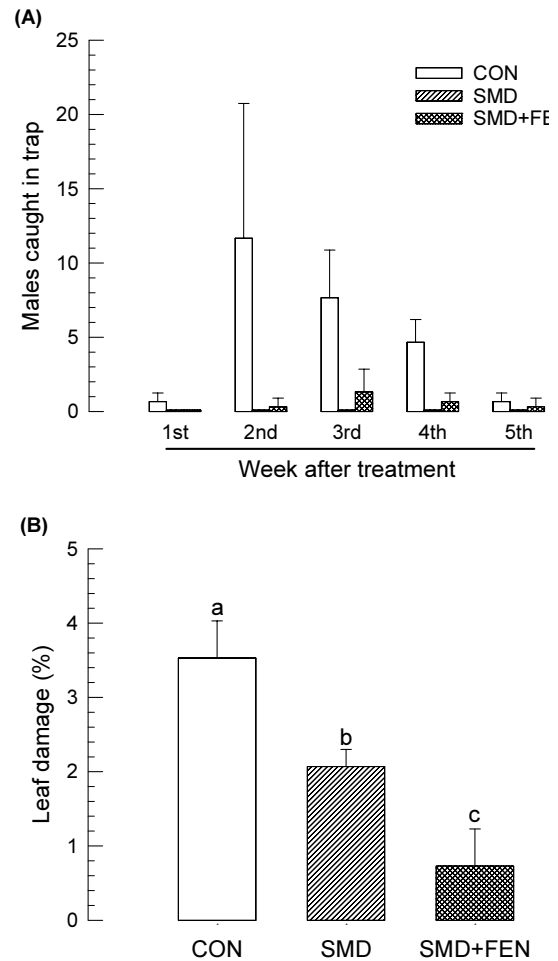


Fig. 6. Effect of fence (FEN) traps on SMD treatment against *Grapholita* adults in an apple orchard at Andong in 2018. (A) Comparison of SMD and SMD + FEN treatments in mating disruption efficacy with respect to total males caught in monitoring traps. Three monitoring traps were deployed in each treatment and counted for 5 weeks. (B) Comparison of SMD and SMD + FEN treatments in mating disruption efficacy with respect to leaf damage. Three host trees were randomly chosen in each replication and 500 leaves in each tree were assessed.

Table 2. Analysis of two *Grapholita* sp. adults attracted to terpinyl acetate + sugar trap in two Andong apple orchards in 2018

Location	Date	Total	Male	Female	Among females		Ovary ^b
					Virgin	Mated ^a	
Kilan	4/23	30	18	12	8	4	1.92
	5/1	30	21	9	2	7	2.78
	5/8	6	2	4	2	2	2.75
	5/14	1	0	1	1	0	3.0
	Sum	67	41	26	13	13	-
	Mean	-	-	-	-	-	2.61
Kinuri	4/29	9	4	5	3	2	3.2
	5/7	6	4	2	0	2	3.0
	5/13	3	3	0	-	-	-
	5/20	1	1	0	-	-	-
	5/27	2	2	0	-	-	-
	Sum	21	14	7	3	4	-
	Mean	-	-	-	-	-	3.1

^aAll mated females had one spermatophore.

^bAll females caught were analyzed. Degree of the ovarian development depending on oocyte development, in which 1 is previtellogenic and 5 is fully developed oocytes.

고찰

약 160,000종 이상이 보고된 나비목 곤충 가운데 95% 이상이 휘발성 성페로몬을 이용하여 교미 통신을 한다(Scoble, 1992; Grimaldi and Engel, 2005). 이 가운데 대부분의 나비목 종이 포함된 이문나방아목(Ditrysia)은 지방산에서 유래된 성페로몬 성분을 이용하고 있다(Roelofs, 1995; El-Sayed, 2007). 그러나 성페로몬의 기능을 발휘하기 위해서는 분자량을 낮추어 휘발성을 가져야하기에 지방산의 탄소수가 12~18개로 제약이 되나, 성페로몬 신호의 다양성을 추구하기 위해 이중결합(개수, 광학이성체) 추가 및 관능기 분화(알코올, 알데하이드 및 아세테이트)를 보이게 된다(Liénard et al., 2008). 이러한 성페로몬은 이들 나비목 곤충의 경우 복부 8번째와 9번째 마디 사이의 표피세포층이 분화된 성페로몬 샘에서 생합성되어 방출되게 된다(Percy-Cunningham and MacDonald, 1987).

앞말이나방과(Tortricidae)에 속한 복숭아순나방의 경우도 성페로몬 성분은 지방산 유도체이고 이 가운데 두 주요 성분인 Z8-12:Ac와 E8-12:Ac의 상호 비율은 근연종인 복숭아순나방 불이와의 생식적 격리를 유도하는 데 중요하다(Jung et al., 2012; Jung and Kim, 2014). 여기에 미량 성페로몬 성분들에 의해 이 두 근연종의 생리적 격리가 유도된다(Jung et al., 2014). SMD는 이 가운데 두 주요 성분비를 95:5의 비율로 혼합하여 교차유인을 최대화하며, 이를 통해 두 근연종의 동시 교미교란

효과를 기대하였다(Kim et al., 2018). 본 연구는 이러한 SMD 효과를 서로 다른 지역(전주 및 안동)에서 그리고 서로 다른 연도(2017년과 2018년)에서 뒷받침되어 이 SMD 기술의 현장 적용성을 높여 주었다. 이 SMD는 두 근연종의 촉각에 존재하는 냄새물질 감지 기구에서 유사성으로 해석될 수 있다.

일반적으로 성충은 교미와 계절적 기주 이동에 따른 행동으로 냄새감각기가 발달되어 있다. 이와 관련되어 촉각을 중심으로 발현 유전체를 분석하여 냄새 감각에 관련되는 여러 유전자들을 동정하였다(Zhang et al., 2012; Li et al., 2015). 이들 유전자 가운데에는 성페로몬이나 기주물질 탐지를 위한 냄새물질 결합단백질(odorant binding protein, OBP) 및 화학감지단백질(chemosensory protein)을 포함하게 된다(Song et al., 2014; Li et al., 2016). OBP는 냄새감각기에서 냄새물질과 결합하여 수용액 상태의 촉각림프액을 통해 이 소수성 냄새물질을 냄새신경(odorant neuron, ORN)의 세포막에 존재하는 냄새물질 수용체(odorant receptor, OR)까지 전달하는 기능을 담당한다. 첫 번째로 밝혀진 곤충의 OBP는 야생누에나방(*Anthraea polyphemus*)의 pheromone-binding protein (PBP)이다(Vogt and Riddiford, 1981). 이들 PBP 단백질은 14~17 kDa 분자량을 지니고 분자 구조에 소수성 물질 결합 부위와 6개 cysteine의 보존서열 및 분비구조를 지니며 수컷 촉각에 특이적으로 존재하며 성페로몬과 특이적으로 결합하는 특성을 지닌다(Zhang et al., 2012). OBP 가운데에서 GOBP/PBP 유전자군은 나비목 곤충에서 단

일 유전자계통으로 특별히 잘 분화되어있다(Vogt et al., 2015). 예를 들어 박각시나방류인 *Manduca sexta*는 13개 OBP 유전자를 가지고 있으며, 이 가운데 3개의 PBP 유전자 및 2개의 GOBP 유전자가 발견된다(Györgyi et al., 1988; Vogt et al., 2002). 성페로몬 성분이 촉각 감각기의 미세관을 지난 촉각립 프랙으로 들어오면 PBP가 이 냄새물질과 결합하여 ORN의 세포막에 존재하는 OR까지 전달하고 감각전위를 발생시키게 한다(Kaissling, 2001). 노랑초파리(*Drosophila melanogaster*)의 경우 성페로몬인 cis-vaccenyl acetate (cVA)에 반응하기 위해서는 PBP 단백질인 LUSH가 cVA를 페로몬 감지 수용체인 OR67d에 까지 전달하여 한다(Xu et al., 2005). 비록 이 초파리를 형질전환하여 누에 성페로몬 BmorOR을 발현시켜 주어 누에 성페로몬에 반응하게 할 수 있지만, 누에 PBP인 BmorPBP1의 동시 발현이 누에 성페로몬인 봄비콜에 대해서 감지 능력을 크게 향상시키게 한다(Syed et al., 2006). 담배나방류인 *Heliothis virescens*의 성페로몬 수용체인 HvirOR13을 인체 세포주인 HEK293에 발현시키면 성페로몬에 대해서 반응을 보이기 위해서는 이 곤충의 PBP인 HvirPBP2 동시 발현을 요구하게 된다(Grosse-Wilde et al., 2007). 복숭아순나방의 경우 세 개의 PBP 유전자(GmolPBP1, GmolPBP2, and GmolPBP3)를 지니고 있으며 이 가운데 GmolPBP2가 주요 페로몬 성분인 Z8-12:Ac와 E8-12:Ac에 높은 결합력을 지닌다(Song et al., 2014). 이에 반해 GmolPBP1은 Z8-12:OH과 12:OH에 높은 결합력을 나타냈다(Zhang et al., 2018). GmolPBP3에 대해서는 어느 성페로몬 성분도 결합력을 나타내지 못했다. 여기에 최근 3가지 OBP (GmolOBP4, GmolOBP5, GmolOBP10)에 대한 유전자 발현과 기능 연구가 진행되었다(Chen et al., 2018b). GmolOBP4와 GmolOBP10이 주로 성충 촉각에서 발현되었지만 GmolOBP5는 촉각은 물론이고 여러 다른 부위에서도 발현되었다. 이들 냄새물질결합단백질의 냄새물질 결합 특이성을 4가지 성페로몬 성분과 21가지 기주 물질을 중심으로 분석하였다. 이때 GmolOBP4과 GmolOBP10은 성페로몬의 미량성분인 Z8-12:OH과 12:OH과 각각 결합력을 나타냈다. 또한 GmolOBP10은 기주물질인 hexanol, decanol, α -ocimene과 높은 결합력을 보였다. 또한 GmolOBP4는 기주물질인 hexanal, benzyl alcohol, pear ester와 결합력을 보였다. 이에 반해 GmolOBP5는 이들 기주 물질과 약한 결합력을 보였다. 즉, GmolOBP4와 GmolOBP10은 기주물질과 성페로몬 성분에 결합하는 능력을 지닌 반면 GmolOBP5는 다른 생리적 기능을 가진 것으로 추정하였다. 여기에 복숭아순나방 촉각에서 다량으로 발현되는 glutathione-S-transferase 유전자를 동정하게 되었고, 이 단백질이 Z8-12:OH의 분해에 특이성을 보이는 것

을 밝혔다(Li et al., 2018). 따라서 복숭아순나방의 성페로몬 물질에 대한 반응은 최소 4개의 OBP (GmolPBP1, GmolPBP2, GmolOBP4, GmolOBP10) 단백질이 관여하는 것으로 밝혀졌다. 아직 복숭아순나방붙이에 대해서는 이들 OBP에 대한 연구가 진행되지 않았지만, Z8-12:Ac와 E8-12:Ac에 높은 반응성을 지니기에 GmolPBP2와 유사한 PBP가 존재할 것으로 추정된다. 그러나 상이한 OBP가 존재하여 Z8-14:Ac에 대해 높은 결합력을 지니고 이 냄새물질에 대한 반응성을 매개했을 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서 개발된 SMD에 대한 두 해충의 동시교미교란 효과는 GmolPBP2와 이에 상응한 복숭아순나방붙이의 OBP에 의해 일어났을 것으로 사료된다.

본 연구는 사과 및 기타 핵과류에 큰 피해를 주고 있는 심식나방류인 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이를 효과적으로 방제하기 위한 기술로서 교미교란제에 대한 현장 처리 기술을 개발하는 데 목표를 두고 있다. 현장 처리 기술은 크게 두 단계로 처리 농도 및 처리 횟수를 결정하는 데 첫 번째 단계 연구를 진행하였고, 이후 두 번째 단계 연구로서 인접 과수원에서 이주하여 오는 암컷을 포획하려는 울타리 처리 기술로 나뉘어 진행되었다.

첫 단계 연구로서 SMD 처리 농도와 횟수가 결정되었다. 처리 농도는 각 처리 지점의 SMD 농도가 10 mg으로 두 개의 사과나무마다 하나씩 처리하는 농도로 결정되었다. 비록 매 나무마다 및 네 나무마다 한 개 처리와 큰 교미교란 차이가 없으나, 네 나무마다는 일부 왁스처리에서 보듯 교미교란 효과의 약화가 우려된다. 또한 이러한 처리 농도에서 연중 1회 처리로서 가능하다라는 것이 두 제형에서 가능하였다. 무방제 사과원에서 조사한 연중 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이의 발생을 살펴보면 제1성충발생기인 4월 초순~5월 중순 시기에 최대 피크를 보이고, 이후 이어지는 3~4회의 발생피크는 이 보다 낮은 발생 밀도를 나타냈다(Jung et al., 2012). 따라서 월동세대가 나타내는 제1성충발생기의 밀도를 낮추면 이후의 밀도는 더욱 낮출 수 있다는 의미이다. 일반적으로 야외 해충 방제의 연중 적기는 야외 발생 초기이다(Jung et al., 2006). 복숭아순나방은 연중 4~5세대 발생하며, 제1세대인 월동세대의 50% 우화시키는 4월 중순에서 5월 상순 동안에 나타나는 것으로 나타났다(Yang et al., 2001). 기존 연구는 교미교란제를 4월 초에 처리한 경우 월동세대의 교미교란 효과 및 신초피해를 저하를 보였다(Jung et al., 2006). 따라서 본 연구에서 SMD를 3월말에 처리한 것은 초기 발생하는 월동세대 집단의 차세대 형성을 교미교란을 통해 억제하는 효과로 해석된다.

두 번째 단계로서 본 연구는 SMD 처리의 효율성을 극대화하기 위해 울타리 처리를 개발하였다. 국내 과수원의 소규모와 인근 과수원과의 인접성은 교미교란제 처리에 따른 효과적 해

충방제에 어려움을 준다. 이는 비처리지역에서 교미된 암컷이 처리 지역으로 이주하여 들어와서 다음 세대를 형성하기 때문이다(Jung and Kim, 2008). 이를 해결하려 본 연구는 TA를 이용하여 교미 암컷을 유인하려는 FAKT 기술을 개발하였고, 이를 처리 지역 주변으로 울타리 처리하여 주변 과수원에서 이주하여 들어오는 암컷을 차단하려 하였다. 이를 위해 0.05% TA가 포함된 먹이트랩(Padilha et al., 2017)이 FAKT라는 이름으로 개발되었다. 유살된 개체를 분석한 결과 암컷이 약 30% 존재하였으며, 이들의 50%는 교미된 암컷이었다. 유사한 먹이트랩으로 암컷을 유살하려는 시도(Kim et al., 2007)가 있었으며 이때 포획된 복숭아순나방의 70~80%가 암컷이고 이 가운데 90% 이상이 교미된 암컷으로 보고하여 본 연구와 차이를 보였다. 그러나 이러한 먹이트랩은 사과원의 과실이 성숙해 가는 6~8월에는 포획 밀도가 낮아 효율성에서 문제가 되고 있다. 따라서 TA 보다 유인력에서 효율적인 유인제 개발을 위해 Piñero and Dorn (2007)은 green leaf volatiles의 3가지 성분(Z-3-hexen-1-ol, E-2-hexenal, Z-3-hexen-1-yl acetate)에 복숭아의 신초에서 나오는 향기 성분(benzaldehyde와 benzonitrile)(Natale et al., 2003)을 첨가하면 복숭아순나방의 교미된 암컷을 유인하는 데 효과적이라고 나타났다. 특별히 보조성분인 benzonitrile은 복숭아순나방 촉각엽에서 신경전달연접용 새로운 사구체를 형성하게 하여 유인력을 증가시킨 것으로 해석되었다(Piñero et al., 2008). 이에 대한 연구가 아직 국내 복숭아순나방 집단에서 분석되지 않아 추후 개발의 방향으로 제시되고 있다. 유사한 목적의 울타리 처리가 호주에서도 개발되었는데 이는 교미교란 효과를 균일화하기 위해 바람이 불어오는 방향의 가장자리 위쪽에 위치한 수컷의 경우는 효과가 떨어져 이 지역을 중심으로 교미교란제 추가로 처리하는 형태의 울타리 처리를 소개하였다(Il'ichev et al., 2004). 따라서 본 연구에서 추구하는 교미암컷을 유살하려는 FAKT와는 차이가 있다.

이상의 결과는 SMD가 복숭아순나방과 복숭아순나방붙이 모두에 대해서 교미교란 효과가 있으며, 사과나무 1/2의 농도로 처리할 경우 연중 1회 처리로 이들 해충의 교미를 억제할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다. 여기에 TA를 기반으로 한 울타리 처리 기술에 의해 인접한 무처리 지역에서 이주하여 오는 교미 암컷을 일부 차단할 수 있게 되어 그 동안 광역화 처리를 통한 효과적 교미교란제 처리 기술을 보완할 수 있는 국내 현장 적용형 교미교란제 처리 기술을 본 연구는 제공하고 있다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 아젠다연구사업(과제번호: PJ011756)으로 지원되었다.

Literature Cited

- Arai, T., Takanashi, M., Ihara, F., Mochizuki, F., 2009. Emergence of adult male *Grapholita dimorpha* and periods of infestation of apple orchards in central Iwate prefecture, Japan. *Annu. Rept. Plant Prot. North Jpn.* 60, 238-244.
- Baker, T.C., Heath, J.J., 2005. Pheromones: function and use in insect control, in: Gilbert, L.I., Iatrou, K., Gill, S.S. (Eds.), *Comprehensive molecular insect science*. Vol. 6. Elsevier, New York, pp. 407-459.
- Borchert, D.M., Stinner, R.E., Walgenbach, J.F., Kennedy, G.G., 2004. Oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) phenology and management with methoxyfenozide in North Carolina apples. *J. Econ. Entomol.* 97, 1353-1364.
- Cardé, R.T., Minks, A.K., 1995. Control of moth pests by mating disruption: successes and constraints. *Annu. Rev. Entomol.* 40, 559-585.
- Cardé, A.M., Baker, T.C., Cardé, R.T., 1979. Identification of a four-component sex pheromone of the female oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *J. Chem. Ecol.* 5, 423-427.
- Chen, Z.Z., Xu, L.X., Li, L.L., Wu, H.B., Xu, Y.Y., 2018a. Effects of constant and fluctuating temperature on the development of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Bull. Entomol. Res.* (In press).
- Chen, X.L., Su, L., Li, B.L., Li, G.W., Wu, J.X., 2018b. Molecular and functional characterization of three odorant binding proteins from the oriental fruit moth *Grapholita molesta* (Busck)(Lepidoptera: Tortricidae) *Arch. Insect Biochem. Physiol.* 98, e21456.
- Choi, K.H., Lee, D.H., Byun, B.K., Mochizuki, F., 2009. Occurrence of *Grapholita dimorpha* Komai (Lepidoptera: Tortricidae), a new insect pest in apple orchards of Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 48, 417-421.
- El-Sayed, A.M., 2007. The pherobase: database of insect pheromones and semiochemicals [<http://www.pherobase.com/>].
- Grimaldi, D., Engel, M.S., 2005. *Evolution of the insects*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Grosse-Wilde, E., Gohl, T., Bouché, E., Breer, H., Krieger, J., 2007. Candidate pheromone receptors provide the basis for the response of distinct antennal neurons to pheromonal compounds. *Eur. J. Neurosci.* 25, 2364-2373.
- Györgyi, T.K., Roby-Shemkovitz, A.J., Lerner, M.R., 1988. Characterization and cDNA cloning of the pheromone-binding

- protein from the tobacco hornworm, *Manduca sexta*: a tissue-specific developmentally regulated protein. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 85, 9851-9855.
- Hallman, G.J., 2004. Ionizing irradiation quarantine treatment against oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in ambient and hypoxic atmosphere. *J. Econ. Entomol.* 97, 824-827.
- Han, K.S., Jung, J.K., Choi, K.H., Lee, S.W., Boo, K.S., 2001. Sex pheromone composition and male trapping of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Korea. *J. Asia Pac. Entomol.* 4, 31-35.
- Il'inchev, A.L., Williams, D.G., Milner, A.D., 2004. Mating disruption barriers in pome fruit for improved control of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck (Lep., Tortricidae) in stone fruit under mating disruption. *J. Appl. Entomol.* 128, 126-132.
- Jung, S., Kim, Y., 2008. Comparative analysis to damage reduction of host plant by applying a mating disruptor of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta*, in two different cultivation environments of apple orchard. *Korean J. Appl. Entomol.* 47, 51-57.
- Jung C.R., Kim, Y., 2013. Different types of fruit damages of three internal apple feeders diagnosed with mitochondrial molecular markers. *J. Asia Pac. Entomol.* 16, 189-197.
- Jung, C.R., Kim, Y., 2014. Comparative transcriptome analysis of sex pheromone glands of two sympatric lepidopteran congener species. *Genomics* 103, 308-315.
- Jung, S., Park, C., Park, M., Lee, S., Choi, K., Hong Y., Kim, Y., 2006. Efficacy of commercial mating disruptors on field overwintering populations of Oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). *Korean J. Appl. Entomol.* 45, 235-240.
- Jung, S., Park, M., Lee, S., Choi, K., Hong, Y., Bae, S., Kim, Y., 2008. Development of wax-typed pheromone dispenser for mating disruption of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta*, and its application technique. *Korean J. Appl. Entomol.* 47, 255-263.
- Jung, C.R., Ahn, J.J., Eom, H.S., Seo, J.H., Kim, Y., 2012. Occurrence of *Grapholita dimorpha* in Korean pear orchards and cross-trapping of its sibling species, *Grapholita molesta*, to a pheromone lure. *Korean J. Appl. Entomol.* 51, 479-484.
- Jung, C., Jung, J., Kim, Y., 2013. Effects of different sex pheromone compositions and host plants on the mating behavior of two *Grapholita* species. *J. Asia Pac. Entomol.* 16, 507-512.
- Jung, C.R., Kim, S.H., Kim, Y., 2014. Enhancement of species-specific attraction by addition of a minor component of sex pheromone gland of *Grapholita dimorpha*. *Korean J. Appl. Entomol.* 53, 239-246.
- Kaissling, K.E., 2001. Olfactory perireceptor and receptor events in moths: a kinetic model. *Chem. Senses* 26, 125-150.
- Kim, Y., Bae, S., Choi, K., Lee, D., Lee, S., 2007. Efficacy test of mating disruptors using food trap of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). *Korean J. Appl. Entomol.*
- Kim, Y., Jung, S., Kim, Y., Lee, Y., 2011. Real-time monitoring of oriental fruit moth, *Grapholita molesta*, populations using a remote sensing pheromone trap in apple orchards. *J. Asia Pac. Entomol.* 14, 259-262.
- Kim, K, Park, C., Kim, Y., 2018. Simultaneous mating disruption of two *Grapholita* species in apple orchards. *J. Asia Pac. Entomol.* (Submitted).
- Knight, A.L., Barros-Parada, W., Bosch, D., Escudero-Colomar, L.A., Fuentes-Contreras, E., Hernández-Sánchez, J., Jung, C., Kim, Y., Kovanci, O.B., Levi, A., Lo, P., Molinari, F., Valls, J., Gemeno, C., 2014. Similar worldwide patterns in the sex pheromone signal and response in the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Bull. Entomol. Res.* 105, 23-31.
- Li, G.W., Du, J., Li, Y.P., Wu, J.X., 2015. Identification of putative olfactory genes from the oriental fruit moth *Grapholita molesta* via an antennal transcriptome analysis. *PLoS One* 10, e0142193.
- Li, G.W., Zhang, Y., Li, Y.P., Wu, J.X., Xu, X.L., 2016. Cloning, expression, and functional of three odorant binding proteins of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck)(Lepidoptera: Tortricidae). *Arch. Insect Biochem. Physiol.* 91, 67-87.
- Li, G.W., Chen, X.L., Xu, X.L., Wu, J.X., 2018. An antenna highly-enriched glutathione S-transferase in the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck)(Lepidoptera: Tortricidae). *Arch. Insect Biochem. Physiol.* (In press).
- Liénard, M.A., Strandh, M., Hedenström, Johansson, T., Löfstedt, C., 2008. Key biosynthetic gene subfamily recruited for pheromone production prior to the extensive radiation of Lepidoptera. *BMC Evol. Biol.* 8, 270.
- Murakami, Y., Sugie, H., Fukumoto, T., Mochizuki, F., 2005. Sex pheromone of *Grapholita dimorpha* Komai (Lepidoptera: Tortricidae), and its utilization for monitoring. *Appl. Entomol. Zool.* 40, 521-527.
- Natale, D., Mattiacci, L., Hern, A., Pasqualini, E., Dorn, S., 2003. Response of female *Cydia molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to plant derived volatiles. *Bull. Entomol. Res.* 93, 335-342.
- Neven, L.G., Kumar, S., Yee, W.L., Wakie, T., 2018. Current and future potential risk of establishment of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Washington state. *Environ. Entomol.* 47, 448-456.
- Padilha, A.C., Arioli, C.J., Boff, M.I., Rosa, J.M., Botton, M., 2017. Traps and baits for luring *Grapholita molesta* (Busck) adults in mating disruption-treated apple orchards. *Neotrop. Entomol.* doi: 10.1007/s13744-017-0517-z.
- Park, K.T., Kim, J.M., 1986. Moths collected in the northern part of civilian control of line neighboring DMZ. *Korean J. Plant Prot.* 25, 77-83.
- Percy-Cunningham, J.E., MacDonald, J.A., 1987. Biology and ultrastructure of sex pheromone-producing glands, in: Prestwich, G.D., Blomquist, G.J. (Eds.), *Pheromone biochemistry*. Academic Press, Orlando, FL, pp. 27-75.
- Piñero, J.C., Dorn, S., 2007. Synergistic between aromatic compounds

- and green leaf volatiles derived from the host plant underlies female attraction in the oriental fruit moth. *Entomol. Exp. Appl.* 125, 185-194.
- Piñero, J.C., Giovanni Galizia, C., Dorn, S., 2008. Synergistic behavioral responses of female oriental fruit moths (Lepidoptera: Tortricidae) to synthetic host plant-derived mixtures are mirrored by odor-evoked calcium activity in their antennal lobes. *J. Insect Physiol.* 54, 333-343.
- Pree, D.J., Whitty, K.J., van Driel, L., Walker, G.M., van Driel, L., 1998. Resistance to insecticides in oriental fruit moth populations (*Grapholita molesta*) from the Niagara Peninsula of Ontario. *Can. Entomol.* 130, 245-256.
- Roelofs, W.L., 1995. Chemistry of sex attraction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92, 44-49.
- Rothschild, G.H.L., Vickers, R.A., 1991. Biology, ecology and control of oriental fruit moth, in: Van der Geest, L.P.S., Evenhuis, H.H. (Eds.), *Tortricid pests. Vol. 5: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 389-412.
- SAS Institute, 1989. SAS/STAT user's guide, release 6.03 ed. SAS Institute, Cary, NC, USA
- Scoble, M., 1992. *The Lepidoptera: form, function and diversity* Oxford University Press, Oxford.
- Song, Y.Q., Dong, J.F., Qiao, H.L., Wu, J.X., 2014. Molecular characterization, expression patterns and binding properties of two pheromone-binding proteins from the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). *J. Integr. Agr.* 13, 2709-2720.
- Syed, Z., Ishida, Y., Taylor, K., Kimbrell, D.A., Leal, W.S., 2006. Pheromone reception in fruit flies expressing a moth's odorant receptor. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103, 16538-16543.
- Vogt, R.G., Riddiford, L.M., 1981. Pheromone binding and inactivation by moth antennae. *Nature* 293, 161-163.
- Vogt, R.G., Rogers, M.E., Franco, M.D., Sun, M., 2002. A comparative study of odorant binding protein genes: differential expression of the PBP1-GOBP2 gene cluster in *Manduca sexta* (Lepidoptera) and the organization of OBP genes in *Drosophila melanogaster* (Diptera). *J. Exp. Biol.* 205, 719-744.
- Vogt, R.G., Große-Wilde, E., Zhou, J.J., 2015. The Lepidoptera odorant binding protein gene family: gene gain and loss within the GOBP/PBP complex of moths and butterflies. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 62, 142-153.
- Xu, P., Atkinson, R., Jones, D.N., Smith, D.P., 2005. *Drosophila* OBP LUSH is required for activity of pheromone-sensitive neurons. *Neuron*. 45, 193-200.
- Yan, S., Liu, Y., Li, M., 1999. *Grapholita dimorpha* - a new record pest damage fruit trees of China. *For. Pest Dis.* 18, 15-16.
- Yang, C.Y., Han, K.S., Boo, K.S., 2001. Occurrence of and damage by the Oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck)(Lepidoptera: Tortricidae) in pear orchards. *Korean J. Appl. Entomol.* 40, 117-123.
- Yang, C.Y., Jung, J.K., Han, K.S., Boo, K.S., Yiem, M.S., 2002. Sex pheromone composition and monitoring of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Naju pear orchards. *J. Asia Pac. Entomol.* 5, 201-207.
- Yoshizawa, E., Daerunoru, S., Kaneko, M., 2008. Occurrence of *Grapholita dimorpha* in Nagano apple orchards. *Plant Prot. Jpn.* 62, 556-559.
- Zhang, G.H., Li, Y.P., Xu, X.L., Chen, H., Wu, J.X., 2012. Identification and characterization of two general odorant binding protein genes from the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). *J. Chem. Ecol.* 38, 427-436.
- Zhang, G.H., Chen, J., Yu, H.L., Tian, X.L., Wu, J.X., 2018. Molecular and functional characterization of pheromone binding protein1 from the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). *Sci. Rep.* 8, 2276.