

Etofenprox저항성 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae*)의 thiamethoxam과 fenpropathrin에 대한 섭식행동 관찰

조창욱 · 박초롱 · 윤규식 · 강민아 · 권혜리 · 석희봉 · 강은진 · 서미자 · 유용만 · 윤영남*

충남대학교 농업생명과학대학 응용생물학과

Feeding Behavior of Etofenprox Resistant Green Peach Aphid (*Myzus persicae*) against Thiamethoxam and Fenpropathrin

Chang Wook Jo, Cho Rong Park, Kyu Sik Yoon, Min A Kang, Hae Ri Kwon, Hee Bong Seok, Eun Jin Kang, Mi Ja Seo, Yong Man Yu and Young Nam Youn*

Dept. Applied Biology, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon, 305-764

ABSTRACT : To investigate resistance of *Myzus persicae*, which is resistant to etofenprox belonging to pyrethroids, to other insecticides, fenpropathrin and thiamethoxam, mortality and LC₅₀ values for these two insecticides against the etofenprox-resistant and -susceptible populations were obtained and EPG analysis for feeding behaviors of thiamethoxam or fenpropathrin treated and non-treated *M. persicae* was conducted. For fenpropathrin, mortality after 48 h treatment was 28 and 29%, respectively for the resistant and susceptible population. The LC₅₀ value was 193.15 and 93.46 ppm, respectively. For thiamethoxam, mortality after 48 h treatment was 87 and 57%, respectively for the resistant and susceptible population. The LC₅₀ value was 3.17 and 30.34 ppm, respectively. There was no significant difference in feeding behavior between fenproprathrin treated and non-treated *M. persicae*. They showed a continuous feeding pattern. However, contact signal frequency increased in the thiamethoxam treated *M. persicae* 1 hour after treatment and significant difference was shown.

KEY WORDS : *Myzus persicae*, EPG, etofenprox, fenpropathrin, thiamethoxam

초 록 : 피레스로이드계에 속하는 etofenprox에 대하여 저항성과 감수성을 띠는 복숭아혹진딧물이 다른 살충제에 대한 저항성 여부를 살충제 처리 및 EPG 기술을 이용하여 비교하였다. Fenpropathrin에 대한 두 개체군간의 살충율을 비교하기 위하여 추천농도(50ppm)로 처리는 48시간 후, 저항성 개체군은 28%, 감수성 개체군은 29%의 살충 활성을 보여주었고 LC₅₀ 값은 저항성 개체군이 193.15 ppm 감수성 개체군이 93.46 ppm이었다. Thiamethoxam의 추천농도(100 ppm)로 처리한 결과 48시간 후, 저항성 개체군은 57%, 감수성 개체군은 79%의 살충활성을 보여주었고, LC₅₀ 값은 저항성 개체군이 3.17 ppm 감수성 개체군이 30.34 ppm이었다. 두 개체군의 살충제에 노출시킨 후, 섭식 행동을 알아보기 위하여 EPG 기술을 이용하여 살충제 처리 전과 후로 나누어 섭식행동을 관찰하였다. Thiamethoxam과 fenpropathrin 모두 복숭아혹진딧물 두 개체군간에 조사한 섭식행동패턴 모두에 있어 큰 차이를 나타내지 않았으나, etofenprox에 저항성을 나타내는 개체군이 동일한 계열의 피레스로이드계 살충제인 fenpropathrin에 대해 약제에 노출된 이후에도 섭식을 지속하는 경향을 나타내 교차저항성의 가능성을 보여주었으나, 다른 계열의 살충제인 thiamethoxam에 대한 복합저항성은 확인되지 않았다.

검색어 : 복숭아혹진딧물, EPG, etofenprox, fenpropathrin, thiamethoxam

*Corresponding author. E-mail: youngnam@cnu.ac.kr

전 세계적으로 분포하고 있는 주요 농업해충인 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae* Sulzer)은 식물의 잎이나 줄기, 꽃, 열매 등을 가해하여 직접적으로 많은 피해를 주어 이로 인한 시들음과 성장저해를 유발시키고 간접적으로는 감로 배설로 인한 그을음병 유발과 바이러스를 매개하고 있다. 또한 복숭아혹진딧물은 매우 넓은 기주범위를 가지고 있어 기록되어 있는 것만 하더라도 총 66과 300여종이 되고 있다(Shim *et al.*, 1977; Seo *et al.*, 2005). 이러한 복숭아혹진딧물은 세대기간이 짧아 살충제에 대한 저항성이 빠르게 발달할 수 있기 때문에 이들의 방제를 위한 노력이 계속적으로 요구되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 복숭아혹진딧물을 포함한 많은 종류의 진딧물 방제를 위해 최근엔 환경에 비교적 안정적이고 살충효과가 우수한 피레스로이드계나 네오니코티노이드계 살충제를 이용하고 있다. 여기에 속하는 살충제들은 적절한 용량을 사용한다면 가수분해가 신속하게 이루어지므로 환경에 잔류하거나 생체 내에 축적 되지 않으며, 사람에게는 그다지 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2007). 특히, 네오니코티노이드계 살충제는 1990년대 초부터 사용되기 시작한 침투이행성 살충제로서, 흡즙형 곤충의 방제에 주로 사용되고 있는 살충제 중의 하나로서, 체관부를 섭식하는 진딧물류와 가루이류 등에 방제 효과가 좋아 매년 그 사용량이 증대되고 있다(Leicht, 1996). 그러나 이러한 살충제들도 농민들의 지나친 사용으로 인해 살충제에 대한 내성의 발달이 보고되고 있다(Foster *et al.*, 2003). 따라서 아무리 좋은 특성을 가진 살충제라도 사용량이 증가되면 도태압이 높아져 저항성이 발달할 가능성이 높아 농약 사용량이 증가되고, 농약 수명이 단축될 가능성이 높기 때문에(Choi *et al.*, 2005), 농약 사용량을 최소로 줄이고 최근 대두되고 있는 친환경재배 등의 환경 친화적 방제 전략을 수립하여 해충이 살충제에 대한 저항성 발달을 막기 위한 노력이 필요하다. 저항성 발달은 대상 해충의 유전적, 생물적, 행동적, 방제적 요인 등이 복합적으로 작용하는 것으로서(Gorghiou and Taylor, 1977), 특정한 해충의 저항성 연구는 위의 요인들이 저항성에 미치는 영향 및 그 정도를 연구하는 것이라고 할 수 있다(Yoo *et al.*, 2001).

본 연구에서는 살충제에 노출된 진딧물 개체군간의 행동적 요인의 하나인 섭식패턴의 양상의 차이를 통한 살충제에 반응정도의 차이를 확인해보고자 Electrical Penetration Graphs(EPG) 기술을 이용하였다. EPG 기술은 복숭아혹진딧물과 같이 흡즙형의 구기를 가진 곤

충의 섭식행동을 관찰하는데 쓰이는 유용한 기술로 인식되고 있다(McClean and Kinsey, 1967; Tjallingii, 1978, 1988). 특히, 진딧물류와 멸구류, 가루이류 등 다양한 곤충의 섭식행동 연구가 보고되어있다(Youn., 1992, Lei *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2005; Seo *et al.*, 2007). EPG 기술은 육안으로 구분이 되지 않는 소형 흡즙형 해충의 구침이 작물 체내에서 이동에 따른 반응을 약한 전류를 흘려 식물체의 세포와 조직들의 저항성 차이에 의해서 발생하는 전압을 증폭기로 증폭하여 그래프로 나타냄으로써, 식물체 내부에서의 구침행동을 확인할 수 있는 유용한 기술이다(Spiller, 1988). 이러한 흡즙형 해충의 섭식행동과 관련된 기주식물의 저항성과 감수성 품종의 섭식 비교와 기주식물에 매개하는 바이러스 전반에 관한 많은 정보들을 밝혀내는 기초자료로 제시하고 있다. EPG 기술을 이용하여 살충제 처리 후 해충들의 섭식 반응을 관찰한 연구 결과로는, 네오니코티노이드계 침투이행성 살충제인 imidacloprid와 dinotefuran을 작물 체내에 침투이행시킨 후 작물체로 유입된 약제의 농도에 따른 복숭아혹진딧물의 섭식행동의 변화를 EPG 기록을 통해 관찰한 연구결과와(Seo *et al.*, 2008, 2009), 접촉독을 나타내는 피레스로이드계 살충제에 대한 복숭아혹진딧물의 섭식행동에 관한 연구는 이전에 실험했던 etofenprox에 대해 저항성을 나타내는 복숭아혹진딧물을 비교한 연구 결과가 보고되었다(Jo *et al.*, 2009). EPG 기술을 이용하여 살충제에 대한 저항성의 정도를 파악하는 실험은 직접적인 살충제 처리 후 검정하는 것보다 더욱 구체적으로 섭식행동을 지속적으로 관찰을 할 수 있어 패턴의 양상의 변화를 확인함으로써 살충제가 해충에 직접적으로 미치는 영향을 육안으로 판단 할 수 있다.

본 연구에서는 etofenprox에 대하여 저항성과 감수성을 나타내는 복숭아혹진딧물 두 계통이 fenprothrin과 thiamethoxam에 대한 살충활성의 차이를 EPG 기술을 이용하여 비교함으로써 교차저항성 발달의 유무를 비교하고자 하였다.

재료 및 방법

실험곤충과 식물

본 실험에 이용된 복숭아혹진딧물은 대전시 유성구 고추밭에서 채집한 것을 실험실 내에서 누대 사육하면

서 etofenprox를 처리한 결과, etofenprox에 대한 살충 활성 및 내성 발달정도가 높아 저항성 개체군으로 판단하여 사용하였으며, 감수성 개체군은 D사에서 살충제에 노출되지 않고 누대 사육한 것을 분양받아 사용하였다. 생물검정을 통해 야외에서 채집한 개체군은 기존의 실내에서 사육하고 있던 개체군과 반수치사농도가 30배 이상 차이가 나타나 저항성 개체군으로 분리하여 누대사육하며 실험에 이용하였다. 이들 두 계통의 복숭아혹진딧물은 고추 유묘를 아크릴 사육용기에(40×44×50 cm) 넣어 접종하여 온도조건 25±1°C, 상대습도 50~60%, 광주기 16L:8D에서 누대 사육하였다. 고추 유묘는 포트에 파종 후 4주가 경과된 것을 사용하였다. 모든 실험에서 복숭아혹진딧물은 무시형 성충을 사용하였다.

살충제 처리

복숭아혹진딧물에 대한 살충효과를 검정하기 위해, 각 살충제의 추천농도(etofenprox 200 ppm, fenprothrin 50 ppm, thiamethoxam 100 ppm)로 희석하여 각 처리구당 10마리씩 접종하여 10반복으로 처리하였다. 살충제 처리는 Insect breeding dish(지름 10×4 cm, SPL)에 agar 배지를 만들어 그 위에 고추 잎 디스크를 만든 후 처리구당 10마리씩 저항성과 감수성 복숭아혹진딧물을 접종한 후 1시간동안 정착시킨 다음, spray tower를 이용하여 1ml씩 분무하였고, 24시간과 48시간 후까지 처리된 농도에 따른 살충율을 조사하였다. 또한 추천농도의 살충율을 토대로 농도를 달리하여 처리 한 후, probit 프로그램을 이용하여 반수치사농도와 상대적 내성비를 구하였다.

EPG 기록과 통계분석

EPG(Electrical Penetration Graph) 기록은 Tjallingii(1988)가 고안한 방법을 이용하여 실험에 이용할 고추를 삼각 플라스크(pyrex, 250ml, US)에 탈지면으로 감싸 물을 채운 삼각플라스크에 뿌리부분을 넣고 무시형 성충 복숭아혹진딧물을 1시간 굶긴 뒤, 해부현미경을 이용하여 지름이 25 μm인 금선(Goodfellow, UK)을 약 4cm 길이로 잘라 전도성이 있는 Silver conductive paint(RS. 101-5621, UK)를 이용하여 작은 볼을 만들어 진딧물의 등판에 부착시켜 GIGA-4 DC EPG amplifier에 연결하고, 금선이 연결된 진딧물을 고추에 올려놓아 총 5시간 동안 기록하였다. 기록이 시작된 후 1시간 동안 섭식 반

응을 관찰하고 1시간 후에 3가지 살충제를 각각 작용기작 별로 처리 하였다. Fenprothrin은 소형분무기로 0.5ml을 분무하여 처리하였고 thiamethoxam은 작용기작이 다른 침투이행성 살충제이기 때문에 4,000배의 농도로 희석하여 관주처리 하였다. EPG 신호는 PC에 저장하여 STYLET 3.8 program으로 분석하였고, 전기적 신호 기록을 위한 노이즈를 최소화하기 위하여 구리망으로 감싼 Faraday cage 안에서 수행하였다. EPG기록 결과 역시 감수성 개체군과 저항성 개체군 두 그룹간의 차이는 SPSS의 t-test를 통해 5% 신뢰한계구간에서 유의성여부를 확인하였다.

결과 및 고찰

살충제 처리

Etofenprox에 대해 감수성과 저항성을 나타내는 복숭아혹진딧물의 개체군간의 살충율을 비교하기 위하여 추천농도(200 ppm)로 처리한 결과, 24시간 후 저항성 개체군은 16.7%, 48시간 후는 36.7%의 살충활성을 보여주었고, 감수성 개체군은 24시간 후와 48시간 후에 86.7%로 두 개체군간 살충율은 큰 차이를 나타내었다. 또한 반수치사농도에 있어서도 두 개체군 간에 각각 66.15와 2,195.10 ppm으로 33배 이상의 차이를 나타내었다. 또한 야외 고추포장에서 채집한 복숭아혹진딧물의 약제 추천농도에 대한 95% 이상의 치사농도(LC₉₅)의 상대적 내성비를 구하여 etofenprox에 대한 약제감수성을 두 개체군 간에 비교한 결과, 야외 고추포장에서 채집한 복숭아혹진딧물 개체군의 상대적 내성비가 359.55로 높게 나타나 이 약제에 대해 감수성이 현저히 낮은 것을 확인할 수 있었다(Table 1).

Fenprothrin에 대한 결과는 추천농도(50ppm)로 처리했을 때, 저항성 개체군은 48시간 후에 28%의 살충활성을 보여주었고, 감수성 개체군은 48시간 후에 29%로 두 개체군간 살충율은 거의 차이를 보이지 않았다. 반수치사농도는 감수성 개체군이 93.46ppm, 저항성 개체군이 193.15ppm으로 두 개체군이 fenprothrin에 대하여 내성이 발달한 것으로 판단하였고, 두 개체군의 내성비는 감수성 개체가 30.31, 저항성 개체가 152.57로 etofenprox 저항성 개체가 fenprothrin에 대한내성이 상대적으로 많이 발달한 것을 확인할 수 있었다(Table 1).

Thiamethoxam에 대한 두 개체군간의 살충율을 비교

Table 1. Mortality (%) in recommended concentration, median lethal concentration (LC₅₀) and tolerance rate of 95% lethal concentration (LC₉₅) with susceptible and resistance populations of *M. persicae* against etofenprox, fenpropathrin and thiamethoxam

Insecticides	Populations	Mortality (%) in RC ^a	LC50 (ppm)	Slope±SE	df	X ²	TR ^b
Etofenprox	Susceptible	86.7	66.15	2.35±0.04	16	77.94	1.67
	Resistance	36.7	2195.10	1.09±0.01	19	13.44	359.55
Fenpropathrin	Susceptible	29.0	93.46	1.36±0.26	1.97	0.15	30.31
	Resistance	28.0	193.15	1.03±0.13	2.29	1.46	152.57
Thiamethoxam	Susceptible	79.0	30.34	1.92±0.17	5	9.42	4.37
	Resistance	57.0	3.17	0.81±0.18	3.17	13.19	6.75

^aRC: Recommended concentration; ^bTR (Tolerance rate)=LC₉₅/RC of insecticide.

하기 위하여 추천농도(100ppm)로 처리한 결과, 저항성 개체군은 48시간 후에 57.0%의 살충활성을 보여주었고, 감수성 개체군은 79.0%로 두 개체군간 살충율은 etofenprox를 처리했을 때보다 큰 차이를 나타내지 않았지만, 반수치사농도에 있어서 두 개체군 간에 각각 30.34와 3.17ppm으로 오히려 저항성 개체군의 반수치사농도가 더 낮았고, 상대적 내성비는 저항성 개체군이 6.75, 감수성개체군이 4.37로 나타나 etofenprox에 차별적인 반응을 나타내는 이 두 복숭아혹진딧물 개체군은 thiamethoxam에 대해서는 큰 차이를 나타내지 않았다 (Table 1). 위와 같은 결과를 통해 피레스로이드계 살충제인 etofenprox에 대해 저항성과 감수성을 보이는 복숭아혹진딧물 두 개체군이 동일한 피레스로이드 계열인 fenpropathrin에 대해 약제에 대한 반응에 있어 유사한 경향을 보인 반면, 비동일계열의 살충제인 thiamethoxam에 대해서는 두 개체군간 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

EPG 기록

본 연구에서는 etofenprox에 대해 저항성과 감수성을 나타내는 복숭아혹진딧물 개체군이 다른 두 종의 살충제, thiamethoxam과 fenpropathrin에 대하여 교차 및 복합저항성을 나타내는지의 여부를 EPG 기술을 이용하여 섭식행동을 관찰하였다.

살충제에 반응하여 나타나는 EPG파형은 크게 두 가지로 볼 수 있는데, 흡즙하는 도중 식물체에 탐침된 구기가 침투이행된 살충제를 감지하고 순간적으로 섭식행동을 중단한 후 다른 장소로 이동하는 경우로, 이때에는 구침이 완전히 식물체로부터 떨어지기 때문에 어떠한 파형도 나타나지 않는 NP패턴이 나타나게 되는 경우다. 다른 하나는 살충제를 감지한 후 섭식을 중단

하지는 않지만 구침이 식물체로부터 완전히 빠져나오지 않고 식물세포 사이를 이동하며, 다른 섭식부위를 찾는 구침의 활성패턴이 나타나는 경우이다. 이런 경우, 파형의 변화를 통해 살충제를 감지한 복숭아혹진딧물의 개체군간 반응양상을 확인할 수 있다(Seo *et al.*, 2007, 2009). 본 실험에서 etofenprox에 다른 반응을 나타내는 감수성개체군과 저항성개체군간의 살충제에 대한 EPG반응패턴에 차이를 확인하기 위해, 앞에서 언급한 것과 같이 처리된 살충제에 대한 적극적인 반응인 구침을 빼고 있는 시간(NP), 총 섭식시간, 기주탐색 및 섭식을 시도하려는 반응인 전기적 연결신호(contact signal) 빈도 및 신호가 나타나기까지 소요된 시간, 물관부나 체관부의 섭식에 앞서 급격한 전압의 변화로 나타나는 potential drop(Pd)가 나타나기까지 소요된 시간, 섭식을 하기 위한 전 단계 행동인 pathway activity(Pa) 시간을 측정하였다. 일반적인 복숭아혹진딧물의 EPG 패턴을 살펴보면, 반응 초기에는 NP(Non Penetration) 패턴으로 진행되다가 복숭아혹진딧물의 구기가 식물체에 닿는 순간 전기적 회로가 완성되고 전압의 증폭이 이루어지며, 진딧물과 식물이 유기적으로 연결되어 육안으로 확인할 수 있는 파형으로 기록된다. 이 때 진딧물의 구침의 활성패턴인 pathway activity가 시작되면서 본격적인 기주탐색 행동에 들어가는데, 구침이 세포간과 세포내에서의 활성을 가지고 침투이동을 나타내는 electrical potential drop이 나타나기도 한다. 이후 불규칙적인 파형이 지속되다가 기주로서 적합하다는 판단 후에 본격적인 섭식행동인 일정한 전압에서 물관부/체관부의 비교적 규칙적인 패턴이 나오게 된다. 이것은 복숭아혹진딧물의 먹이탐색과 섭식을 위한 행동인 pathway activity가 나타나는 대표적인 패턴들로서 본 실험에는 이 전의 실험들에서 수행된 etofenprox에 대하여 저항성과 감수성을 가진 복숭아혹진딧물들이 다른 두 종의

살충제, thiamethoxam과 fenpropathrin에 대하여 교차 저항성을 보이는지의 여부를 EPG 기술을 이용하여 분석했다.

Table 2는 fenpropathrin을 처리 했을 때의 결과로, 첫 potential drop이 나타난 시간은 살충제 처리 전 감수성 개체가 평균 129.0초, 저항성 개체가 137.9초로 거의 비슷하였으며, fenpropathrin의 처리 후에는 97.5초로 저항성의 83.7초 보다는 조금 느렸다. 전기적 접촉신호의 빈도수의 측정 결과, 저항성 개체가 감수성 개체보다 처리 전에는 22.1회로 감수성의 19.7회 보다 평균적으로 빈도수가 높았으나, 살충제 처리 후에는 감수성 개체는 65.6회, 저항성 개체는 33회로 살충제 처리 후 감수성 개체가 저항성 개체보다 약 두 배 가량 더 많이 탐침행동을 시도한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 총 섭식시간의 비교 결과, 처리전과 후에서 저항성 개체가 좀 더 섭식 시간이 긴 것을 확인하였고 이에 반하여 np 시간은 감수성 개체가 약간 더 긴 것을 확인하였다. Pathway activity시간은 처리 전에 감수성 개체가 467.4 초, 저항성 개체가 394.1초로 나타났고, 처리 후에는 감수성 개체가 1,345.6초, 저항성 개체가 1054.4초로 감수성 개체의 pa 시간이 더 길었다. Fenpropathrin 처리에서 유의성은 없었으나, 감수성 개체가 모든 조사 항목에서 저항성 개체보다 기주 탐색 및 섭식에 있어서 더 민감한 반응을 보인 것을 확인할 수 있었다. 조사한 섭

식행동패턴에 있어 조사한 두 개체군간의 이러한 차이는 통계적으로 유의하지 않았으나, 전반적으로 etofenprox에 저항성을 나타내는 개체군이 약제처리 후에도 구침을 쫓고 섭식하는 시간이 감수성 개체군에 비해 길게 나타나며 약제에 노출된 이후에도 계속 섭식하고자 시도하는 경향을 나타내었다.

Fig. 1은 실험 시작 후 1시간 뒤 fenpropathrin을 처리한 EPG 그래프이다. 두 개체군 모두 크게 섭식 저해 및 기피 등은 거의 없었고 계속적으로 pathway activity와 섭식을 하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 thiamethoxam을 처리 했을 때의 결과로, 두 개체군간의 약제처리전과 약제처리후의 섭식행동특성에 있어 차이를 확인하기 위해, 맨 처음 potential drop(First p.d)이 일어나기까지 소요된 시간과, 총 기록시간동안 전기적 연결신호(Contact s.f)가 몇 번 나타났는지의 빈도수를 측정하고, 총 섭식시간 및 섭식행동을 중단하고 구침을 식물체로부터 완전히 뺀 시간(Total n.p)을 측정하여 비교하였다. 첫 potential drop이 나타난 시간은 살충제 처리 전 감수성 개체가 평균 78.7초로 저항성 개체의 479.3초 보다 더 빨랐고, thiamethoxam의 처리 후에는 436.3 초로 저항성의 197.2초 보다는 더 느렸다. 처리된 약제에 반응하여 섭식을 중단했다가 다시금 섭식을 재개하려고 시도하는 전기적 접촉신호의 빈도수를 측정한 결과, 저항성 개체가 감수성 개체보다 처리전에는 14.2회로 감수

Table 2. EPG recorded probing behaviour of *Myzus persicae* on the pepper leaf disc treated fenpropathrin and thiamethoxam during 5 hours. Insecticides were treated with 4,000 times dissolved concentration after 1 hour from recording

Insecticides	Values	Non treatment (n=10)			Treatment (n=10)		
		A-E ^c Susceptible	A-E ^c Resistant	P	A-E ^c Susceptible	A-E ^c Resistant	P
Fenpropathrin	First p-d ^a (sec)	129.0±204.0	137.9±138.9	NS	97.5±105.4	83.7±86.5	NS
	Contact s-f ^b	22.1±16.8	19.7±25.0	NS	65.6±71.3	33.0±26.5	NS
	Total feeding (sec)	1,596.6±550.0	1,759.2±891.3	NS	7,822.5±2318.5	8,805.0±2958.8	NS
	Total n-p ^c (sec)	1,536.0±556.1	1,457.3±891.8	NS	5,231.9±1932.7	4,540.6±2777.9	NS
	pa ^d	467.4±239.9	394.1±215.8	NS	1,345.6±942.8	1,054.4±541.9	NS
Thiamethoxam	First p-d ^a (sec)	78.7±107.0	479.3±935.2	NS	436.3±648.6	197.2±239.2	NS
	Contact s-f ^b	17.6±8.8	14.2±10.4	NS	26.5±15.9	52.4±32.9	**
	Total feeding (sec)	1,786.8±822.3	2,009.6±902.8	NS	8,132.7±4344.4	7,075.0±2509.2	NS
	Total n-p ^c (sec)	1,280.8±586.4	1,425.6±913.8	NS	5,365.4±4719.7	5,919.5±3049.4	NS
	pa ^d	448.4±510.5	164.8±112.0	NS	881.0±668.0	1,451.5±1070.2	NS

* P<0.05, ** P<0.0001, NS statistically not significant; t-test in SPSS 17.0.

^aP-d is potential drop. ^bS-f is signal frequency. ^cN-p is non penetration.

^dP-a is pathway activity. ^eA.E is against etofenprox.

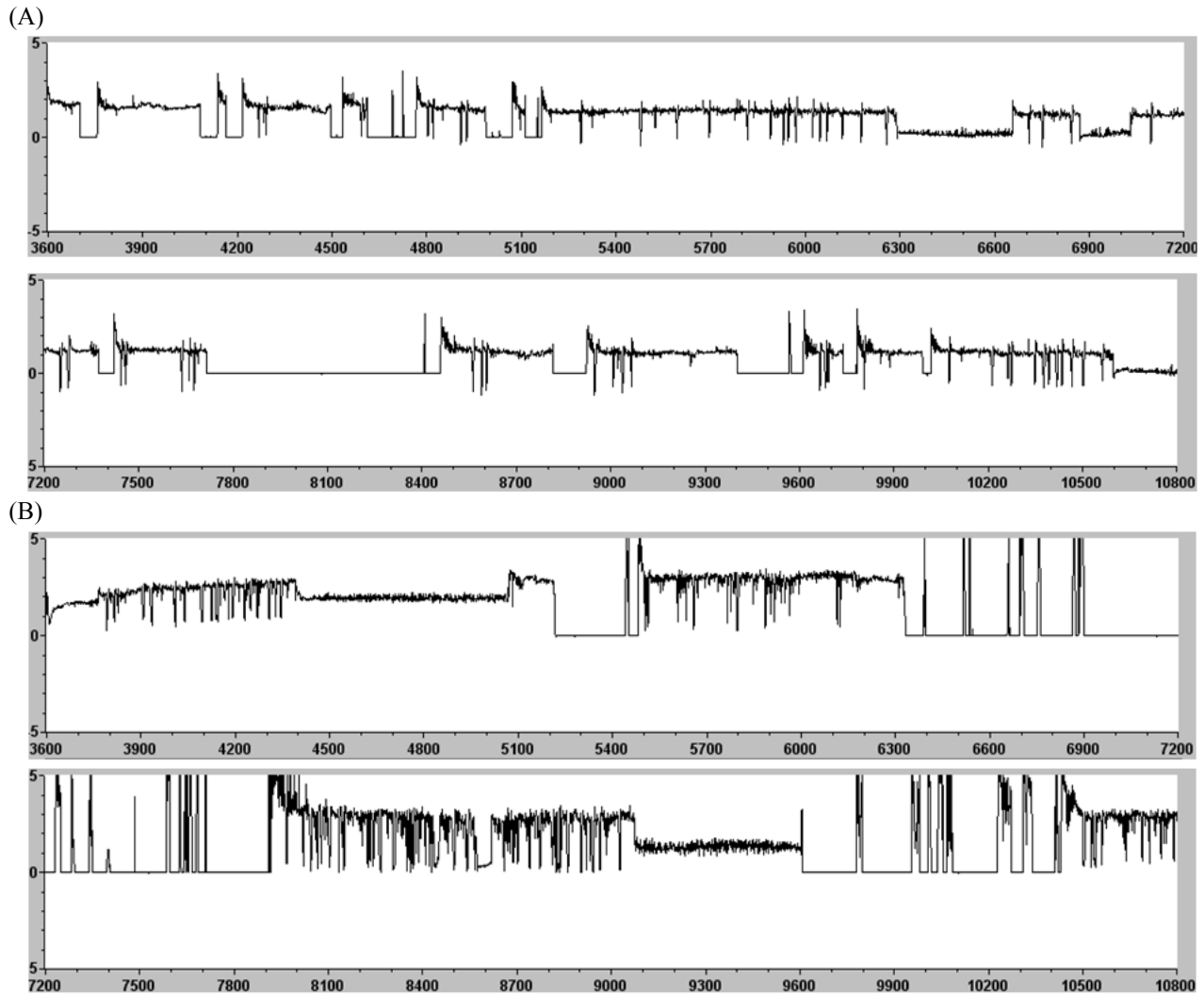


Fig. 1. EPG waveforms show feeding by resistant (A) and susceptible (B) *M. persicae*. Upper is waveforms from treated with fenpropathrin after 2 hrs and bottom is after 3 hrs.

성의 17.6회 보다 평균적으로 약간 적었으나, 살충제 처리 후에는 감수성 개체는 26.5회, 저항성 개체는 52.4회로 살충제 처리 후 저항성 개체가 감수성 개체보다 약 두 배 가량 더 많이 탐침행동을 시도한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 두 개체군 간의 섭식 시간에 대한 차이를 알아보기 위해 총 섭식시간을 비교한 결과, 이전에 실험했던 etofenprox의 처리 때와는 상당히 다른 양상을 보여주었다. Etofenprox를 처리 후에는 감수성 개체가 저항성 개체에 비해 상당히 섭식시간이 줄어든 것을 확인할 수 있었고, 그에 반해 진딧물의 구기가 완전히 떨어져 섭식행동을 하지 않는 NP 패턴 시간이 상당히 긴 것을 볼 수 있었지만, thiamethoxam 처리는 직접적이 아닌 관주 처리를 했기 때문에 처리 후 바로 반응

을 하는 것이 아닌 1시간 뒤부터 지속적인 섭식 보다는 섭식을 하기 위한 접촉 빈도수, 즉 contact signal 빈도가 높은 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2는 thiamethoxam 처리 후 2시간이 경과한 후의 패턴을 보여주고 있는데, 처리 직후에는 지속적으로 섭식을 하고 있지만, 약제 처리 1시간 후에 두 개체군 모두에서 섭식을 시도하기 위한 신호인 contact signal의 빈도가 높아진 것을 확인할 수 있었고, 후에 섭식이 이루어지는 것을 확인할 수 있었지만 확연히 그 빈도 및 시간이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 그리고 진딧물이 섭식을 하고자 기주 탐색 단계 행동인 pathway activity 시간은 처리 전에 감수성 개체가 448.4초, 저항성 개체가 164.8초로 수치상으로는 감수성 개체의 pathway activity 시간이 약 2.3배

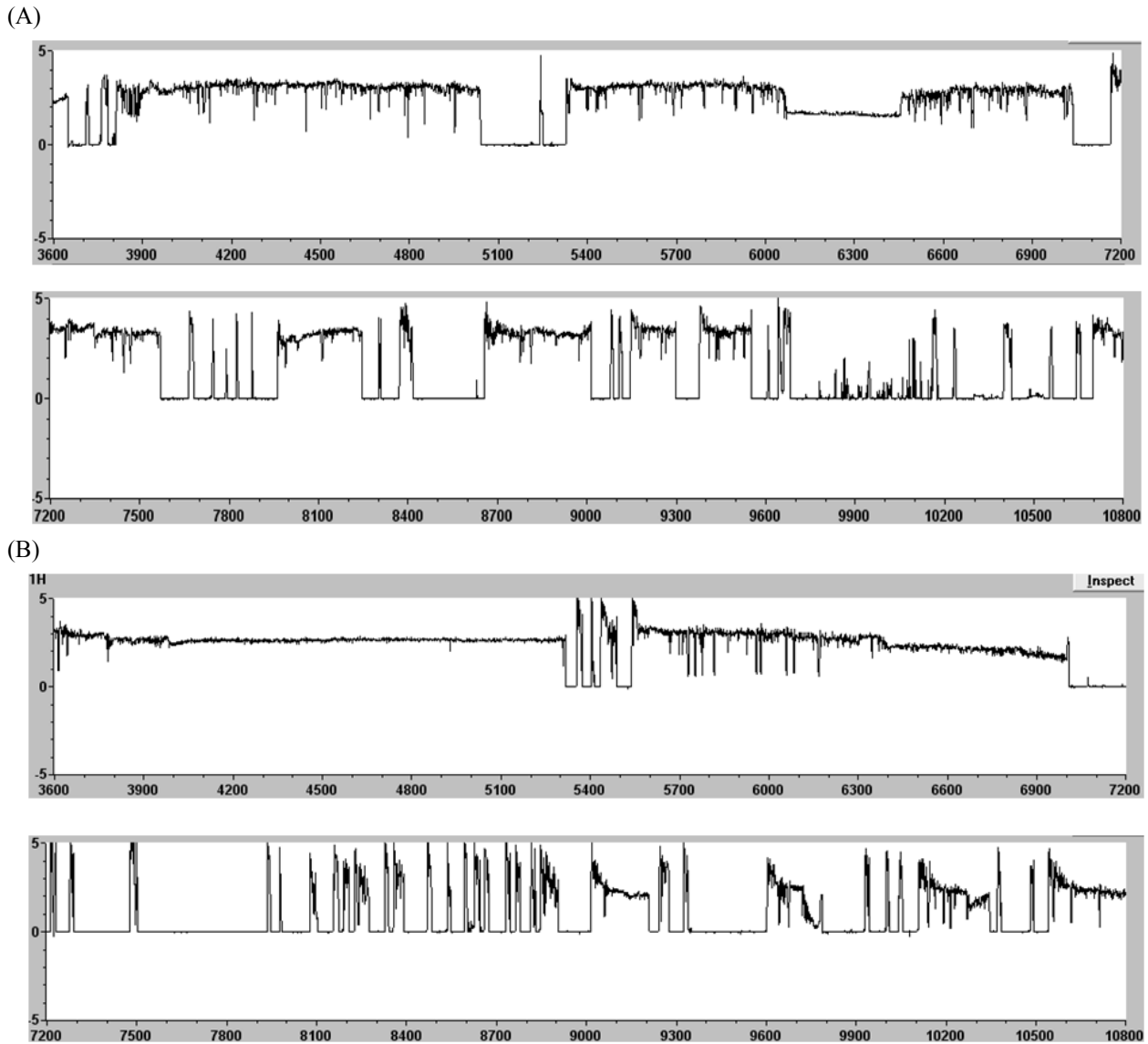


Fig. 2. EPG waveforms show feeding behavior of resistant (A) and susceptible (B) *M. persicae*. Upper is recorded from treatment with thiamethoxam after 2 hrs and bottom is after 3 hrs.

긴 것으로 나타났고 통계적으로 유의성은 없었으며, 처리 후에는 감수성 개체가 881.0초, 저항성 개체가 1451.5초로 contact signal 빈도가 저항성 개체에서 높았듯이 비례적으로 pathway activity 역시 증가한 것을 볼 수 있었지만, 두 개체군간의 차이에 있어 통계적으로 유의성은 없었다. 조사한 섭식행동의 특성들에 있어 두 개체군간 차이를 보이지 않았던 것은 앞서 수행된 살충제에 대한 반응정도에서도 확인한 바와 같이, etofenprox에 저항성과 감수성을 나타냈던 진딧물 두 개체군은 다른 계열의 살충제인 thiamethoxam에 대해서는 큰 차이를 보이지 않았기 때문인 것으로 보인다.

본래 진딧물이 살충제와 직접적인 접촉하거나 감지하게 되면 섭식행동을 중단하고 식물체로부터 구침을 빼게 되지만, 본 실험에서는 시간이 경과하거나 감지했음에도 불구하고 섭식을 유지하거나 다시 섭식을 위한 탐침 행동을 꾸준히 반복하는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 etofenprox에 저항성과 보이는 복숭아혹진딧물이 기주에 대한 모든 섭식 행동이 thiamethoxam과 fenpropathrin에 노출 되었을 때에도 덜 민감하게 반응하여 지속적인 섭식 행동을 확인 할 수 있었고, 저항성을 띄는 복숭아혹진딧물들은 감수성 개체들 보다 살충제에 대한 반응이 덜 민감하다는 것을 확인 할 수 있

는 결과이다. 이는 두 종의 살충제에 대한 저항성 기작이 발현 됐음을 섭식행동조사를 통한 행동학적 실험으로 확인한 결과로, 이를 토대로 살충제 저항성 발현을 억제시키기 위한 아치사량 정도의 살충제 농도를 측정하거나 다른 살충제와의 혼용으로서 저항성을 억제시키기 위한 노력이 필요하다는 것을 보여주고 있다.

본 연구에서는 피레스로이드계 살충제인 etofenprox에 대하여 저항성과 감수성을 띠는 복숭아혹진딧물이 다른 두 종의 살충제, thiamethoxam과 fenpropathrin에 대하여 차별적인 반응과 섭식행동을 나타내는 것을 확인하였다. 앞에서 언급했듯이, 네오니코티노이드계 살충제에서도 많은 연구가 보고되고 있는데, Knaust and Poehling(1994)은 imidacloprid의 처리에 의한 차이로 복숭아혹진딧물의 전체 탐침 시간이 처리하지 않은 잎에서도 보다 짧았고, 낮은 농도 처리만으로도 복숭아혹진딧물의 섭식을 저해함으로 살충제의 사용을 조절하며 복숭아혹진딧물을 효과적으로 방제할 수 있을 것이라고 하였다. 그렇지만, Primidicarb은 복숭아혹진딧물의 섭식행동에 어떠한 변화도 나타내지 못했다고 보고하고 있다(Naeun *et al.*, 1995). 살충제 저항성의 주요 원인으로 살충제의 체내 침투량 감소, 살충제를 분해하는 대사능력의 증대, 살충제가 작용하는 작용점의 비민감성 등을 들고 있다(Yoo *et al.*, 2001). 또한 Etofenprox가 속하는 피레스로이드계 살충제의 경우, 작용점의 비민감성이 저항성의 주요 원인으로 관여한다고 보고되어 있다(Peyronnet *et al.*, 1993; Williamson *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 1996). 이는 교차저항성 발현에 크게 기여하며, 산화효소도 저항성 발현의 주요 기작으로 보고되고 있다(Kasai *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 1998). Choi(2002)는 imidacloprid가 복숭아혹진딧물의 저항성과 관계된 카르복실 에스테라제의 저해인 유기인계나 카바메이트계에 대한 교차저항성 낮고, 같은 네오니코티노이드계 농약인 acetamiprid에 대해 높은 저항성을 보이고 있는 것은 약제의 구조와 작용기작의 유사성에서 기인하는 것이라 판단하였다. Nauen(2003)은 clothianidin이 처리된 작물에 thiamethoxam을 처리하는 것은 작용기작이 유사하기 때문에, 저항성 발달을 막기 위한 관리 관점에서 매우 높은 주의를 요구한다고 하였다.

위와 같은 연구를 토대로 앞으로 복숭아혹진딧물의 etofenprox에 대한 저항성과 감수성 개체군의 생리·생태적인 특징 비교만이 아닌 저항성 개체군이 다른 살충제에도 교차저항성을 보이는지 여부를 섭식행동비교를

통해서도 판단할 수 있으며, 이에 덧붙여 분자유전학적인 방법을 토대로 개체군의 약제에 대한 저항성여부를 규명하는 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

사 사

본 논문은 2009년 농림기술관리센터 농림기술개발사업 기획과제인 나노기술을 이용한 친환경자재개발 및 농약감소를 위한 서방형 나노제형의 개발 과제를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 바탕으로 작성되었습니다.

Literature Cited

- Choi B.R., S.W. Lee, J.K. Yu. 2002. Resistance development and cross resistance of green peach aphid, *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae), to imidacloprid. Korean J. Pesti. Sci. 6(4): 264-270.
- Choi B.R., S.W. Lee, Y.H. Song and J.K. Yu. 2005. Effect of sublethal doses of imidacloprid on the green peach aphid, *Myzus persicae*. Korean J. Pesti. Sci. 9(4): 374-379.
- Foster, S.P., I. Denholm and R. Thompson. 2003. Variation in response to neonicotinoid insecticides in peach-potato aphids, *Myzus persicae*(Hemiptera :Aphidae). Pest Manag. Sci. 59: 166-173.
- Georghiou, G.P. and C.E. Taylor. 1977. Genetic and biological influences in the evolution of insecticide resistance. J. Econ. Entomol. 70: 319-323.
- Jo C.W., C.R. Park, K.S. Yoon, M.A. Kang, H.R. Kwon, E.J. Kang, M.J. Seo, Y.M. Yu and Y.N. Youn. 2009. Comparison of life table and feeding behavior of resistance and susceptible population of the green peach aphid, *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) against etofenprox. Kor. J. Appl. Entomol. 48(3): 301-310.
- Kasai, S., S.W. Indira and T. Shono. 1998. P450 monooxygenases are an important mechanism of permethrin resistance in *Culex quinquefasciatus* Say larvae. Are. Unsect Biochem. Physiol. 37: 47-56.
- Kim A.J., K.H. Kim, J.S. Park, E.K. Eo, B.J. Oh, M.J. Lee, S.W. Lee, J.H. Suh and H.K. Roh., 2007. The study of pyrethroid intoxication: The basis of agrichemical intoxication survey in 2005. Kor. J. Clin Toxicol. 5(2): 99-105.
- Kim N.S., M.J. Seo and Y.N. Youn. 2005. Characteristics of feeding behavior of the rice brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, using electrical penetration graph (EPG) technique on different rice varieties. Kor. J. Appl. Entomol. 44(3): 177-187.
- Knaust, H.J. and H.M. Poehling. 1994. Studies on the action of imidacloprid on cereal aphids and their efficiency to transmit the BYD-virus. Bulletin IILB-SROP. 17: 89-100.
- Lei, H., W.F. Tjallingii, J.C. van Lenteren and R.M. Xu. 1996. Stylet penetration by larvae of the greenhouse whitefly on cucumber. Entomol. Exp. appl. 79: 77-84.
- Leicht, W. 1996. Imidacloprod - A choronicotinyl insecticide

- biological activity and agricultural significance. Pflanzenschutz Nachrichten Bayer. English ed 48: 71-84.
- McLean, D.L. and M.G. Kinsey. 1967. Probing behavior of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. I. Definite correlations of electronically recorded waveforms with aphid probing activities. Ann. Entomol. Soc. Am. 60: 400-406.
- Nauen, R. 1995. Behavior monitoring effects of low systemic concentrations of imidacloprid on *Myzus persicae* with special reference to an antifeeding response. Pestic. Sci. 44: 145-153.
- Nauen, R., U. Ebbinghaus-Kintscher, V.L. Salgado, M. Kausmann. 2003. Thiamethoxam is a neonicotinoid precursor converted to clothianidin in insects and plants. Pestic. Biochem. Physiol. 76: 55-69.
- Pyronnet, O., Y. Pichon and R. Delorme. 1993. Biological response and electrophysiological effects of topical application of deltamethrin on a resistant and a susceptible strain of *Drosophila melanogaster* Meig. Pestic. Biochem. Physiol. 47: 185-198.
- Seo M.J., J.K. Jang, E.J. Kang, M.K. Kang, N.S. Kim, Y.M. Yu and Y.N. Youn. 2005. Feeding behavior in the plant tissues with green peach aphid (*Myzus persicae*, Aphididae; Homoptera) using EPG technique. Kor. J. Appl. Entomol. 44(4): 271-276.
- Seo M.J., M.K. Kang, H.B. Seok, C.W. Jo, J.S. Choi, C. Jang, I.C. Hwang, Y.M. Yu and Y.N. Youn. 2009. Characteristics of feeding behaviors of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) depending on inflow concentrations of dinotefuran. Kor. J. Appl. Entomol. 48(2): 171-178.
- Seo M.J., Y.J. Oh, Y.C. Mann, Y.N. Youn and G.H. Kim. 2007. Differentiation in feeding behaviour of biotypes B and Q of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) against three insecticides. Kor. J. Appl. Entomol. 46(3): 401-408.
- Seo, M.J., M.K. Kang, B.H. Jo, I.C. Hwang, Jang, Y.M. Yu and Y.N. Youn. 2008. Changes of feeding behaviors of *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) depending on inflow concentrations of imidacloprid. Korean J. Appl. Entomol. 47(4): 369-378.
- Shim, J.Y., J.S. Park, W.H. Paik and Y.B. Lee. 1997. Studies on the life history of green peach aphid, *Myzus persicae* (Homoptera). Kor. J. Pl. Prot. 16(3): 139-144.
- Spiller, N.J. 1988. Electronic recording of plant penetration by the cereal aphids *Rhopalosiphum padi* and *Metopolophium dirhodum* on resistant and susceptible wheat seedlings. Ann. Appl. Biol. 112: 471-478.
- Tjallingii, W.F. 1978. Electronic recording of plant penetration by aphids. Entomol. Exp. Appl. 24: 521-530.
- Tjallingii, W.F. 1988. Electrical recording of stylet penetration activities. aphids, their biology, natural enemies and control, Vol. B (ed. By A.K. Minks and Harrewijn), pp. 98-108.
- Williamson, M.S., D.M. Torres, C.A. Hick, N. Castells and A.L. Devonshire. 1996. Molecular genetics and evolution of pesticide resistance. Analysis of sodium channel gene sequences in pyrethroid-resistant houseflies. Am. Chem. Soc. 52-61.
- Yoo, J., C.G. Park, S.W. Lee and B.R. Choi. 2001. Cross resistance of cypermethrin- and methomyl-resistance and linkage group analysis on cypermethrin resistance in house fly (*Musca domestica* L.). Korean J. Appl. Entomol. 40(4): 337-344.
- Youn Y.N. 1992. Electrophysiological recordings of olfactory receptors, ultrastructure of compound eyes and electrical monitoring of feeding behaviour in *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). PhD. Thesis. University of London. England. 392pp.
- Zhang, L., K. Shinji and T. Shono. 1998. In vitro metabolism of pyriproxyfen by microsomes from susceptible and resistant housefly larvae. Arc. Insect Biochem. Physiol. 37: 215-224.
- Zhao, G., R.L. Rose, E. Hodgson and R.M. Roe. 1996. Biochemical mechanisms and diagnostic microassays for pyrethroid, carbamate and organophosphate insecticide resistance/cross-resistance in the tobacco budworm, *Heliothis virescens*. Pestic. Biochem. Physiol. 56: 183-195.

(Received for publication December 5 2009;
revised December 14 2009; accepted December 17 2009)