

# *Bactrocera* 속 과실파리 종합관리기술

김용균\* · 김동순<sup>1</sup>안동대학교 식물의학과, <sup>1</sup>제주대학교 생물산업학부 식물자원환경전공, SARI

## Integrated Pest Management Against *Bactrocera* Fruit Flies

Yonggyun Kim\* and Dong-Soon Kim<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Faculty of Biosciences and Industry, Major in Plant Resources and Environment, SARI, The Research Institute for Subtropical Agriculture and Biotechnology, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

**ABSTRACT:** Increase in world trade commodities along with climate change entails frequent pest insect invasions from subtropical to temperate zones. Tephritidae is one of two families in fruit flies along with Drosophilidae and consists of more than 5,000 species. Some tephritid flies in genera *Anastrepha*, *Rhagoletis*, *Ceratitis*, and *Bactrocera* are highly invasive and give serious economic damages on fruits and vegetables in temperate zones. This review focuses mainly on *Bactrocera* fruit flies, which have been well studied in control techniques to defend their invasion and colonization. Though various control techniques against *Bactrocera* fruit flies have been developed, less efforts have been paid to establish efficient integrated pest management (IPM) programs. This review introduces current control techniques of fruit flies and some successful IPM programs implemented in subtropical islands. In addition, major fruit flies infesting crops in Korea have been also reviewed in their occurrence and control programs.

**Key words:** Fruit fly, IPM, *Bactrocera*, Male annihilation technique, Sterile insect release technique

**초록:** 국제 무역량 증가와 기후변화에 따라 아열대성 해충이 온대지역으로 침입하는 사례가 늘고 있다. 과실파리과는 초파리과와 더불어 두 과실파리 분류군 가운데 하나로 약 5,000 종 이상이 포함되어 있다. *Anastrepha*, *Rhagoletis*, *Ceratitis* 및 *Bactrocera* 속에 속한 일부 과실파리류가 높은 침입력으로 여러 온대 지역의 과실과 채소류에 막대한 피해를 일으키고 있다. 본 종설은 이들 과실파리류들의 침입과 정착을 억제하는 기술이 비교적 잘 개발되어 적용된 *Bactrocera* 속에 속한 해충류를 중심으로 고찰하였다. 이들 과실파리류에 대해 많은 방제 기술이 개발되었지만, 효율적인 종합해충관리 프로그램 개발이 아직 널리 정착되지 않고 있다. 이에 본 종설은 과실파리를 방제하는 여러 기술을 설명하고, 이 가운데 아열대 군도에서 실시된 종합해충관리의 성공사례를 소개한다. 아울러 국내에 큰 피해를 주는 주요 과실파리의 발생생태와 방제기술도 정리하였다.

**검색어:** 과실파리, 종합해충관리, *Bactrocera*, 수컷박멸기술, 불임충방사기술

일반적으로 과실파리(common fruit flies)라 하면 과실파리과(Tephritidae)와 초파리과(Drosophilidae)의 두 파리를 지칭하게 된다. 이 가운데 과실파리과는 체표면에 정교하고 색채로운 반점들이 있어 공작파리(peacock flies) 또는 광대파리로 불려 초파리과와 구분 짓고 있다. 과실파리과에는 약 5,000 종 이상이 현재까지 보고되었으며 이들은 500 여 속으로 분류되고 있다(White and Elson-Harris, 1992). 자연히 이들의 풍부한

종 다양성으로 형태 및 분자적 기술을 통해 종 분류 체계가 지속적으로 변하고 있다.

과실파리과에 속한 여러 종들은 다양한 과일과 채소를 가해하는 해충군으로 전 세계적으로 방제의 표적이 되는 주요 분류군 가운데 하나이다(White and Elson-Harris, 1992). 이들의 피해가 양과 질적인 면에서 모두 막대하기에 과실을 생산하는 나라들은 특정 과실파리류가 발생하는 수출국들로부터 수입하는 물품에 대해서 완전방역처리를 요구하고 있다(Vargas et al., 2008a). 따라서 과실파리류 방제 개념은 밀도억제 뿐만 아니라 완전박멸을 포함하는 방제 전략을 세우게 된다.

\*Corresponding author: [hosanna@anu.ac.kr](mailto:hosanna@anu.ac.kr)

Received May 9 2016; Revised October 3 2016

Accepted October 16 2016

과실파리과에 속한 분류군 가운데 특히 4 속(*Ceratitis*, *Anastrepha*, *Rhagoletis*, *Bactrocera*)의 과실파리가 농업적으로 중요한 해충군으로 분류된다. 이 가운데 해충으로서 위험성이 높고 분류 체계상 복합체를 형성하는 분류군이 *Bactrocera* 속으로 현재까지 651 종이 포함되고 있다(Drew and Hancock, 2000; Vargas et al., 2015a). 이들 가운데 최소 50 종은 주요 해충으로 거론되며, 대부분 다식성이다(White and Elson-Harris, 1992; DFFAP, 2015). 이 속의 종들은 열대 아시아, 남태평양 그리고 호주까지 넓게 분포하고 있다. 반면에 비교적 적은 종수가 아프리카에 분포하고, 남부 유럽에는 올리브과실파리로 불리는 *B. oleae* (Rossi) 한 종만이 분포하고 있다(White and Elson-Harris, 1992). 최근 올리브과실파리는 미국 캘리포니아에 정착하였으며, 카람볼라과실파리(*B. carambolae*)가 남아메리카에 그리고 오리엔탈과실파리(*B. dorsalis*)가 아프리카 케냐에 정착하였다(Drew et al., 2005; Rouse et al., 2005). 이 오리엔탈과실파리는 열대 아시아지역이 원산지로서 270 개 이상의 기주 식물을 가해하는 것으로 알려지고 있다(White and Elson-Harris, 1992; Allwood et al., 1999).

해충종합관리(integrated pest management: IPM)는 환경에 적은 피해를 주면서 농산물 생산이 지속적이면서 안정적이기 위해 여러 해충방제기술을 상호 보완적으로 혼합 처리하여 대상 해충을 경제적 피해수준 이하로 낮추는 데 목표를 삼고 있다(Kogan and Bajwa, 1999). 실제로 IPM에 속한 기술은 비교적 선택적 작용기작의 특정 합성 살충제를 선발하여 처리하는 화학적 방제기술로부터 비화학적으로 해충을 관리하는 생물적 방제기술까지 모두를 포함하게 된다(Pedigo and Rice, 2008). 이 IPM 기술이 과실파리를 방제하는 데 이용되어 지속적으로 과실 생산을 가능하게 하는 데 도움을 주고 있다(Vargas et al., 2008a).

과실파리류 방제에 관한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 과실파리류에 대한 IPM 연구는 상대적으로 매우 적은 비중을 차지하고 있다. 특별히 *Bactrocera* 과실파리류에 대한 IPM 연구는 일부 연구 그룹에서 진행되어 왔다. 가장 주목받고 있는 *Bactrocera* 과실파리류에 대한 IPM 연구는 Pacific Fruit Fly (PFF) 명칭의 IPM 프로그램(Allwood et al., 2002, 2015)과 지난 10 년간 하와이 지역에서 진행되어 온 Hawaii Area-Wide IPM (HAWPM)에서 찾아 볼 수 있다(Vargas et al., 2008a). 실제로 과실파리를 대상으로 IPM 프로그램을 적용하는 데에는 작물-해충-환경의 특수성, IPM 이행 지역 규모(단일 과수원 또는 광역화 지역)와 시기 그리고 사회 및 경제적 요인들을 종합으로 고려할 필요가 있다(Mwatawala et al., 2009; Vargas et al., 2010a). 본 종설은 Vargas et al. (2015a)에 기술한 *Bactrocera* 과실파리의 종합방

제에 관한 종설을 바탕으로 이들 과실파리의 지역 분포, 최근 방제 기술 및 이 해충군을 방제하는 데 사용한 여러 기술을 접목한 IPM 프로그램을 소개한다. 더불어 국내에서 발생하는 *Bactrocera* 속의 해충에 대한 생태 및 방제 방향에 대해서도 정리하였다. 본 종설에 표기된 과실파리류의 한국명은 농림축산검역본부 식물검역관련 규정에서 사용되는 명칭을 따랐다.

## ***Bactrocera* 과실파리류의 위생성 분류**

전체 811 개 종류의 기주를 가해하는 210 종의 과실파리 가운데 식용 과실을 가해하는 73 종의 *Bactrocera* 과실파리가 주요 해충에 포함된다(Allwood et al., 1999; Drew, 1989; Drew and Hancock, 1994; White, 2006; Drew and Romig, 2013; Hancock et al., 2000; Leblanc et al., 2012, 2013). 이 가운데 57 종은 과실을 가해하고, 16 종은 박과류를 가해한다. 이들 73 종은 해충 위험성, 기주 범위, 침입성 및 가해 빈도에 따라 4 단계 위험도 범주로 나누게 된다(Table 1). 제1단계(I 범주)는 광범위한 지역에 분포하며 침입성이 높은 다식성이거나 피해도가 높은 단식성 과실파리류를 포함하게 된다. 제2단계(II 범주)는 비교적 제한적 지역에서 침입성 및 다식성을 보유하거나 피해도가 높은 단식성 과실파리류를 포함하게 된다. 제3단계(III 범주)는 협식성 또는 일부 과실류 또는 박과류에 단식성 과실파리류를 포함한다. 제4단계(IV 범주)는 식용 과실이나 박과류에서 이따금 발생하는 과실파리류를 포함한다.

I 범주에 속한 과실파리 가운데 오리엔탈과실파리(*B. dorsalis*), 오이과실파리(*B. cucurbitae*) 그리고 퀸즐랜드과실파리(*B. tryoni*)가 가장 피해가 높다. 오리엔탈과실파리 복합종(*Bactrocera dorsalis* species complex)은 오리엔탈과실파리를 포함한 유사종 85 종을 포함하며(Drew and Hancock, 1994; Clarke et al., 2005; Drew and Romig, 2013) 이들 가운데 5 종이 다식성 과실파리이다. 최근에 *B. philippinensis* Drew and Hancock은 *B. papayae*의 동종이명으로 처리되었다(Drew and Romig, 2013). 또 *B. papayae*는 *B. invadens*와 함께 *B. dorsalis*로 합쳐졌다(Schutze et al., 2015). 특히 생식호완성 분석 결과 *B. invadens*와 *B. dorsalis*는 임의교배가 가능하고, 자손의 성비, 성장 및 생식력에서 차이가 나타나지 않아 생물학적으로 동일종이라고 판명되었다(Bo et al., 2014). 이러한 재분류는 오리엔탈과실파리의 지역 분포를 더욱 증가시켰으며, 유전방제와 같은 기술을 적용하는 데 대상 종의 범위에 대한 과학적 근거 자료를 제공하였다. 이 오리엔탈과실파리 복합종 분류군에서 오리엔탈과실파리와 카람볼라과실파리(*B. carambolae*)가 위험도가 높아 태평양지역은 물론이고 아프리카, 남아프리카 및 미국 캘리포니아 지역까지 침입하

**Table 1.** Classification of *Bactrocera* spp. according to insect pest severity (Vargas et al., 2015a). Feeding behavior is classified into polyphagous (P), oligophagous (O) or monophagous (M) type. Primary hosts include fruits (F), Cucurbitaceae (C), Solanaceae (SI), and Sapotaceae (Sp)

Class	Species	Feeding type	Primary hosts	Major infesting area
I	<i>B. carambolae</i>	P	F	Vietnam, Indonesia, South America
	<i>B. correcta</i>	P	F	Pakistan, Vietnam
	<i>B. cucurbitae</i>	P	C	Tropical Asia, Africa, Oceania
	<i>B. dorsalis</i>	P	F	Tropical Asia, Africa, Oceania
	<i>B. latifrons</i>	P	SI	Pakistan, Taiwan, Indonesia, Hawaii, Africa
	<i>B. neohumeralis</i>	P	F	Australia, New Guinea
	<i>B. oleae</i>	M	F	Africa, Southern Europe, Middle East, California
	<i>B. tryoni</i>	P	F	Australia, Oceania
	<i>B. zonata</i>	P	F	India, Vietnam
II	<i>B. aquilonis</i>	P	F	Australia
	<i>B. caryeae</i>	O	F	Southern India
	<i>B. cucumis</i>	P	C	Australia
	<i>B. curvipennis</i>	P	F	New Caledonia
	<i>B. facialis</i>	P	F	Tonga
	<i>B. frauenfeldi</i>	P	F	Australia, Micronesia, New Guinea, Solomon Islands
	<i>B. jarvisi</i>	P	F	Australia
	<i>B. kandiensis</i>	O	F	Sri Lanka
	<i>B. kirki</i>	P	F	French Polynesia, Fiji, Niue, Samoa, Tonga
	<i>B. kraussi</i>	P	F	Australia
	<i>B. melanotus</i>	P	F	Cook Islands
	<i>B. minax</i>	M	F	Bhutan, China, Nepal
	<i>B. musae</i>	M	F	Australia, New Guinea
	<i>B. occipitalis</i>	O	F	Kalimantan, Philippines
	<i>B. passiflorae</i>	P	F	Fiji, Wallis & Futuna, Niue
	<i>B. psidii</i>	P	F	New Caledonia
	<i>B. tau</i>	P	C	Pakistan, Philippines, Sumatra, Sulawesi
	<i>B. trilineola</i>	P	F	Vanuata
	<i>B. tsuneonis</i>	M	F	China, Japan
<i>B. xanthodes</i>	P	F	Cook Islands, Fiji, French Polynesia, Niue, Samoa, Tonga, Wallis & Futuna	
III	<i>B. albistrigata</i>	O	F	Indonesia, Malaysia
	<i>B. atrisetosa</i>	P	C	New Guinea
	<i>B. bryoniae</i>	O	F	Australia, New Guinea
	<i>B. caudata</i>	P	C	India, Taiwan, Indonesia
	<i>B. decipiens</i>	P	C	New Guinea
	<i>B. depressa</i>	P	C	Japan, Korea, Taiwan
	<i>B. distincta</i>	O	Sp	Fiji, Samoa, Tonga, Wallis & Futuna
	<i>B. diversa</i>	P	C	Pakistan, Vietnam
	<i>B. halfordiae</i>	O	F	Australia
	<i>B. melas</i>	P	F	Australia
	<i>B. moluccensis</i>	M	F	Java, New Guinea, Solomon Islands
	<i>B. obliqua</i>	O	F	New Guinea
	<i>B. passiflorae</i>	O	F	Fiji, Tokelau, Tonga, Tuvalu
	<i>B. pyrifoliae</i>	O	F	Thailand, Vietnam,
	<i>B. scutellaris</i>	P	C	India, Vietnam, Malaysia
	<i>B. scutellata</i>	P	C	Bhutan, Vietnam, Taiwan, Japan, Korea
	<i>B. strigifinis</i>	P	C	Australia, New Guinea
	<i>B. triangularis</i>	P	C	New Guinea
	<i>B. trivialis</i>	O	F	New Guinea
<i>B. tuberculata</i>	O	F	Bangladesh, Vietnam	
<i>B. umbrosa</i>	O	F	Thailand, New Guinea, New Caledonia	

Table 1. Continued

Class	Species	Feeding type	Primary hosts	Major infesting area
	<i>B. arecae</i>	M	SI	Malaysia, Singapore, Thailand
	<i>B. atramentata</i>	M	F	New Guinea
	<i>B. bancroftii</i>	M	F	Australia
	<i>B. expandens</i>	M	F	Australia, Indonesia, New Guinea
	<i>B. hastigerina</i>	M	F	New Guinea, Solomon Islands
	<i>B. hochii</i>	M	F	Bangladesh, Vietnam, Sumatra
	<i>B. lineata</i>	M	F	New Guinea
	<i>B. mesomelas</i>	M	F	Africa
	<i>B. mucronis</i>	M	F	New Caledonia
	<i>B. munda</i>	O	C	Philippines, Taiwan
	<i>B. murrayi</i>	M	F	Australia, New Guinea
IV	<i>B. mutabilis</i>	O	F	Australia
	<i>B. nigrofemoralis</i>	O	F	India, Sri Lanka
	<i>B. nigrotibialis</i>	O	F	India, Vietnam, Indonesia
	<i>B. ochroma</i>	M	F	Indonesia
	<i>B. perfusca</i>	O	F	French Polynesia
	<i>B. pruniae</i>	M	F	Vietnam
	<i>B. quadrisetosa</i>	M	F	Solomon Islands, Vanuatu
	<i>B. speculifera</i>	M	F	New Guinea
	<i>B. tapervitta</i>	M	F	Philippines
	<i>B. trichosanthos</i>	M	C	Indonesia, Malaysia, Thailand
	<i>B. trimaculata</i>	M	C	Philippines
	<i>B. versicolor</i>	M	SI	India, Sri Lanka

여 정착하게 되었다(Papadopoulos et al., 2013; Suckling et al., 2016). 오이과실파리(*B. cucurbitae*)는 주로 박과류 해충으로 암컷은 미성숙 과실 및 꽃을 가해한다. 이 해충은 파파야도 가해하고, 이따금 비박과류 기주도 가해하기도 한다. 이 해충은 동남아시아가 원산지이고 아프리카와 일부 오세아니아 지역에 침입하여 정착하였다. 퀸즐랜드과실파리(*B. tryoni*) 복합종은 4 개의 유사한 종들로 구성된다. 이 가운데 소형퀸즐랜드과실파리(*B. neohumeralis* (Hardy))는 퀸즐랜드과실파리와 동소성으로 유전적 구분이 어려우나 생식적으로 교미시간의 차이로 고립되어 있다(Clarke et al., 2011). *B. aquilonis* (May)와 *B. melas* (Perkins & May)는 퀸즐랜드과실파리와 동일종의 변이체로 여겨진다(Clarke et al., 2011). 퀸즐랜드과실파리도 침입성이 높아 1970년대 초기에 다른 지역으로부터 뉴칼레도니아섬(남태평양의 프랑스령)과 프랑스령 폴리네시아에 침입하여 정착하였다.

## 과실파리 종합관리 기반 정보와 기술

### 높은 침입력을 지닌 과실파리의 생리적 기반

열대 및 아열대에 분포하고 있는 과실파리가 온대지역으로 이주하여 정착하려는 데 겨울 기간 동안 겪게 되는 저온과 먹이 부족은 이들의 정착에 최대 걸림돌이다. 그러나 이러한 비교적

저온 한계성에 기반을 둔 고정적 분포 추정지역은 일부 곤충에서 나타나는 실제 분포 지역과 큰 차이를 나타내기도 한다. 예를 들어, 오리엔탈과실파리의 경우 이 곤충이 발취하는 내한성 유기기작으로 실내 정온 조건에서 측정된 임계 저온 한계에 둔 분포 추정 지역보다 더 넓은 지역에 분포하는 것으로 관찰되었다. 중국 대륙의 경우 비교적 아열대성 남부지역에 분포하는 오리엔탈과실파리가 양쯔강 부근(북위 31.30-34.50°)의 온대지역까지 분포 범위를 넓히고 있다(Luo et al., 2009). 위도 상으로 상이한 오리엔탈과실파리의 집단을 채집하여 분석한 결과 높은 위도에서 유래된 오리엔탈과실파리의 경우 위도가 낮은 집단에 비해 내한성이 높은 것을 확인하였고, 이에 따라 내동결물질 및 관련된 내한성 효소 활성이 증가한 것을 확인하였다(Wang et al., 2014). 이는 온대지역으로 일부 오리엔탈과실파리 집단이 침입하여 정착하고 있다는 것을 의미하고 있다. 더욱이 남부 아열대 지역에서는 성충으로 겨울기간을 지내는 반면, 온대지역에 분포하는 오리엔탈과실파리는 토양 5 cm 지하에서 월동처를 만들고 번데기로 휴면하는 것으로 밝혀졌다(Luo et al., 2009). 비교적 내한성이 높은 번데기 태로 월동한다는 점은 이 오리엔탈과실파리의 온대지역 침입 및 정착을 용이하게 하는 생리적 기작으로 이해될 수 있다.

오리엔탈과실파리의 넓은 분포 능력은 내열성 유기에서도 비롯된다. 유사종인 *B. correcta*의 경우는 중국의 남서부 한 개

의 성(城)에 국한되어 분포하는 반면, 오리엔탈과실파리는 중국의 17 개 성에 분포한다(Crop Protection Compendium, 2014). 이러한 이유는 오리엔탈과실파리의 내열성 유기기작에서 비롯된다. 내열성유기는 비교적 낮은 고온을 미리 접한 후 치사를 일으킬 수 있는 높은 고온에 노출되면 견디는 능력이 높아지는 현상이다. 즉, 비교하려는 *B. correcta* 과실파리에 비해 오리엔탈과실파리는 여러 다양한 온도 범위서 내열성 유기를 발휘할 수 있다(Hu et al., 2014). 이러한 온도 적응력은 오리엔탈과실파리가 비교적 넓은 범위에 분포하면서 지속적으로 타 지역으로 분포를 확장하는 데 원동력으로 작용하게 한다.

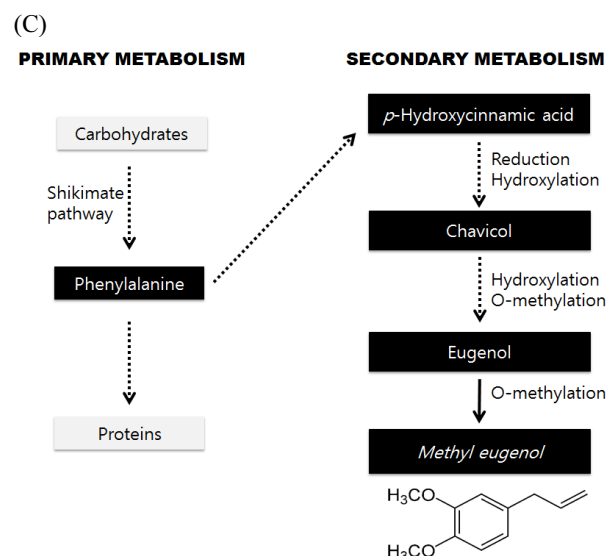
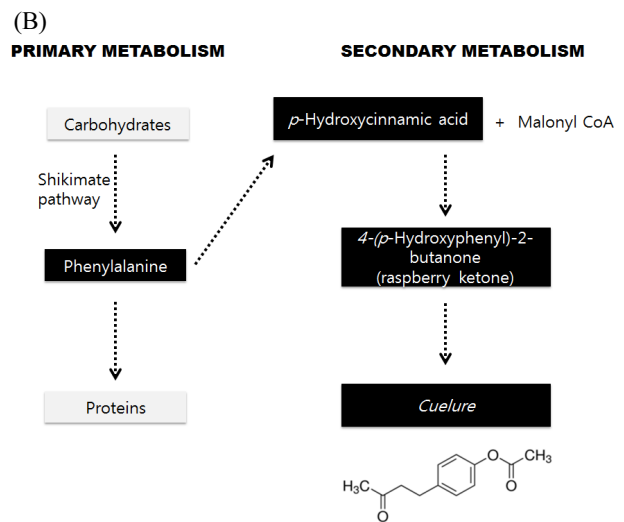
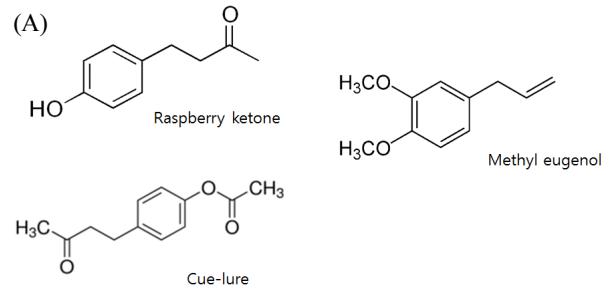
오리엔탈과실파리의 높은 비행 이동 능력은 이 곤충이 타 지역으로 침입할 수 있는 또 다른 생리기작이다. Steiner (1957)는 하와이에 서식하는 오리엔탈과실파리가 과실 수확 이후 약 37 km를 비행하는 것을 목격하였다. 일본 남쪽 오가사와라 군도에 서식하는 오리엔탈과실파리는 수면 위로 50 km를 비행하였다(Yan, 1984). Zhu and Qiu (1989)는 오리엔탈과실파리가 대만에서 류큐 열도까지 약 27 km를 비행하였다고 보고하였다. 이러한 비행능력은 오리엔탈과실파리 성충의 나이에 따라 상이하여 우화 후 15 일째 성충이 가장 높은 비행 능력을 보였는데, 이 시기에 비행능력의 근섬유 직경이 가장 크고(1.56  $\mu\text{m}$ ), 근질의 길이가 가장 짧은(1.37  $\mu\text{m}$ ) 것에서 확인할 수 있었다(Chen et al., 2015).

### 과실파리 유인제 기원과 다양성

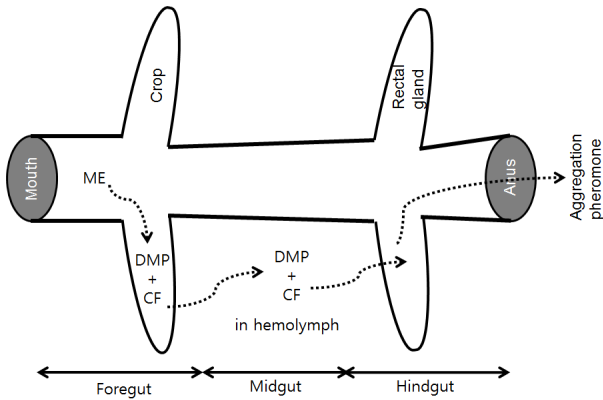
과실파리의 유인제 연구는 모기기피제로서 사용한 citronella oil에 복숭아과실파리(*B. zonata*)가 유인되며, 이 식물 정유에 methyl eugenol이 포함된 것으로부터 비롯되었다(Howlett, 1912, 1915). 유사한 연구가 지중해과실파리에서도 등유(kerosene)에 유인되었고, 이후 연구들에서 이 과실파리의 유인제를 밝혀게 되었다(Cunningham, 1989a). 이러한 연구들은 식물체가 생산하여 발산하는 이차대사산물에 관심을 갖게 하였다.

식물 체내 대사과정은 직접 성장과 생식에 관여하는 일차대사와 성장과 생식에 관련이 적으나 주로 방어에 관련된 이차대사로 대별된다. 큰과실파리아과(Dacinae)에 속한 과실파리류의 유인물질과 관련된 식물의 두 가지 주요 이차대사물질(Fig. 1A)이 cuelure (4-(*p*-acetoxyphenyl-2-butanone))와 methyl eugenol (ME: 4-allyl-1,2-dimethoxy-benzene)이다(Cunningham, 1989a,b). 이들 물질은 C6-C3 골격의 phenyl propanoids로 불린다(Friedrich, 1976). 탄수화물로 부터 방향족 아미노산을 만드는 shikimic acid/shikimate 생합성과정을 통해 페닐알라닌이 형성되고, 이는 바로 phenyl propanoids 생합성에 전구물질로 이용된다. 큰

과실파리아과에 속한 곤충류의 유인물질은 페닐알라닌에서 파생된 *p*-hydroxycinnamic acid (*p*-coumaric acid)이다(Metcalf, 1979). 즉, 이 *p*-hydroxycinnamic acid 물질(C9)과 malonate (C3)가 결합하여 C12 물질을 만들고, 탈카르복실, 산화, 환원



**Fig. 1.** Biosynthesis of cuelure and methyl eugenol in plants. (A) Three plant metabolites used as lures of tephritid fruit flies. (B) Biosynthesis of cuelure. (C) Biosynthesis of methyl eugenol.



**Fig. 2.** From diet methyl eugenol (ME) to pheromone release in *B. dorsalis* males. Ingested ME is stored and transformed into 2-allyl-4,5-dimethoxyphenol (DMP) and (*E*)-coniferyl alcohol (CF). DMP and CF are then secreted into hemolymph and circulated to rectal gland. In the gland, two pheromone components are stored and released to air through anus during lekking behavior.

및 탈카르복실 반응을 거쳐 raspberry ketone (4-(*p*-hydroxyphenyl)-2-butanone)을 형성하게 된다(Fig. 1B). 이는 화합물의 안정화를 위해 아세틸기를 붙여서 Cuelure로 명명하여 상품화되었다. ME의 생합성과정도 *p*-hydroxycinnamic acid에서 시작하여 환원, 수산화 및 두 번의 O-메틸화를 거쳐 ME가 합성된다(Fig. 1C).

ME는 적어도 200 여 종(32 개 과)의 기주 식물체에서 생산하며, 다수의 *Bactrocera* 과실파리류 수컷을 유인한다. 오리엔탈과실파리의 경우 수컷은 ME를 섭취하고, 전장 소낭 부위에서 산화과정을 통해 페로몬 성분인 2-allyl-4,5-dimethoxyphenol (DMP)과 (*E*)-coniferyl alcohol (CF)로 전환되고(Fig. 2), 다시 소낭 세포막을 통과하여 나가 혈림프로 이동되고, 이를 다시 직장샘(rectal gland)에서 흡수 및 저장하여 교미 때 향문으로 방출하게 된다(Nishida et al., 1988; Hee and Tan, 2004). 수컷을 유인하는 ME의 유효 유인 약량(ED<sub>50</sub>)은 318 ng으로서(Wee et al., 2002), 페로몬 성분인 DMP와 CF의 유효 약량과 거의 동일하여 ME 자체로 수컷을 유인하는 유인제로 사용할 수 있다. 한편 DMP와 CF의 집합페로몬에 암수가 모두 모이나, 야외에서 이들의 유인 기간이 달라, 수컷은 이 물질에 유인되는 것이 아침 무렵(08:00-11:00)이나 암컷은 저녁 무렵(18:45-19:15)으로 알려지고 있다(Hee and Tan, 1998; Khoo et al., 2000).

직장샘에서 방출하는 페로몬은 과실파리 종에 따라 차이를 보인다. 예를 들어, 파파야과실파리(*B. papayae*)는 직장샘에 DMP와 CF를 보유하고 있는 반면, 카람볼라과실파리(*B. carambolae*)는 6-oxo-1-nonanol (OXO)과 CF를 주성분으로 보유하고 일부 미량성분을 지니게 된다(Perkins et al., 1990). 이 두 자매종은 상호 교잡이 가능하고, 이때 얻어진 자손은 두 종의 특이적 페

로몬 조성과의 차이를 보이면서 양친형의 혼합 조성을 나타냈으며, 흥미롭게도 야외에서 포획된 개체들에서도 이러한 조합형이 검출되어 이들 두 자매종의 상호 교배가 가능하다는 것이 이들 페로몬 조성 분석으로도 판단내릴 수 있다(Wee and Tan, 2005).

*Bactrocera* 수컷이 ME에 유인되는 이유는 이들 과실파리류의 약물섭식행동(pharmacophagy)으로 해석된다. 이러한 과실파리류의 약물섭식행동은 생식과 방어를 위한 것으로 알려지고 있다. 즉, ME를 섭취한 수컷은 암컷에 선호성이 높아져 교미 성공율이 높다(Tan and Nishida, 1998; Shelly, 2000). 또한 섭취된 식물체 유인물질은 포식자에게 알로몬의 방어물질로 작용하는 이점을 갖는다(Nishida and Fukami, 1990; Tan, 2000). 즉, 식물체 입장에서는 기주 식물은 과실파리의 화분매개를 통해 수정을 도모할 수 있다. 즉 식물체 이차대사물질이 시노몬으로 작용하여 과실파리류를 유인한 꼴이 된다(Raghu, 2004).

## 과실파리 모니터링 유인제 효능

외래 과실파리의 침입에 대한 조기 검출은 필수적이고 이에 따라 모니터링 기술 개발이 이뤄져 왔다. 미국의 경우(캘리포니아와 플로리다) 이를 위해 수컷에 유인 효과가 높은 미끼를 이용한 Jackson 트랩을 다수 배치하였다. 오리엔탈과실파리에 대해서는 ME, 오이과실파리(*B. cucurbitae*)에 대해서는 Cuelure를 유인제로 이용하고 있다(IAEA, 2003; FDACS, 2004; CDFA, 2010). Cuelure는 쉽게 가수분해되어 RK로 전환된다(Vargas et al., 2010c). Cuelure는 쉽게 가수분해되어 RK로 전환된다(Vargas et al., 2010c). Cuelure가 RK 보다 휘발성이 높기 때문에 유인 물질로 작용하기 적합하고, 화학적으로도 안정적이다(Metcalf and Metcalf, 1992). 적어도 30,000 개 이상의 모니터링 트랩이 캘리포니아에 설치되어 운영되고 있다(Vargas et al., 2010a). 이들 모니터링 트랩들은 액체 성분의 루어와 유기인계 살충제인 naled (dimethyl 1,2-dibromo-2,2-dichloroethyl phosphate)를 포함하고 있다(Vargas et al., 2009a). 이러한 액체형 모니터링 트랩을 보다 안정화하기 위해 고체형으로 전환시키고, 포함된 살충제도 인체에 보다 안전한 약제로 치환하였다. 또한 ME에 유인되는 과실파리와 Cuelure에 유인되는 과실파리를 함께 유인하기 위한 복합루어를 개발하여 트랩 설치 비용과 노동력을 절감하려 하였다. 이러한 아이디어 바탕 위에 ME와 Cuelure를 혼합하고 여기에 DDVP 살충제를 함께 투입하여 제작하였을 때 오이과실파리와 오리엔탈과실파리가 각각 단독으로 설계된 트랩만큼 포획되어 이들의 동시 모니터링이 가능하다는 것을 보여 주었다(Leblanc et al., 2011). 복합루어 기술은 다시 진일보하여 ME와 RK에 지중해과실파리를 유인하는 trimedlure

(*tert*-butyl-4(or 5)-chloro-2-methyl-cyclohexanecarboxylate)를 혼합하는 3 종 루어를 집적하는 방식이 개발되었다(Shelly et al., 2012; Vargas et al., 2012a,b). 그러나 고려해야 할 변수는 이들 유인제들의 휘발속도 차이이다. ME의 휘발속도가 Cuelure에 비해 높고, 또한 ME에 유인되는 오리엔탈과실파리가 이 농도에 비해하여 유인되기에 복합 루어를 사용할 때의 목표 과실파리에 따른 유인력 변이가 발생할 수 있다(Vargas et al., 2015b).

이들 유인제에 대한 과실파리의 유효 유인거리에 대한 정보는 야외에서 이들 트랩을 설치하는 데 필수적 정보이지만, 비교적 제한된 연구 결과가 현재까지 보고되고 있다. 65%의 포획률거리로 유인물질의 유인효과를 비교하여 보면, 지중해과실파리는 trimedlure에 약 14 m의 유효 유인반경을 갖는 반면, 오리엔탈과실파리는 ME에 약 36 m 유효 유인반경을 갖는다(Manoukis et al., 2015). 과실파리의 모니터링 효율을 높이기 위해서는 다양한 환경조건에서 이들 과실파리에 대한 유효 유인 거리 정보가 필요하다.

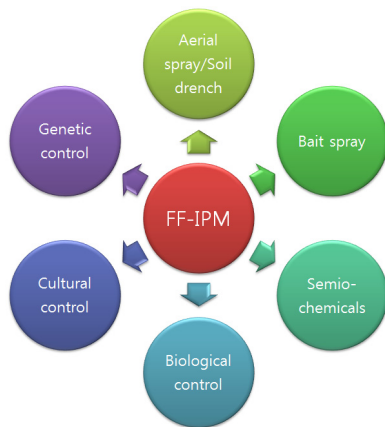
### 과실파리 방제 기술

아시아와 태평양 지역을 대상으로 서식하는 *Bactrocera* 및 유사 과실파리류의 광역화 방제를 위해 다양한 기술이 개발되어 왔다(Fig. 3). 이들은 (1) 살포제(Roessler, 1989), 단백질 미끼 살포제(Prokopy et al., 1992, 2003; Peck and McQuate, 2000; Vargas et al., 2008a; Piñero et al., 2009b) 및 토양관주처리제(Stark and Vargas, 2009; Stark et al., 2013, 2014)를 포함하는 살충제 처리 기술 (2) 유인제를 이용하는 수컷박멸제(Steiner et al., 1965a; Koyama et al., 1984; Vargas et al., 2000, 2014a) 처리 기술 (3) 불임곤충방사(Steiner et al., 1970; Koyama, 1996; McInnis et al., 2007) 처리 기술 (4) 천적방사(Vargas et al.,

2007, 2012a) 기술 (5) 경종적 방제(Allwood, 1997; Klungness et al., 2005; Allwood et al., 2015) 기술을 포함한다.

**화학 살충제 처리 기술.** 과실파리 방제의 역사가 100 년 이상으로 유기합성 살충제의 개발 역사와 함께 하였다. 따라서 화학 살충제를 이용한 방제는 1900년대 초 무기화합물 살충제(예, 비소류)를 이용한 지상살포 처리로부터 시작하여 유기합성 살충제(유기염소계, 유기인계, 합성피레스로이드계)까지 이어 오고 있다. 화학살충제 처리 기술은 다른 부대 장치 없이 현장에 바로 적용할 수 있는 처리 방법이고, 높은 방제력을 비교적 안정적으로 기대할 수 있다는 점에서 유리하다(Allwood, 1997).

살충제 처리에 단백질 먹이 미끼를 추가하는 경우 단순히 살충제만 처리하는 경우와 비교하여 볼 때 동일한 방제 효과를 거두는 데 소요되는 살충제 사용량을 크게 줄일 수 있어, 여러 과실파리의 완전박멸프로그램에 성공적으로 이용되어 왔다(Steiner et al., 1961; Roessler, 1989; Prokopy et al., 1992). 특히 난소 발육과 알 생산을 위해 단백질 먹이원이 필요한 암컷 과실파리가 이 단백질 먹이 미끼에 용이하게 유인되었다. 이에 따라 오리엔탈과실파리를 방제하기 위해 최초로 단백질 미끼가 이용되었고, 여기에 비교적 포유류 독성이 낮고, 방제 비용이 저렴하고, 과실파리에 낮은 저항성을 보이는 말라치온 유기인계 살충제가 이 미끼에 첨가되었다(Steiner, 1952; Roessler, 1989). 1960년대에 특정 제형이 개발되어 토양 및 공기 중 살포와 방역 처리에 도입되었으며, 이 제형이 오늘날까지 여러 과실파리방제에 표준으로 이용되고 있다. 이 제형은 3/4-4/5이 Nu-Lure® Insect Bait (Miller Chemical and Fertilization Corporation, Hanover, PA, USA)이고 나머지 1/4-1/5은 말라치온으로 구성되었다. 유기인계 살충제가 천적과 인체에 위협을 주기 때문에 대체 살충제의 개발이 21세기에 이뤄져 왔다. 태평양 군도에 발생



Control techniques	Methods
Chemical control	Aerial or soil drench
	Bait spray: GF-120, Nu-Lure® Insect Bait
	Semiochemicals: Cuelure MAT, ME-MAT
Biological control	Egg parasitoid ( <i>Fopius arisanus</i> )
Cultural control	Sanitation, Fruit bagging Augmentorium, Soil disturbance
Genetic control	Sterile male insect release technique (SIT)

Fig. 3. Fruit fly-integrated pest management (FF-IPM).

한 *Bactrocera* 과실파리를 대상으로 fipronil 살충제를 첨가한 BactroGel 제형을 개발하여 적용하였다(Allwood et al., 2002, 2015). 1990년대 후반에 보다 안전한 생물농약인 spinosad 기반의 새로운 미끼 살포 제형이 개발되어 중앙아메리카와 미국에서 지중해과실파리(*Ceratitidis capitata* (Wiedemann))를 방제하는 데 사용되어 Nu-Lure 만큼의 방제효과를 나타냈다(Peck and McQuate, 2000; Vargas et al., 2002). Spinosad는 토양에서 식하는 actinomycete 세균(*Saccharopolyspora spinosa* Mertz & Yao)에서 유래된 독소로서 포유류에 독성이 낮고 천적류에 대한 영향이 낮다(Stark et al., 2004). Spinosad 기반 단백질 미끼는 과실파리류를 유인하여 경구독성을 일으켰으며 Moreno and Mangan (1995)에 의해 최초로 개발되었다. 이후 GF-120 Fruit Fly Bait (Dow AgroSciences, Indianapolis, IN)로 상품화되었다(DowElanco, 1994; Vargas et al., 2007). 하와이에서는 오이과실파리 방제를 위해 단백질 미끼를 농경지 테두리에 처리하여 이용하였다(Nishida et al., 1957). 또한 이 지역에서 진행된 IPM 프로그램은 3 종의 과실파리(*B. cucurbitae*, *B. dorsalis*, *B. latifrons*)에 대해 GF-120의 방제 효과를 인정하고 기존에 인축 독성이 높은 유기인계 살충제 살포를 대신하여 GF-120 처리제로 방제하도록 권장하였다(Prokopy et al., 2003; Piñero et al., 2009b).

과실파리의 광역화 처리 기술 가운데 또 다른 살충제 처리 기술은 과실나무 주변에 토양관주 처리와 묘목을 과실파리 오염지역에서 타 지역으로 이동하려 할 때 방역 차원에서 실시하는 묘목관주 처리가 있다(Stark et al., 2013). 미국의 경우 캘리포니아에서 묘목을 타 지역으로 이송하려 할 때 묘목을 담은 포트와 묘목 자체를 다이아지논 살충제를 이용하여 관주 처리하여야 한다. 수생 생물에 대한 악영향으로 미국에서는 대부분 다이아지논 사용이 금지되었지만(Stark et al., 2013) 과실파리(유충 또는 성충)가 발생된 기주 나무 주변으로 다이아지논을 이용한 토양관주 처리가 진행되고 있다. 한편 Stark et al. (2013, 2014)은 과수원과 각 가정의 뒷마당에 심겨진 과실류의 토양처리를 위해 다이아지논을 대체할 여러 토양관주제를 탐색하였다. 이 가운데 3 종의 피레스로이드제가 가장 효과적이라고 나타났다으며 또한 새롭게 제형화된 spinosad (일명 Entrust 액상수화제)도 또한 효과적이었다. 이 새로운 제형은 기존의 Entrust보다 더 효과적이었고, 유기농에서도 사용이 가능해졌다. 생물농약으로 곤충병원성곰팡이인 *Metarhizium anisopliae*가 주로 *Bactrocera* (*B. dorsalis*, *B. cucurbitae*)와 *Ceratitidis* (*C. capitata*, *C. cosyra* (Walker)) 과실파리류를 방제하는 활성을 지니고 있다.

**수컷박멸기술.** *Bactrocera* 속 과실파리 가운데 적어도 324

종의 수컷은 Cuelure 유인제에 유인되고, 123 종은 ME에 유인된다(Vargas et al., 2014a; DFFAP, 2015). 수컷박멸기술(male annihilation technique: MAT)은 이 수컷 유인제에 살충제(naled, malathion, fipronil)를 혼합한 후 방출기 재질(섬유판, 코코넛껍질, 솜뭉치, 종이펄프)에 스며들게 하여 미끼로 만든 후 이를 공중투하 또는 지상설치를 통해 반복적으로 처리하면서 과실파리 방제를 구현하는 기술이다. 하와이 마리아나 군도에서 ME-MAT을 오리엔탈과실파리 방제에 적용하여 완전박멸에 성공한 사례가 있다(Steiner and Lee, 1955; Steiner et al., 1965b). 팜에서 오리엔탈과실파리에 대해서 불임곤충방사로 완전방제를 실시한 후 이듬해에 이웃하는 섬들에는 ME-MAT을 처리하여 방제에 성공하였다(Steiner et al., 1970). 보다 큰 규모의 완전박멸 프로그램이 류큐 열도에서 진행되었다(Koyama et al., 1984). 1970년대에 남태평양 Rapa Nui 섬에 번식한 퀸즐랜드과실파리 방제를 위해서 솜뭉치에 Cuelure 유인제(ME 만큼 유인력이 좋지 않지만)와 말라치온을 혼합하여 조제한 Cuelure-MAT을 단백질미끼제와 함께 발생지점에 살포하여 완전박멸 효과를 얻었다(Bateman et al., 1973).

1960년에서 2012년에 걸쳐 9 종의 서로 다른 *Bactrocera* 속 과실파리가 캘리포니아에서 발견되었다. 이 가운데 오리엔탈과실파리가 가장 빈번하게(126 회) 발견되었다. 이 기간 동안 25 회의 검역 소독처리와 함께 140 회 완전박멸 프로그램이 가동되었다(Vargas et al., 2014b). 플로리다는 1999년 이래 2012년까지 12 회 오리엔탈과실파리가 발견되었다. 이러한 지속적 침입 사례 속에 안전한 MAT 처리 기술이 개발되었다. 나온 제품들 가운데 Vargas et al. (2008b, 2009b)은 AKA SPLAT-MAT-spinosad-ME (ISCA Technologies, Riverside, CA, USA) 또는 STATIC™ (Dow AgroSciences, Indianapolis, IN, USA)이 기존의 naled를 함유한 Min-U-Gel과 비등하거나 또는 우수한 방제효과를 보였다고 발표하였다. STATIC™ Spinosad-ME가 캘리포니아와 플로리다에서 검증되었고, 기존에 처리제로 사용하고 있는 유기인계 농약의 단점을 보완하는 기술로 평가받았다(Vargas et al., 2014a,b,c). SPLAT-MAT-Cuelure 제형은 하와이에서 Cuelure에 반응하는 과실파리류를 방제하는 데 성공적이었다(Vargas et al., 2008b).

### 불임곤충방사기술(Sterile Insect Release Technique: SIT)

**과실파리 SIT 방제 기술.** SIT는 방사선 조사에 의해 수컷을 불임화시키고 이를 야외에 방사시켜, 야생 암컷과 교미하게 하여 자손을 만들지 못하게 하는 유전적 방제 기술이다(Knipling, 1955). 방사선을 이용하여 불임충을 만드는 방법은 오리엔탈



과실파리의 경우 우화하기 2 일 전에 저산소 조건에서 번데기를 방치하고 100 Gray의 선량으로 조사하게 된다(Shelly et al., 2010). 이렇게 얻어진 불임충은 공중에서 또는 지상에서 방사된다. 하와이에서 실시된 SIT의 경우는 약 8 개월간(2005년 2월 2일 - 9월 29) 매주 99,600 - 595,800 마리가 방사되어 총 11,556,000 마리가 투입되었다(Vargas et al., 2010b). 방사선을 이용하여 불임충을 유도하는 데 사용되는 방사선 방출물질에 대한 위해성이 거론되었고 이를 해결하기 위해 X선을 이용한 불임충 유도 기술이 개발되었다(Mastrangelo et al., 2010). 지중해과실파리와 *Anastrepha fraterculus*를 대상으로 조사한 결과 99% 불임성을 유발하는 선량을 결정하였고, 이때 지중해과실파리는 84%, *A. fraterculus*는 74%의 생존력을 기록하였다. 이후 SIT를 위한 X선 발생기가 Rad Source Technologies 회사에서 상품화하여 RS2400으로 출시되었다. 그러나 X선 또는 감마선으로 불임화된 수컷은 수명이 단축된다. 예를 들어, 흰줄숲모기(*Aedes albopictus*)의 경우 무처리 수컷이 41 일의 수명을 갖는 반면 처리충은 10 일로 단축되었다(Yamada et al., 2014). 최근 오리엔탈과실파리에 대해서 이 X선 조사에 따라 미치는 생리적 차이를 단백질 조성 차이로 분석한 결과, 대사 관련 효소 단백질과 페로몬 신호 처리 관련 단백질에서 X선 조사가 영향을 주어 불임 수컷이 야외 무처리 수컷에 비해 교미력이 둔화될 수 있다는 분자적 증거를 제시하였다(Chang et al., 2015).

불임충의 교미력을 보완하는 차원에서 수컷이 합성하는 페로몬의 전구물질을 섭취시켜 야외에서 교미력을 증가시키는 기술이 개발되었다(Shelly et al., 2010). 방사 3 일전에 오리엔탈과실파리의 불임충 수컷에게 1-4 시간 동안 ME를 섭취시킨 결과 차세대 형성을 억제하는 불임효과가 크게 높아져 SIT 방제 효율을 증가시켰다.

SIT 기술의 또 다른 어려움 가운데 하나는 불임충 가운데 수컷만을 골라서 야외에 방사시키는 것이다. X선을 조사할 경우 암컷도 불임이 되지만, 암컷이 함께 방사될 경우 불임된 수컷이 야외 암컷과 교미하는 대신 방사된 불임 암컷과 교미하게 되어 SIT 방제 효과를 떨어뜨린다. 더욱이 불임된 암컷은 과실 흡즙 및 식물병 매개 등의 직접적 과실피해도 일으킬 수 있다. 따라서 수컷만 방사하는 기술 개발이 요구된다(Rendón et al., 2004). 두 가지 방향에서 수컷만 선발해 가는 기술이 개발되었다. 하나는 전통적인 육종 방법으로 오이과실파리(*B. cucurbitae*)에서 한쪽 성만 생산하는 계통(sexing strain)을 선발하여 소규모 지역에서 SIT가 실시되었으며 그 지역의 과실파리를 거의 완전 박멸시킬 수 있었다(McInnis et al., 2007). 비록 소규모에서는 성공하였지만, 이를 대규모 생산 시설에서 성선택계통을 운영

하는 것은 비용면에서 비현실적이다. 두 번째 방법은 생명공학 기술을 이용하는 방법이다. 수컷만 선발하기 위해 지중해과실파리에서는 암컷 특이적 인트론제거 신호를 세균독소단백질에 삽입하여 암컷만 치사시키는 유전자 변이체를 만들었다(Fu et al., 2007). 또 다른 방법으로 지중해과실파리에서는 tetracycline에 감수성인 유전자 변이체를 만들어 암컷 형성을 억제하는 기술을 개발하였다(Ogaugwu et al., 2013). 보다 진보된 개념의 유전자 변이체는 암컷을 치사시키지 않고 수컷으로 성전환시키는 기술이 오리엔탈과실파리에서 시도되었다(Liu et al., 2015). 여러 파리류에서는 transformer (*tra*) 유전자가 성특이적 발현 시스템을 경유하여 암컷으로 성분화하는 인자로 작용하게 된다. 즉, 기본적으로 X, Y 성염색체에 의해 과실파리의 성결정이 이뤄지지만, 여기에 성(性)염색체와 상(狀)염색체의 비율이 성분화에 영향을 주게 된다. 즉, X 성염색체와 상염색체의 비(XX:AA)가 1.0이면 암컷, 0.5 (X:AA)이면 수컷으로 진행되게 된다. 이러한 성결정 신호는 가장 중요한 초기 결정자인 *Sex lethal (sxl)*의 전사체 활성화와 연관된다(Erickson and Quintero, 2007). 즉, 염색체 비가 1.0이면 *sxl* 유전자 발현체가 활성화되어 암컷 특이적으로 *Tra* 유전자의 인트론제거 과정을 유도하게 된다. 인트론이 제거되면 성숙된 mRNA는 올바른 open reading frame을 갖게 되고, 이를 기반으로 정상적 기능을 갖춘 Tra 단백질이 암컷에서만 형성되게 된다(Boggs et al., 1997). Tra 단백질은 Tra-2 단백질과 함께 *doublesex (dsx)*의 암컷 특이적 인트론 제거과정을 유도하여 암컷 특이적 Dsx 단백질이 만들어지고 암컷으로 분화된다(Burtis and Baker, 1989; Hedley and Maniatis, 1991). 만약 이 과정을 교란하게 되면, 이 곤충은 수컷으로 분화하게 된다. Liu et al. (2015)은 오리엔탈과실파리에서 *Tra*와 *Tra-2* 유전자발현을 RNA 간섭으로 억제하여 XX 수컷을 만드는 데 성공하였다. 즉, 암컷을 수컷으로 전환시키는 기술이 개발되어 추후 SIT 용 대량생산체계에 접목시키는 기술로 발전이 기대된다.

**SIT 방제 기술 적용.** 과실파리 곤충들이 수컷 유인물을 이용하여 특이적 집단 교미행동을 보이기 때문에 방사된 불임충과 야외충의 충분한 교류를 기대할 수 있어 SIT 기술이 *Bactrocera* 과실파리류 방제에 높은 효율을 보일 것으로 제시되었다(Benelli et al., 2014, 2015). 하와이와 호주의 과학자들은 북부 마리아나 군도의 Rota 섬에 서식하는 오이과실파리(Steiner et al., 1965a), 호주의 퀸즐랜드과실파리(Andreawartha et al., 1967), 마이크로네시아의 오리엔탈과실파리(Steiner et al., 1970), 하와이의 지중해과실파리(Harris et al., 1986)를 완전박멸하기 위해 SIT 기술을 적용하였다. 이후 캘리포니아와 플로리다에서는 지중해

과실파리를 완전박멸하기 위해 최선의 기술로 SIT를 이용하고 있다. 일본에서는 하와이에서 개발된 기술을 이용하여 오이과 실파리를 방제하는 데 SIT를 이용하였다(Koyama, 1996). 태국의 경우 오리엔탈과실파리를 대상으로 SIT가 80년대 말부터 진행되어 왔다. 태국에서 최초로 SIT가 적용된 지역은 태국의 서부에 위치한 Ratchaburi 현으로 SIT가 실행되기 전에 82%의 과실피해를 주었다. 그러나 SIT 기술이 1987년에 투입되면서 매년 피해를 추세가 30, 26, 21, 18, 17 및 9%로 1988년에서 1993년까지 6년 동안 지속적으로 감소하였다(Aketarawong et al., 2011). 2002년에 제2차 SIT가 Pichi 현에서 2년 동안 이뤄졌으며 방제효과는 높게는 42.9%에서 낮게는 15.5%까지 기록하였다(Orankanok et al., 2007).

### 천적방사 기술

과실파리 방제에 천적 기생충의 투입 전략은 크게 야외밀도 보존(conservation), 고전적 방사(classical release) 및 대량증식 방사(augmentation release)의 세 단계로 적용할 수 있다(Vargas et al., 2008a; Harris et al., 2010). 본 기술의 적용 전략은 전체적으로 IPM 테두리 안에서 GF-120 Fruit Fly Bait와 같은 저위험 살충제 사용과 유살 트랩을 이용한 수컷박멸기술을 병행하면서 천적을 이용한 생물적 방제와 호환을 유지시키는 것이다(Vargas et al., 2008a; Piñero et al., 2009a). 이 프로그램을 통해 유기인계 살충제의 사용을 줄이고 난기생충인 *Fopius arisanus* (Sonan)와 같은 생물적 방제인자를 투입하면서 과실파리류를 경제적 피해수준 이하로 낮추는 데 성공하였다(Vargas et al., 1993, 2012a).

### 경종적 방제 기술

경종적 방제(cultural control)는 과실파리 저항성 품종 이용에서부터 과실 조기수확 및 봉지 씌우기 및 야외 위생처리까지 다양한 접근법이 포함된다(Allwood, 1997; Ekesi and Billah, 2007; Allwood et al., 2015). 과실파리 방제에 있어서 이 경종적 방제 기술은 단백질미끼살포 및 생물적 방제기술 등의 다른 IPM 기술과 협력효과도 기대할 수 있다.

**위생처리 기술.** 야외 위생처리(sanitation)는 피해받은 작물체를 제거 또는 폐기하여 과실파리 유충의 발육을 억제하거나 갓 우화된 성충을 포획하여 이들이 다시 차세대 개체군 형성을 위해 다른 작물로 침입하는 것을 막게 하는 데 방제 목적이 있다(Vargas et al., 2008a). 비록 노동력이 많이 투입되나 과실

파리밀도 억제에 매우 효과적이어서(Liquido, 1991, 1993) 과실파리의 IPM 프로그램의 중요한 요소로 자리잡게 되었다. Piñero et al. (2009b)은 하와이 파파야 과수원에서 포장 위생처리의 방제 효과를 정량적(나무에 달린 과실수) 및 정성적(계급화)으로 평가하는 기법을 개발하였다.

**과실 봉지 씌우기 기술.** 개별 과실을 대상으로 봉지 씌우는(fruit bagging) 단순 작업이 과실파리 피해를 막는 데 효과적이다. 포장재는 일반적으로 신문지와 종이봉투이나 길고 얇은 과실에 대해서는 폴리에틸렌 케이스가 될 수 있다(Vergheese et al., 2004). 이 방제 기술은 또한 과실의 기계적 손상(상처 또는 굽힘)과 곰팡이에 의한 피해도 줄일 수 있었다. 비록 노동력이 많이 투입되지만, 봉지 씌우기는 저렴하고, 안전하며, 처리하기 쉽고, 농민들에게 기대 수확량을 확보하게 하여 주었다.

**천막씌우기 기술.** 소위 천막씌우기(augmentorium) 기술은 과실파리 유충에 의해 피해를 받는 과실과 채소를 텐트로 덮어 주는 방법이다. 미세한 그물망 모양의 텐트는 내부에 과실파리 성충을 가두되, 기생충들의 출입은 허용하게 하는 물리적 구조를 갖는다(Klungness et al., 2005). 천막 씌우기 기술은 포획 기술에 비해 과실파리의 밀도를 낮추는 데 효과적이다(Klungness et al., 2005). 보다 상세한 위생처리 기술 내역은 Jang et al. (2007)에 소개되어 있다. 인도양 Reunion 섬에서 실시된 천막 씌우기 방제처리는 그물망의 크기가 3 mm<sup>2</sup>로 제작하여 오이과 실파리의 성충을 완전히 가두면서 기생충들(*Psytalia fletcheri* (Silvestri), *Fopius arisanus*)의 출입을 허용하게 하였다(Deguine et al., 2011). 따라서 이 기술은 천적을 보호하고 과실파리를 제거하는 데 우수한 효과를 나타냈다.

**토양교란 기술.** 경운(耕耘)과 토양관수처리는 토양교란(soil disturbance)을 통해 과실파리 번데기를 대기에 노출시켜 치사시키는 두 가지 서로 다른 기술이다. Vergheese et al. (2004)은 야외 위생처리 기술로서 3주 간격으로 경운과 쪼갬질하는 것을 IPM의 요소로서 추천하였다. 인도의 망고 재배지에서 실시된 이 프로그램의 효과는 9년 간 지속되었고, 연도별 다소 차이는 있지만 대략 77-100%의 방제효과를 기록하였다.

### 과실파리에 대한 IPM 성공 사례

과실파리 IPM 실시는 단일농가 수준에서 대단위 광역화 수준까지 다양한 규모에서 이뤄졌다. 태평양 군도를 대상으로 *Bactrocera* 과실파리 방제를 위해 경종적 방제기술과 더불어

fipronil 기반 미끼 살포제와 수컷박멸기술을 포함한 종합적 해충군 관리가 실시되었다(Allwood et al., 2002, 2015). 이와 유사하게 하와이에서는 오리엔탈과실파리와 퀸즐랜드과실파리를 방제하기 위해 포장 위생처리기술, 단백질 미끼, 유인제, SIT 및 생물적 방제 기술을 포함하였다(Vargas et al., 2008a). 이 프로그램을 통해 농민들을 위한 많은 기술이 등록되었다. 특히 보다 안전한 단백질 미끼 및 수컷박멸제를 사용하게 하여 대중의 호응을 얻은 “1(위생처리)-2(단백질 미끼)-3(수컷박멸) 접근법”을 개발하여 보급하였다(Mau et al., 2009). 예를 들어, 하와이의 파파야 과수원에 발생한 오리엔탈과실파리를 방제하기 위해 포장 위생처리와 함께 GF-120 NF Naturalyte Fruit Fly Bait 살포는 이 해충의 암컷 밀도 및 과실 피해 정도를 크게 줄였다(Piñero et al., 2009b).

아시아와 아프리카 나라들 또한 일부 주요 해충을 대상으로 효과적 방제 프로그램을 운영하였다. Verghese et al. (2004, 2006)은 인도 지역에 발생한 오리엔탈과실파리를 대상으로 수컷박멸과 포장위생처리 및 델타메스린(deltamethrin) 처리가 azadirachtin과 함께 2 년간 병행하였을 때 높은 방제 효과를 나타냈다. 인도의 망고 과수원에 발생한 오리엔탈과실파리와 *B. zonata* 과실파리를 방제하기 위해 수컷박멸처리, 포장위생처리, 토양관주제(0.1% chlorpyrifos) 그리고 미끼살포제(0.05% malathion+0.2% Protinex)를 포함한 IPM 프로그램을 운영하여 94.5%의 과실파리 방제 효과를 기록하였다(Singh et al., 2013). 그러나 이 종합방제 요소 가운데 화학살충제 처리가 포함된 토양관주제 또는 미끼살포제가 빠지게 되면 방제효과가 크게 줄어 오리엔탈과실파리와 같이 피해 위험성이 높은 해충을 방제하는 데에는 이들 화학처리 기술 요소가 IPM에 반드시 필요하였다.

올리브과실파리(*B. oleae*)는 열대보다는 아열대 기원일지라도 이를 방제하는 방법은 열대종들과 유사하게 다뤄져왔다. 올리브과실파리의 종합관리는 이 해충이 캘리포니아 올리브 재배지에 나타난 직후에 제안되었다(Collier and van Steenwyk, 2003). 산업용 올리브 재배지에서는 다양한 방제 기술이 제안되어 적용되었는데, 이는 생물적 방제인자(*Psytalia humilis* (Silvestri), *P. concolor* (Szepliget), *P. lounsburyi* (Silvestri))의 방사, 경종적 방제기술, 유인치사트랩, GF-120 NF Naturalyte Fruit Fly Bait를 포함하였다. 포장 위생처리는 가장 중요시되는 기술로서 비재배과실을 제거하거나 과실파리 성충에게 수분을 공급할 수 있는 고여있는 물들을 제거하는 것을 추천하였다(Yokoyama, 2015). 유인치사트랩(Magnet OLI, Suterra, Bend OR, USA)을 고정형 유살 트랩으로 사용하였는데 살충제가 포함되어 있어서 이 해충을 방제하는 데 효과적이며 올리브나무

에 처리하는 단백질미끼살포제 처리량을 크게 줄일 수 있었다(Yokoyama, 2014a,b).

미국 본토에서도 과실파리 발생이 간헐적으로 일어난다. 미국 본토에서 진행되는 가장 광범위한 IPM 프로그램이 캘리포니아와 플로리다 지역을 중심으로 약 5,000 km<sup>2</sup>에 걸쳐 진행되고 있다. 가장 주된 기술은 수백만 마리의 불임 지중해과실파리를 방사하는 것이다. 이후 과실파리 가해가 발견되면 과실제거 및 기주 나무를 GF-120으로 처리하는 것으로 보완하게 된다. 동일한 SIT 기술이 또한 *Bactrocera* 과실파리에도 적용된다. 또한 비교적 안전한 spinosad 살충제를 포함하고 있는 Entrust SG를 생물농약형 토양관주제로 추천되었다(Stark et al., 2014).

### 국내 서식하는 *Bactrocera* 해충의 생태와 방제

우리나라에서 Kwon (1985)이 과실파리과에 속한 59 종을 기록하였고, 그 후 미기록 30 종을 추가하여 45 속 89 종이 기록되었다(Han and Kwon, 2000, 2010). 이 중 농업해충으로 중요한 *Bactrocera* 속의 과실파리는 호박과실파리(*B. depressa*)와 호박꽃과실파리(*B. scutellata*) 두 종이 포함되어 있다.

호박과실파리는 1933년 일본에서 최초로 기록되었으며(Shiraki, 1933), 우리나라에서는 1974년 전라남도 광양시 백양산에서 처음으로 채집 기록된 후(Kim and Kim, 1974), 완도군 보길도, 자개도와 강원도 설악산에서 채집이 기록된 바 있다(Kim and Chang, 1982; Kwon, 1985). 농경지에서 경제적 피해는 1990년 전남 곡성지방의 산간 고랭지 수박에서 확인되었다(Han et al., 1994). 우리나라에서 발견된 기주식물은 호박(화초호박, 단호박), 조롱박, 수박, 참외 등이며(Han et al., 1994), 야생의 하늘타리(*Trichosanthes kirilowii*)에서도 흔히 발견된다(Kim et al., 2011). 평균 피해과율은 43.5% (1991~1992 전국조사)로 보고되었으며, 강원도, 전남, 전북, 충북 등의 산간지역에서 피해가 주로 발생하였는데, 표고 300~399 미터 지역에서 발생 빈도수가 가장 높았다(Han et al., 1994). 호박과실파리는 번데기로 토양에서 월동하며 우리나라에서는 연 1 회 발생하는데, 우화최성기는 5 월 하순에서 6 월 상순에 나타나고 보통 7 월 중하순부터 산란흔이 관찰된다(Kang et al., 2008). 성충은 경작지 근처 숲 또는 관목에서 서식하다가 생식연령이 되면 광도가 약해지는 해질 무렵에 교미하고(Kim and Jeon, 2008) 작물 재배지로 침입하여 산란하는데, 알 기간 10 일 내외, 유충 기간은 30 일로 알려져 있으며 산란전 기간은 1 개월 이상 긴 것으로 알려져 있다(Kim and Kim, 2002). 월동번데기가 성충으로 우화하는 데 발육기간은 15°C 에서 59.0 일, 20°C 에서 39.3 일, 25°C 에서 25.8 일, 30°C 에서 21.4 일이었고 35°C 에서 발육하지 못하였

으며, 발육영점온도는 6.8°C, 적산온도는 482.3 일도로 추정되었다(Kang et al., 2008).

호박꽃과실파리는 하늘타리속 식물의 수꽃 봉오리를 먹이 원으로 하기 때문에(Shiraki, 1968) 농업해충으로 크게 취급되지 않았다. 우리나라에서는 Jung (1994)과 Kim and Chang (1982)이 호박꽃과실파리 기초자료를 보고하였으며, Kim et al. (2010)이 호박 암꽃에 30.7%, 수꽃에 53.8%의 피해를 보고함에 따라 호박의 새로운 해충으로서 재평가되고 있다. 우리나라에서 호박꽃과실파리는 7 월 중순에서 8 월 초순과 9 월 상순 두 차례 발생최성기가 나타난다(Kim et al., 2010). 온도발육은 24°C 에서 알 2.3 일, 유충 5.7 일, 번데기 11.6 일이 소요되었으며, 발육영점온도는 각각 12.5, 10.7, 6.3°C 이고 적산온도는 33.2, 118.3, 181.2 일도로 보고되었다(Jeon et al., 2011). 같은 온도에서 성충 수명은 수컷이 128.4 일, 암컷은 126.5 일, 총 산란수는 111.4 개, 내적자연증가율은 0.06이었다(Jeon et al., 2012).

호박꽃과실파리는 Cuelure, ME, GF-120 등 유인제에 잘 유인되는 것으로 보고하였는데(Kim et al., 2010), 반면 Kim et al. (2012)은 Cuelure에만 유인력이 있다고 하였다. 호박과실파리는 아직 특별한 유인제가 알려져 있지 않으나 Brewer hydrolysate (양조용 효모) 및 Torula (효모) 등 단백질 먹이에 유인력(Kim et al., 2010)을 보이고, 휴식기주(roosting host)가 인접한 경우 유인력이 증가하였다(Kim et al., 2012). 트랩 종류에서는 호박과실파리는 McPhail 트랩, 호박꽃과실파리는 끈끈이 트랩에 잘 유인되었다(Kim and Kim, 2002). 또한 호박과실파리 예찰과 관련하여 백색이나 황색 평판 끈끈이 트랩을 지상부 1 미터 위치에 설치하는 방안이 제안되었다(Jeon, 2009). 야외에서 색에 대한 호박과실파리의 유인반응은 색별 차이가 크지 않았고 청색에는 유인효과가 없었으나, 호박꽃과실파리는 황색과 녹색에 유인이 잘 되었다(Kim and Kim, 2002). 실내조건에서 호박과실파리의 색에 대한 유인반응은 진한 녹색 > 연한 녹색 > 황색 > 식물체 순이었으며, 원판보다는 구(球) 형태에 선호도가 높았으나 포장조건에서는 유인력이 없었다(Kim et al., 2011). 실내 환경 조건에서 호박 추출물은 호박과실파리에 우수한 유인반응과 산란유도 반응을 유발하였으나, 포장조건에서 추출물(휘발성분)의 단일성분인 (R)-(+)-limonene, nonyl aldehyde, p-cymene, octyl aldehyde, 2-ethyltoluene, 3-ethyltoluol, cumene 등을 유인제로 사용한 경우 유인되지 않았다(Kim et al., 2012).

방제약제 선발을 위한 실내 토양혼화 처리실험에서 terbufos, ethoprophos, carbofuran 등 입제는 유충에 50~80% 살충률을 보였으며, 번데기에 처리 시 성충이 우화하지 못하였다(Jeon, 2009). 또한 반포장조건에서 GF-120 처리 후 24 시간, spinosad 처리 후 3 일에 100% 사망하였다. 기타 호박과실파리 산란방지

를 위한 봉지 씌우기 재배 등 물리적 방제기술이 제시되었다(NIHHS, 2013).

## 결론

지난 100년간 과실파리에 대한 살충제 처리는 무기화합물, 합성화합물 및 저위험 화합물을 포함하였다(Mangan, 2014). 특별히 미끼살포제는 과실파리 방제시스템에서 주된 요소로 자리 잡아 왔다. 그러나 정치적, 사회적 및 환경 이슈들로 인해 저위험 화합물과 생물농약이 유기인계, 카바메이트계 및 합성 페레스로이드 살충제를 대체하게 되었다(Mangan, 2014). 예를 들어, 미끼 살포제에 사용되는 유기인계 말라치온, MAT 처리에 사용된 naled 그리고 토양처리제인 다이아지논을 대체할 살충제들이 지난 15 년간 개발되어 등록되었다. 이들 제품들은 기존의 유기인계 제품에 비해 비싸지만 *Bactrocera* 과실파리에 대한 광역화 IPM 프로그램에 더 적합하여 경종적 방제와 생물적 방제 인자는 물론이고 미끼살포제와 유인살충제(예, MAT) 처리와 연계하여 방제 프로그램을 운영하게 하였다. 현재 완전한 IPM 프로그램이 과실파리류 방제에 실현되고 있지 않지만, 기존의 합성 살충제가 환경에 미치는 영향을 줄이기 위해서 이러한 새로운 생물농약 및 저위험 화합물과 더불어 새로운 IPM 프로그램의 개발과 확대가 증가할 것으로 기대된다.

국내 박과류에 크게 피해를 주고 있는 호박과실파리는 특이적 유인물질과 대량 사육기술의 부재로 정확한 생태 및 방제 기술 개발이 이뤄지지 않고 있다. 향후 특이적 유인물질의 규명은 다른 *Bactrocera* 속에 속한 곤충류의 특성에 비추어 수컷의 집단교미 행동과 기주식물의 방향물질을 이용하여 동정이 가능할 것으로 본다. 또한 대량 사육기술은 과실파리류의 일반 배지에 이 해충의 특이적 섭식 촉진제를 첨가하여 개발될 수 있을 것으로 추정된다. 이들에 대한 기반 연구 위에서 국내 *Bactrocera* 해충의 관리기술 개발이 가능할 것으로 본다. 또한 이러한 기반 기술 개발 경험은 일반적으로 침입력이 높은 또 다른 *Bactrocera* 해충이 국내에 정착할 경우 이를 퇴치할 수 있는 과학 기술을 축적하는 효과를 얻게 된다.

## 사사

본 종설은 iPET의 수출전략기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

## Literature Cited

- Aketarawong, N., Chinvinijkul, S., Orankanok, W., Guglielmino, C.R., Franz, G., Malacrida, A.R., Thanaphum, S., 2011. The utility of microsatellite DNA markers for the evaluation of area-wide integrated pest management using SIT for the fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel), control programs in Thailand. *Genetica* 139, 129-140.
- Allwood, A.J., 1997. Control strategies for fruit flies (Diptera: Tephritidae) in the South Pacific, in: Allwood, A.J., Drew, R.A.I. (Eds.), *Management of fruit flies in the Pacific. A Regional Symposium*, Nadi, Fiji 28-31 October 1996. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia, pp. 171-178.
- Allwood, A.J., Chinajariyawong, A., Drew, R.A.I., Hamacek, E.L., Hancock, D.L., Hengsawad, C., Jipanin, J.C., Jirasurat, M., Kong Krong, C., Kritsaeneepaiboon, S., Leong, C.T.S., Vijaysegaran, S., 1999. Host plant records for fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Southeast Asia. *Raffles Bull. Zool. Suppl.* 7, 1-92.
- Allwood, A.J., Vueti, E.T., Leblanc, L., Bull, R., 2002. Eradication of introduced *Bactrocera* species (Diptera: Tephritidae) in Nauru using male annihilation and protein bait application techniques, in: Veitch, C.R., Clout, M.N. (Eds.), *Turning the tide: the eradication of invasive species. Proceedings of the international conference on eradication of island invasives*. Auckland, New Zealand. 19-23 February 2001, IUCN Publications Services Unit, Cambridge, UK, pp. 19-25.
- Allwood, A.J., Leblanc, L., Tora Vueti, E., Bull, R., 2015. Fruit fly control methods for Pacific island countries and territories. <http://bem.bime.ntu.edu.tw/clchuang/PAL40>.
- Andrewartha, H.G., Monro, J., Richardson, N.L., 1967. The use of sterile males to control populations of Queensland fruit fly, *Dacus tryoni* (Frogg.) (Diptera: Tephritidae). II. Field experiments in New South Wales. *Aust. J. Zool.* 15, 461-473.
- Bateman, M.A., Insungza, V., Arreta, P., 1973. The eradication of Queensland fruit fly from Easter Island. *FAO Plant Prot. Bull.* 21, 114.
- Benelli, G., 2015. Aggression in Tephritidae flies: Where, when, why? Future directions for research in integrated pest management. *Insects* 6, 38-53.
- Benelli, G., Daane, K.M., Canale, A., Niu, C.-Y., Messing, R.H., Vargas, R.I., 2014. Sexual communication and related behaviours in Tephritidae: current knowledge and potential applications for integrated pest management. *J. Pest Sci.* 87, 385-405.
- Bo, W., Ahmad, S., Dammalage, T., Tomas, U.S., Wornoyayporn, V., Haq, I.U., Caceres, C., Vreysen, M.J.B., Schutze, M.K., 2014. Mating compatibility between *Bactrocera invadens* and *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *J. Econ. Entomol.* 107, 623-629.
- Boggs, R.T., Gregor, P., Idriss, S., Belote, J.M., McKeown, M., 1997. Regulation of sexual differentiation in *D. melanogaster* via alternative splicing of RNA from the transformer gene. *Cell* 50, 739-747.
- Burtis, K.C., Baker, B.S., 1989. *Drosophila* doublesex gene controls somatic sexual differentiation by producing alternatively spliced mRNAs encoding related sex-specific polypeptides. *Cell* 56, 997-1010.
- Chang, C.L., Villalun, M., Geib, S.M., Goodman, C.L., Ringbauer, J., Stanley, D., 2015. Pupal X-ray irradiation influences protein expression in adults of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*. *J. Insect Physiol.* 76, 7-16.
- Chen, M., Chen, P., Ye, H., Yuan, R., Wang, X., Xu, J., 2015. Flight capacity of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) adult females based on flight mill studies and flight muscle ultrastructure. *J. Insect Sci.* 15, 141.
- CDFA (California Department of Food and Agriculture). 2010. *Insect trapping guide*, 12th ed. CDFA, Sacramento, CA, USA.
- Clarke, A.R., Armstrong, K.F., Carmichael, A.E., Milne, J.R., Raghu, S., Roderick, G.K., Yeates, D.K., 2005. Invasive phytophagous pests arising through a recent tropical evolutionary radiation: The *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies. *Annu. Rev. Entomol.* 50, 293-319.
- Clarke, A.R., Powell, K.S., Weldon, C.W., Taylor, P.W., 2011. The ecology of *Bactrocera tryoni* (Diptera: Tephritidae): what do we know to assist pest management? *Ann. Appl. Biol.* 158, 26-54.
- Collier, T.R., van Steenwyk, R.A., 2003. Prospects for integrated control of olive fruit fly are promising in California. *Calif. Agric.* 57, 28-31.
- Crop Protection Compendium (CABI), 2014. <http://www.cabi.org/cpc/>.
- Cunningham, R.T., 1989a. Population detection, in: Robinson, A.S., Hooper, G. (Eds.), *Fruit flies: their biology, natural enemies and control*. Elsevier, Amsterdam, pp. 221-230.
- Cunningham, R.T., 1989b. Pheromones, in: Robinson, A.S., Hooper, G. (Eds.), *Fruit flies: their biology, natural enemies and control*. Elsevier, Amsterdam, pp. 169-173.
- DowElanco, 1994. *Spinosad technical guide*. DowElanco, Indianapolis, IN, USA.
- Deguine, J.P., Atiama-Nurbel, T., Quilici, S., 2011. Net choice is key to the augmentorium technique of fruit fly sequestration and parasitoid release. *Crop Prot.* 30, 198-202.
- DFFAP (Dacine Fruit Flies of the Asia-Pacific), 2015. <http://www.herbarium.hawaii.edu/fruitfly>.
- Drew, R.A.I., 1989. The tropical fruit flies (Diptera: Tephritidae: Dacinae) of the Australasian and Oceanian regions. *Mem. Queensl. Mus.* 26, 1-521.
- Drew, R.A.I., Hancock, D.L., 1994. The *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies (Diptera: Tephritidae: Dacinae) in Asia. *Bull. Entomol. Res.* 84(Suppl. S2), 1-68.
- Drew, R.A.I., Hancock, D.L., 2000. Phylogeny of the Tribe Dacini

- (Dacinae) based on morphological, distributional, and biological data, in: Aluja, M., Norrbom A.L. (Eds.), Fruit flies (Tephritidae): phylogeny and evolution of behavior. CRC, Boca Raton, FL, pp. 491-504.
- Drew, R.A.I., Romig, M.C., 2013. Tropical fruit flies of South-East Asia. CAB International, Wallingford, UK.
- Drew, R., Tsuruta, K., White, I., 2005. A new species of pest fruit fly (Diptera: Tephritidae: Dacinae) from Sri Lanka and Africa. *Afr. Entomol.* 13, 149-154.
- Ekesi, S., Billah, M.K., 2007. A Field Guide to the Management of Economically Important Tephritid Fruit Flies in Africa. ICIPE Science Press, Nairobi, Kenya.
- Erickson, J.W., Quintero, J.J., 2007. Indirect effects of ploidy suggest X chromosome dose, not the X:A ratio, signals sex in *Drosophila*. *PLoS Biol.* 5, e332.
- FDACS (Florida Department of Agriculture and Consumers Services). 2004. Florida fruit fly detection manual. Division of Plant Industry, FDACS, Gainesville, FL, USA.
- Friedrich, H., 1976. Phenylpropanoid constituents of essential oils. *Lloydia* 39, 1-7.
- Fu, G., Condon, K.C., Epton, M.J., Gong, P., Jin, L., Condon, G.C., Morrison, N.I., Dafa'alla, T.H., Alphey, L., 2007. Female-specific insect lethality engineered using alternative splicing. *Nat. Biotechnol.* 25, 353-357.
- Han, M.J., Lee, S.H., Ahn, S.B., Choi, J.Y., Choi, K.M., 1994. Distribution, damage and host plants of pumpkin fruit fly, *Paradacus depressa* (Shiraki). *RDA J. Agri. Sci.* 36, 346-350.
- Han, H.Y., Kwon, Y.J., 2010. A list of North Korean Tephritoid species (Diptera: Tephritoidea) deposited in the Hungarian Natural History Museum. *Kor. J. Syst. Zool.* 26, 251-260.
- Han, H.Y., Kwon, Y.J., 2000. Economic insects of Korea 3 (Diptera: Tephritidae). *Insecta Koreana Sup.* 10, 113.
- Hancock, D.L., Hamacek, E.L., Lloyd, A.C., Elson-Harris, M.M., 2000. The Distribution and host plants of fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Australia. Queensland Department of Primary Industries, Brisbane, Queensland, Australia. pp. 1-75.
- Harris, E.J., Cunningham, R.T., Tanaka, N., Ohinata, K., Schroeder, W.J., 1986. Development of the sterile-insect technique on the Island of Lanai, Hawaii for suppression of the Mediterranean fruit fly. *Proc. Hawaii. Entomol. Soc.* 26, 77-88.
- Harris, E.J., Bautista, R.C., Vargas, R.I., Jang, E.B., Eitam, A., Leblanc, L., 2010. Suppression of melon fly (Diptera: Tephritidae) populations with releases of *Fopius arisanus* and *Psytallia fletcheri* (Hymenoptera: Braconidae) in North Shore Oahu, HI, USA. *Biocontrol* 55, 593-599.
- Hee, A.K.W., Tan, K.H., 1998. Attraction of female and male *Bactrocera papayae* to conspecific males fed with methyl eugenol and attraction of females to male sex pheromone components. *J. Chem. Ecol.* 24, 753-764.
- Hee, A.K.W., Tan, K.H., 2004. Male sex pheromonal components derived from methyl eugenol in the hemolymph of the fruit fly *Bactrocera papayae*. *J. Chem. Ecol.* 30, 2127-2138.
- Hedley, M.L., Maniatis, T., 1991. Sex-specific splicing and polyadenylation of dsx pre-mRNA requires a sequence that binds specifically to tra-2 protein *in vitro*. *Cell* 65, 579-586.
- Howlett, F.M., 1912. The effect of citronella oil in two species of *Dacus*. *Trans. Entomol. Soc. Lond.* 60, 412-418.
- Howlett, F.M., 1915. Chemical reactions of fruit flies. *Bull. Entomol. Res.* 6, 297-305.
- Hu, J., Chen, B., Li, Z., 2014. Thermal plasticity is related to the hardening response of heat shock protein expression in two *Bactrocera* fruit flies. *J. Insect Physiol.* 67, 105-113.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2003. Trapping guidelines for area-wide fruit fly programmes. IAEA, Vienna, Australia.
- Jang, E.B., Klungness, L.M., McQuate, G., 2007. Extension of the use of Augmentoria for Sanitation in a cropping system susceptible to the alien tephritid fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Hawaii. *J. Appl. Sci. Environ. Manag.* 11, 239-248.
- Jeon, H.Y., 2009. Population phenology and developing management system for pumpkin fruit fly, *Bactrocera depressa* (Diptera: Tephritidae), in pumpkin fields. Final Report of RDA Research Project. 116 pp. No. 11-1390000-00226-01.
- Jeon, S.W., Cho, M.R., Kim, Y.P., Lee, S.G., Lee, J.J., Kim, S.H., Yu, J., Hwang, C.Y., 2011. Temperature-dependent development model of the striped fruit fly, *Bactrocera scutellata* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Kor. J. Appl. Entomol.* 50, 373-378.
- Jeon, S.W., Kang, T.J., Cho, M.R., Kim, K.H., Lee, S.G., Kim, J.S., Park, H.W., 2012. Adult longevity and life table analysis of striped fruit fly, *Bactrocera scutellata* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Kor. J. Appl. Entomol.* 51, 485-488.
- Jung, H.K. 1994. Check list of insects from Korea. Konkuk Univ. press. 744 pp.
- Kang, T.J., Kim, H.H., Kim Jeon, H.Y., Yang, C.Y., Kim, D.S., 2008. Population phenology and an early season adult emergence model of pumpkin fruit fly, *Bactrocera depressa* (Diptera: Tephritidae). *Kor. J. Agric. For. Meteor.* 47, 407-411.
- Khoo, C.C.H., Yuen, K.H., Tan, K.H., 2000. Attraction of female *Bactrocera papayae* to sex pheromone components with two different release devices. *J. Chem. Ecol.* 26, 2487-2496.
- Kim, C.W., Kim, J.L., 1974. Insect fauna of national park, Mt. Naegang-san in summer season. *Rep. Kor. Cons. Nat.* 8, 85-126.
- Kim, D.S., Kang, T.J., Jeon, H.Y., 2011. A preliminary study for the visual response of *Bactrocera depressa* (Tephritidae : Diptera) in the laboratory environment. *J. Subtrop. Agri. Biotechnol.* 27, 39-44.
- Kim, D.S., Jang, Y.S., Choi, K.S., Kang, T.J., Jeon, H.Y., 2012. Olfactory responses of *Bactrocera depressa* (Diptera: Tephritidae) in the field and laboratory. *J. Subtrop. Agri. Biotechnol.* 28, 33-44.

- Kim, J.I., Chang, K.S., 1982. On the summer seasonal insects from the group of Soan island, Wando-kun. Rep. Survey Nat. Environ. Korea. 2, 161-184.
- Kim, T.H., Jeon, S.W., 2008. Mating behavior of the pumpkin fruit fly [*Bactrocera (Paradacus) depressa* (Shiraki)] in a field cage. Kor. J. Appl. Entomol. 47, 487-490.
- Kim, T.H., Kim, J.S., 2002. Annual occurrence and bionomics of the pumpkin fruit fly [*Bactrocera (Paradacus) depressa* Shiraki]. Kor. J. Soil Zool. 7, 1-5.
- Kim, Y.P., Jeon, S.W., Lee, S.G., Choi, N.J., Hwang, C.H., 2010. Seasonal occurrence and damage of *Bactrocera scutellata* (Diptera: Tephritidae) in Jeonbuk province. Kor. J. Appl. Entomol. 49, 299-304.
- Klungness, L.M., Jang, E.B., Mau, R.F.L., Vargas, R.I., Sugano, J.S., Fujitani, E., 2005. New sanitation techniques for controlling tephritid fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Hawaii. J. Appl. Sci. Environ. Mgt. 9, 4-14.
- Knipling, E., 1955. Possibilities of insect control or eradication through use of sexually sterile males. J. Econ. Entomol. 48, 459-462.
- Kogan, M., Bajwa, W.I., 1999. Integrated pest management: A global reality? Ann. Soc. Entomol. Brasil. 28, 1-25.
- Koyama, J., 1996. Eradication of the melon fly, *Bactrocera cucurbitae* by the sterile insect technique in Japan. Proceedings of IAEA training course on the use of sterile insect and related techniques for the area-wide management of insect pests, Gainesville, FL, USA.
- Koyama, J., Tadashi, T., Kenji, T., 1984. Eradication of the oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) from Okinawa Islands by male annihilation method. J. Econ. Entomol. 77, 468-472.
- Kwon, Y.J., 1985. Classification of fruitfly-pest from Korea. Insecta Koreana 5, 49-112.
- Leblanc, L., Tora Vueti, E., Drew, R.A.I., Allwood, A.J., 2012. Host plant records for fruit flies (Diptera: Tephritidae: Dacini) in the Pacific Islands. Proc. Hawaiian Entomol. Soc. 44, 11-53.
- Leblanc, L., Vargas, R.I., Mackey, B., Putoa, R., Piñero, J.C., 2011. Evaluation of cue-lure and methyl eugenol solid lure and insecticide dispensers for fruit fly (Diptera: Tephritidae) monitoring and control in Tahiti. Fla. Entomol. 94, 510-516.
- Leblanc, L., Vueti, E.T., Allwood, A.J., 2013. Host plant records for fruit flies (Diptera: Tephritidae: Dacini) in the Pacific Islands: 2. Infestation statistics on economic hosts. Proc. Hawaiian Entomol. Soc. 45, 83-117.
- Liquido, N.J., 1991. Fruit on the ground as a reservoir of resident melon fly (Diptera: Tephritidae) population in Papaya orchards. Environ. Entomol. 20, 620-625.
- Liquido, N.J., 1993. Reduction of Oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) populations in papaya orchards by field sanitation. J. Agric. Entomol. 10, 163-170.
- Liu, G., Wu, Q., Li, J., Zhang, G., Wan, F., 2015. RNAi-mediated knockdown of transformer and transformer 2 to generate male-only progeny in the Oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). PLoS ONE 10, e0128892.
- Luo, Z.X., Ren, L.L., Qi, L.Y., Zhou, S.D., Dai, H.G., 2009. Effects of temperature on the development of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) population. Chin. J. Ecol. 28, 921-924.
- Mangan, R.L., 2014. Priorities in formulation and activity of adulticidal insecticide bait sprays for fruit flies, in: Shelly T., Epsky N., Jang E.B., Reyes-Flores J., Vargas R. (Eds.), Trapping tephritid fruit flies. Lures, area-wide programs, and trade implications. Springer, Berlin, Germany, pp. 423-456.
- Manoukis, N.C., Siderhurst, M., Jang, E.B., 2015. Field estimates of attraction of *Ceratitis capitata* to trimedlure and *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) to methyl eugenol in varying environments. Environ. Entomol. 44, 695-703.
- Mastrangelo, T., Parker, A.G., Jessup, A., Pereira, R., Orozco-Dvila, D., Islam, A., Dammalage, T., Walder, J.M.M., 2010. A new generation of X ray irradiators for insect sterilization. J. Econ. Entomol. 103, 85-94.
- Mau, R.F.L., Vargas, R.I., Jang, E.B., Wong, L., 2009. Hawaii area-wide fruit fly integrated pest management program: a model system. College of Tropical Agriculture and Human Resources, Honolulu, HI, USA.
- McInnis, D., Leblanc, L., Mau, R., 2007. Melon fly (Diptera: Tephritidae) genetic sexing: all-male sterile fly releases in Hawaii. Proc. Hawaiian Entomol. Soc. 39, 105-110.
- Metcalfe, R.L., 1979. Plants, chemicals and insects. Some aspects of coevolution. Bull. Entomol. Soc. Am. 25, 30-35.
- Metcalfe, R.L., Metcalfe, E.R., 1992. Fruit flies of the family Tephritidae, in: Metcalfe, R.L., Metcalfe, E.R. (Eds.), Plant kairomones in insect ecology and control. Routledge, Chapman & Hall Inc., New York, NY, pp. 139-152.
- Moreno, D.S., Mangan, R.L., 1995. Responses of the Mexican fruit fly (Diptera: Tephritidae) to two hydrolyzed proteins and incorporation of phloxine B to kill adults, in: Heitz, J.R., Downum, K.R. (Eds.), Light activated pest control. ACS Symposium Series, Washington, DC, USA. pp. 257-279.
- Mwatawala, M.W., DeMeyer, M., Makundi, R.H., Maerere, A.P., 2009. Host range and distribution of fruit-infesting pestiferous fruit flies (Diptera, Tephritidae) in selected areas of Central Tanzania. Bull. Entomol. Res. 99, 629-641.
- NIHHS (National Institute of Horticultural and Herbal Science), 2013. Annual report for horticulture and herbal research. NIHHS, RDA. 182 pp. No. 11-1390804-000054-10.
- Nishida, R., Fukami, H., 1990. Sequestration of distasteful compounds by some pharmacophagous insects. J. Chem. Ecol. 16, 151-164.
- Nishida, R., Tan, K.H., Serit, M., Lajis, N.H., Sukari, A.M., Takahashi, S., Fukami, H., 1988. Accumulation of phenylpropanoids in the rectal glands of males of the Oriental fruit fly,

- Dacus dorsalis*. *Experientia* 44, 534-536.
- Nishida, T., Bess, H.A., Ota, A., 1957. Comparative effectiveness of malathion and malathion-yeast hydrolysate bait sprays for control of the melon fly. *J. Econ. Entomol.* 50, 680-684.
- Ogaugwu, C.E., Schetelig, M.F., Wimmer, E.A., 2013. Transgenic sexing system for *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) based on female-specific embryonic lethality. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 43, 1-8.
- Orankanok, W., Chinvinijkul, S., Thanaphum, S., Sittilob, P., Enkerlin, W.R., 2007. Area-wide integrated control of oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* and guava fruit fly *Bactrocera correcta* in Thailand, in: Vreysan, M.J.B, Hendrichs, J., Robinson, A.S. (Eds.), *Area-wide control of insect pests: from research to field implementation*. Springer, Dordrecht, pp. 571-526.
- Papadopoulos, N.T., Plant, R.E., Carey, J.R., 2013. From trickle to flood: The large-scale, cryptic invasion of California by tropical fruit flies. *Proc. R. Soc. Series B.* 280, 20131466.
- Peck, S.L., McQuate, G.T., 2000. Field tests of environmentally friendly malathion replacements to suppress wild Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) populations. *J. Econ. Entomol.* 93, 280-289.
- Pedigo, L.P., Rice, M., 2008. *Entomology and pest management*. 6th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Perkins, M.V., Fletcher, M.T., Kitching, W., Drew, R.A.I., Moore, C.J., 1990. Chemical studies of the rectal gland secretions of some species of *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies (Diptera: Tephritidae). *J. Chem. Ecol.* 16, 2475-2487.
- Piñero, J.C., Mau, R.F.L., McQuate, G.T., Vargas, R.I., 2009a. Novel bait stations for attract-and-kill of pestiferous fruit flies. *Entomol. Exp. Appl.* 133, 208-216.
- Piñero, J.C., Mau, R.F.L., Vargas, R.I., 2009b. Managing oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) with spinosad-based protein bait sprays and sanitation in papaya orchards in Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 102, 1123-1132.
- Prokopy, R.J., Papaj, D.R., Hendrichs, J., Wong, T.T.Y., 1992. Behavioral responses of *Ceratitis capitata* flies to bait spray droplets and natural food. *Entomol. Exp. Appl.* 64, 247-257.
- Prokopy, R.J., Miller, N.W., Piñero, J.C., Barry, J.D., Tran, L.C., Oride, L., Vargas, R.I., 2003. Effectiveness of GF-120 fruit fly bait spray applied to border area plants for control of melon flies (Diptera: Tephritidae). *J. Econ. Entomol.* 96, 1485-1493.
- Raghu, S., 2004. Functional significance of phytochemical lures to dacine fruit flies (Diptera: Tephritidae): an ecological and evolutionary synthesis. *Bull. Entomol. Res.* 94, 385-399.
- Redón, P., McInnis, D., Lance, D., Stewart, J., 2004. Medfly (Diptera: Tephritidae) genetic sexing: large-scale field comparison of males-only and bisexual sterile fly releases in Guatemala. *J. Econ. Entomol.* 97, 1547-1553.
- Roessler, Y., 1989. Insecticidal bait and cover spray, in: Robinson, A.S., Hooper, G. (Eds.), *Fruit flies, their biology, natural enemies and control*. Vol. 3A. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 329-335.
- Rousse, P., Harris, E.J., Quilici, S., 2005. *Fopius arisanus*, an egg-pupal parasitoid of Tephritidae. Overview. *Biocontrol News Inform.* 26, 59N-69N.
- Schutze, M.K., Aketarawong, N., Amornsak, W., Armstrong, K., Augustinos, A.A., Barr, N., Bo, W., Bourtzis, K., Boykin, L.M., Cáceres, C., Cameron, S.L., Chapman, T.A., Chinvinijkul, S., Chomic, A., de Meyer, M., Drosopoulou, E., Englezou, A., Ekesi, S., Gariou-Papalexiou, A., Geib, S.M., Hailstones, D., Hasanuzzaman, M., Haymer, D., Hee, A.K.W., Hendrichs, J., Jessup, A., Ji, Q., Khamis, F.M., Krosch, M.N., Leblanc, L., Mahmood, K., Malacrida, A.R., Mavragani-Tsipidou, P., Mwatawala, M., Nishida, R., Ono, H., Reyes, J., Rubinoff, D., Sanjose, M., Shelly, T.E., Srichachar, S., Tan, K., Thannaphum, S., Haq, I., Vijaysegaran, S., Wee, S.L., Yesmin, F., Zacharopoulou, A., Clarke, A.R., 2015. Synonymization of key pest species within the *Bactrocera dorsalis* species complex (Diptera: Tephritidae): taxonomic changes based on 20 years of integrative morphological, molecular, cytogenetic, behavioral, and chemoecological data. *Syst. Entomol.* 40, 456-473.
- Shelly, T.E., 2000. Flower-feeding effects mating performance in male oriental fruit flies *Bactrocera dorsalis*. *Ecol. Entomol.* 25, 109-114.
- Shelly, T.E., Edu, J., McInnis, D., 2010. Pre-release consumption of methyl eugenol increases the mating competitiveness of sterile males of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*, in large field enclosures. *J. Insect Sci.* 10, 8.
- Shelly, T.E., Nishimoto, J., Kurashima, R., 2012. Captures of three economically important fruit fly species (Diptera: Tephritidae) in traps baited with liquid versus solid formulations of male lures in a Hawaiian coffee field. *J. Econ. Entomol.* 105, 1186-1193.
- Shiraki, T., 1933. *A systematic study of Trypetidae in the Japanese empire*. Memoirs of the Faculty of Science and Agriculture. Taihoku Imperial University 8, 90-91.
- Shiraki, T., 1968. *Fruit flies of the Ryukyu islands*. United States National Museum Bulletin 263 pp.
- Singh, M., Gupta, D., Gupta, P.R., 2013. Population suppression of fruit flies (*Bactrocera* spp.) in mango (*Mangifera indica*) orchards. *Indian J. Agric. Sci.* 83, 1064-1068.
- Stark, J.D., Vargas, R., 2009. An Evaluation of alternative insecticides to diazinon for control of tephritid fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Soil. *J. Econ. Entomol.* 102, 139-143.
- Stark, J.D., Vargas, R.I., Miller, N.W., 2004. Toxicity of spinosad in protein bait to three economically important tephritid fruit fly species (Diptera: Tephritidae) and their parasitoids (Hymenoptera: Braconidae). *J. Econ. Entomol.* 97, 911-915.
- Stark, J.D., Vargas, R.I., Souder, S., Fox, A.J., Smith, T.R., Mackey, B., 2013. A Comparison of the bioinsecticide, spinosad, the semi-synthetic insecticide, spinetoram and synthetic insecticides



- as soil drenches for control of tephritid fruit flies. *Biopestic. Int.* 9, 120-126.
- Stark, J.D., Vargas, R.I., Souder, S.K., Fox, A.J., Smith, T.R., Leblanc, L., Mackey, B., 2014. Simulated field applications of insecticide soil drenches for control of tephritid fruit flies. *Biopestic. Int.* 10, 136-142.
- Steiner, L.F., 1952. Methyl eugenol as an attractant for oriental fruit fly. *J. Econ. Entomol.* 45, 241-248.
- Steiner, L.F., 1957. Field evaluation of oriental fruit fly insecticides in Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 50, 16-24.
- Steiner, L.F., Lee, R.K.S., 1955. Large area tests of a male-annihilation method for oriental fruit fly control. *J. Econ. Entomol.* 48, 311-317.
- Steiner, L.F., Rohwer, G.G., Ayers, E.L., Christenson, L.D., 1961. The role of attractants in the recent Mediterranean fruit fly eradication program in Florida. *J. Econ. Entomol.* 54, 30-35.
- Steiner, L.F., Harris, E.J., Mitchell, W.C., Fujimoto, M.S., Christenson, L.D., 1965a. Melon fly eradication by overflooding with sterile flies. *J. Econ. Entomol.* 58, 519-521.
- Steiner, L.F., Mitchell, W.C., Harris, E.J., Kozuma, T.T., Fujimoto, M.S., 1965b. Oriental fruit fly eradication by male annihilation. *J. Econ. Entomol.* 58, 961-964.
- Steiner, L.F., Hart, W.G., Harris, E.J., Cunningham, R.T., Ohinata, K., Kamakahi, D.C., 1970. Eradication of the oriental fruit fly from the Mariana Islands by the methods of male annihilation and sterile insect release. *J. Econ. Entomol.* 63, 131-135.
- Suckling, D.M., Kean, J.M., Stringer, L.D., Caceres-Barrios, C., Hendrichs, J., Reyes-Flores, J., 2016. Eradication of tephritid fruit fly pest populations: Outcomes and prospects. *Pest Manag. Sci.* 72, 456-465.
- Tan, K.H., 2000. Sex pheromone components in defense of melon fly, *Bactrocera cucurbitae* against Asian house gecko, *Hemidactylus frenatus*. *J. Chem. Ecol.* 26, 697-704.
- Tan, K.H., Nishida, R., 1998. Ecological significance of male attractant in the defence and mating strategies of the fruit fly, *Bactrocera papayae*. *Entomol. Exp. Appl.* 89, 155-158.
- Vargas, R.I., Stark, J.D., Uchida, G., Purcell, M., 1993. Opiine parasitoids (Hymenoptera, Braconidae) of oriental fruit-fly (Diptera, Tephritidae) on Kauai Island, Hawaii: islandwide relative abundance and parasitism rates in wild and orchard guava habitats. *Environ. Entomol.* 22, 246-253.
- Vargas, R.I., Stark, J.D., Kido, M.H., Ketter, H.M., Whitehand, L.C., 2000. Methyl eugenol and cue-lure traps for suppression of male oriental fruit flies and melon flies (Diptera: Tephritidae) in Hawaii: effects of lure mixtures and weathering. *J. Econ. Entomol.* 93, 81-87.
- Vargas, R.I., Miller, N.W., Prokopy, R.J., 2002. Attraction and feeding responses of Mediterranean fruit fly and a natural enemy to protein baits laced with two novel toxins, Phloxine B and Spinosad. *Entomol. Exp. Appl.* 102, 273-282.
- Vargas, R.I., Leblanc, L., Putoa, R., Eitam, A., 2007. Impact of introduction of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) and classical biological control releases of *Fopius arisanus* (Hymenoptera: Braconidae) on economically important fruit flies in French Polynesia. *J. Econ. Entomol.* 100, 670-679.
- Vargas, R.I., Mau, R.F.L., Jang, E.B., Faust, R.M., Wong, L., 2008a. The Hawaii fruit fly areawide pest management programme, in: Koul, O., Cuperus, G. (Eds.), *Areawide pest management: theory and implementation*. CABI, London, UK, pp. 300-325.
- Vargas, R.I., Stark, J.D., Hertlein, M., Mafra-Neto, A., Coler, R., Piñero, J.C., 2008b. Evaluation of SPLAT with spinosad and methyl eugenol or cue-lure for "attract-and-kill" of oriental and melon fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 101, 750-768.
- Vargas, R.I., Burns, R.E., Mau, R.F.L., Stark, J.D., Cook, P., Pinero, J.C., 2009a. Captures in methyl eugenol and cue-lure detection traps with and without insecticides and with a Farma Tech solid lure and insecticide dispenser. *J. Econ. Entomol.* 102, 552-557.
- Vargas, R.I., Piñero, J.C., Mau, R.F.L., Stark, J.D., Hertlein, M., Mafra-Neto, A., Coler, R., Getchell, A., 2009b. Attraction and mortality of oriental fruit flies (Diptera: Tephritidae) to SPLAT-MAT-methyl eugenol with spinosad. *Entomol. Exp. Appl.* 131, 286-293.
- Vargas, R.I., Mau, R.F.L., Stark, J.D., Piñero, J.C., Leblanc, L., Souder, S.K., 2010a. Evaluation of methyl eugenol and cue-lure traps with solid lure and insecticide dispensers for fruit fly monitoring and male annihilation in the Hawaii areawide pest management program. *J. Econ. Entomol.* 103, 409-415.
- Vargas, R.I., Piñero, J.C., Mau, R.F.L., Jang, E.B., Klungness, L.M., McInnis, D.O., Harris, E.B., McQuate, G.T., Bautista, R.C., Wong, L., 2010b. Area-wide suppression of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*, and the Oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*, in Kamuela, Hawaii. *J. Insect Sci.* 10, 135.
- Vargas, R.I., Shelly, T.E., Leblanc, L., Pinero, J.C., 2010c. Recent advances in methyl eugenol and cue-lure technologies for fruit fly detection, monitoring and control, in: Litwack, G. (Ed.), *Vitamins and hormones, section: pheromones*, Vol. 83, Academic Press, Burlington, pp. 575-596.
- Vargas, R.I., Leblanc, L., Harris, E.J., Manoukis, N.C., 2012a. Regional suppression of *Bactrocera* fruit flies (Diptera: Tephritidae) in the Pacific through biological control and prospects for future introductions into other areas of the world. *Insects* 3, 727-742.
- Vargas, R.I., Souder, S.K., Mackey, B., Cook, P.J., Morse, J.G., Stark, J.D., 2012b. Field trials of solid triple lure (trimedlure, methyl eugenol, raspberry ketone, and DDVP) dispensers for detection and male annihilation of *Ceratitis capitata* (Wiedemann), *Bactrocera dorsalis* (Hendel) and *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae) in Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 105, 1557-1565.

- Vargas, R.I., Leblanc, L., Piñero, J.C., Hoffman, K.M., 2014a. Male annihilation, past, present, and future, in: Shelly, T., Epsky, N., Jang, E.B., Reyes-Flores, J., Vargas, R. (Eds.), Trapping tephritid fruit flies. Lures, area-wide programs, and trade implications. Springer, Berlin, Germany, pp. 493-511.
- Vargas, R.I., Souder, S.K., Borges, R., Mafra-Neto, A., Mackey, B., Chou, M.Y., Spafford H., 2014b. Effectiveness of a sprayable male annihilation treatment with a biopesticide against fruit flies (Diptera: Tephritidae) attacking tropical fruits. *Biopest. Int.* 10, 1-10.
- Vargas, R.I., Souder, S.K., Hoffman, K., Mercogliano, J., Smith, T.R., Hammond, J.H., Davis, B.J., Brodie, M., Dripps, J.E., 2014c. Attraction and mortality of *Bactrocera dorsalis* to STATIC™ Spinosad ME weathered under operational conditions in California and Florida: a reduced-risk male annihilation treatment. *J. Econ. Entomol.* 107, 1362-1369.
- Vargas, R.I., Pinero, J.C., Leblanc L., 2015a. An overview of pest species of *Bactrocera* fruit flies (Diptera: Tephritidae) and the integration of biopesticides with other biological approaches for their management with a focus on the Pacific region. *Insects* 6, 297-318.
- Vargas, R.I., Souder, S.K., Nkomo, E., Cook, P.J., Mackey, B., Stark, J.D., 2015b. Weathering and chemical degradation of methyl eugenol and raspberry ketone solid dispensers for detection, monitoring, and male annihilation of *Bactrocera dorsalis* and *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae) in Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 108, 1612-1623.
- Verghese, A., Tandon, P.L., Stonehouse, J.M., 2004. Economic evaluation of the integrated management of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) in mango in India. *Crop Prot.* 23, 61-63.
- Verghese, A., Sreedevi, K., Nagaraju, D.K., 2006. Pre and post-harvest IPM for the mango fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). Proceedings of the 7th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, Salvador, Brazil, pp. 179-182.
- Wang, J., Zeng, L., Han, Z., 2014. An assessment of cold hardiness and biochemical adaptations for cold tolerance among different geographical populations of the *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) in China. *J. Insect Sci.* 14, 292.
- Wee, S.L., Hee, A.K.W., Tan, K.H., 2002. Comparative sensitivity to and consumption of methyl eugenol in three *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) complex sibling species. *Chemoecology* 12, 193-197.
- Wee, S.L., Tan, K.H., 2005. Evidence of natural hybridization between two sympatric sibling species of *Bactrocera dorsalis* complex based on pheromone analysis. *J. Chem. Ecol.* 31, 845-858.
- White, I.M., 2006. Taxonomy of the Dacina (Diptera: Tephritidae) of Africa and the Middle East. Entomological Society of Southern Africa, Hatfield, South Africa.
- White, I.M., Elson-Harris, M.M., 1992. Fruit flies of economic significance: their identification and bionomics. CABI International, Wallingford, UK.
- Yamada, H., Parker, A.G., Oliva, C.F., Balestrino, F., Gilles, J.R.L., 2014. X-ray-induced sterility in *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) and male longevity following irradiation. *J. Med. Entomol.* 51, 811-816.
- Yan, Q.T., 1984. Study on *Dacus dorsalis* Hendel (Diptera: Trypetidae) on Okinawa. *Chin. J. Entomol.* (Taiwan) 4, 107-120.
- Yokoyama, V.Y., 2014a. Olive fruit fly adult response to attract-and-kill traps in greenhouse cage tests with weathered bait spray and in a commercial table olive orchard. *J. Asia Pac. Entomol.* 17, 717-721.
- Yokoyama, V.Y., 2014b. Response of olive fruit fly, *Bactrocera oleae*, to an attract and kill trap in greenhouse cage tests. *J. Insect Sci.* 14, 1-5.
- Yokoyama, V.Y., 2015. Olive fruit fly (Diptera: Tephritidae) in California: invasion, distribution, and management implications. *J. Int. Pest Manag.* 6, 14.
- Zhu, Y.I., Qiu, H.T., 1989. The reestablishment of *Dacus dorsalis* Hendel (Diptera: Tephritidae) after flee eradication on Lanbay Island. *J. Econ. Entomol.* 9, 217-230.