



카보퓨란 처리 방법에 따른 약제 저항성 최적 평가 시기

정인홍 · 이시우¹ · 박창규² · 권덕호^{1*}

국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과, ¹한국농수산대학교 채소학과, ²한국농수산대학교 산업곤충학과

Optimal Evaluation Times of Brown Plant Hopper (*Nilaparvata lugens*) Resistance to Carbofuran by Application Methods

In-hong Jeong, Siwoo Lee¹, Chang-Gyu Park² and Deok Ho Kwon^{1*}

Division of Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

¹Department of Vegetable Crops, Korea National College of Agriculture and Fishery, Jeonju, Jeollabuk-do 54874, Republic of Korea

²Department of Industrial Entomology, Korea National College of Agriculture and Fishery, Jeonju, Jeollabuk-do 54874, Republic of Korea

(Received on October 16, 2019. Revised on November 7, 2019. Accepted on November 11, 2019)

Abstract Three kinds of carbofuran application methods, drench application (root zone treatment), dipping application (leaves and stem treatment) and topical application (insect body treatment), were involved for evaluation of insecticidal effects of carbofuran against resistant brown planthopper (BPH). Optimal evaluation times for resistance of BPH based on LC₅₀ value were 4 days after carbofuran treatment by drench and dipping application methods, and 3 days in topical application method. Based on the standard deviation of mortality, which is considered to be same group if its difference with the former one is within 10%, optimal evaluation date was 1-4 days after treatment for drench application and dipping application, and 1-6 days for topical application. For avoiding confusion of evaluation dates among application methods, 4 days after carbofuran treatment were recommended as optimal evaluation date against resistant BPH. Resistance ratio is another method for insecticide resistance evaluation. It is closely related to the application methods and the susceptibility of tested insects. Optimal determination dates for resistance ratio were 3 days after carbofuran treatment for drench application, 4 days for dipping application and 3 days for topical application.

Key words Brown planthopper, Carbofuran, Resistance, Optimal times, Application method

서 론

해충의 약제저항성 발달은 약제의 효력을 무력화시키는 가장 큰 요인이다. 해충의 약제 저항성 문제는 1950년대부터 많은 곤충학자와 환경 연구자들에 의해 제기되었는데 생물학자인 Rachael Carson (1962)이 “침묵의 봄”이라는 환경 보호의 기념비적인 책에서 농약의 부작용인 인축에 대한 독성, 환경 파괴, 해충의 약제 저항성 등을 서술함으로써 인류의 환경에 대한 의식 변화를 일으키는 계기가 되어, 이 때부

터 농약 등 생활 전반에서 이용되는 화학물질의 부작용으로부터 인류의 환경을 보존코자 하는 미국의 범 국민적인 운동이 시작되었다(Josie, 2007; Paull, 2013). 이처럼 농약에 대한 해충의 저항성 문제는 인류의 안전하고 안정적 식량 생산을 위협하고 더 나아가 환경을 더욱 열악하게 만드는 크나큰 요인으로 인식되었다(Richard, 1999).

벼멸구(brown planthopper, BPH)는 동남아 쌀 생산 지역에서 쌀의 안정적 생산에 위협을 주는 최대 해충이며(Dyck and Thomas, 1979), 한국을 비롯하여 중국, 일본, 베트남, 필리핀 등 동아시아 전역에서 발생하여 피해를 주고(Varca and Feuer, 1976; Mochida et al., 1977; Kiritani, 1979), 그

*Corresponding author

E-mail: dhkwon1315@gmail.com

피해는 체험 상 벼 생산량의 10% 이상으로 나타나고 있다 (Liu and Sun, 2016). 우리나라의 벼멸구는 중국으로부터 6 월 초순부터 날아와 정착, 증식하여 피해를 주며, 방제는 주로 화학 농약에 의해 이루어 지고 있다. 이로 인한 벼멸구의 농약에 대한 저항성 문제는 벼멸구 방제를 연구하는 곤충학 자들의 주된 연구과제 중 하나가 되었다. 실제 많은 곤충 연구자들이 벼멸구의 약제 저항성 발달의 원인과 대책에 대해 연구하고 있다(Nagata et al., 2002; Liu et al., 2005; Nauen and Delholm, 2005; Matsumura et al., 2009; Mastumura and Sanada-Morimura, 2010). 중국으로부터 비래하는 벼멸 구의 약제저항성 문제는 중국의 벼멸구 약제 저항성 발달과 밀접한데 염려스러운 것은 중국에서 벼멸구의 약제에 대한 저항성이 급격히 증가하고 있다는 것이다(Chiu, 1980; Wang et al., 2008; Wen et al., 2009). 중국의 벼멸구 약제 저항성 문제는 곧 바로 한국과 일본으로 확대될 것으로 예상되며 이에 대한 대책이 필요하다고 여러 저항성 연구자들이 보고 하고 있다(Wang et al., 2008; Matsumura et al., 2009).

현재 벼멸구 살충제로서 많은 약제가 시판되고 있으며 (KCPA, 2014), 이에 대한 벼멸구의 저항성기작은 매우 다양 하게 나타난다(Scott, 1990; Soderlund and Bloomquist, 1990). 현재 약제 저항성은 실내 생물 검정에서 감수성 대조 계통에 대한 약제저항성비로 나타내는 것이 가장 합리적으로 여겨져 많이 사용되고 있다(Jeong et al., 2019). 해충의 약제 저항성은 저항성기작 하나에 의해 발현되는 것이 아니라 여러 가지 저항성에 작용하는 인자가 종합적으로 관여하여(Wu et al., 2018) 나타나므로 약제의 특성이나 약제의 처리 방법 등에 따라 상대적인 저항성 비가 달라지는 데, 저항 성비 차이 형성에 가장 영향이 클 것으로 보이는 약제 처리 방법을 비교, 검토하는 것이 필요하리라 본다. 현재 약효 검 정으로 많이 쓰고 있는 약제 살포 방법은 물에 희석하여 사 용하는 방법, 입제로 토양에 살포하는 방법 그리고 실험실 에서 미량국소 처리기를 이용한 국소처리법인데 본 실험에 서는 이 세가지 방법으로 저항성 비를 측정하여 약제 저항 성을 비교, 고찰하였다. 실험에 사용된 살충제는 카보페이트 살충제의 한 종류인 카보퓨란(Carbofuran)으로 식물의 뿌리 나 잎 표면으로 침투되는 성질을 갖고 있어 토양 혼화 처리 나 관주처리로 방제하기 어려운 여러 해충과 바이러스를 매 개하는 해충 방제에 사용되고 있다(Jotwani et al., 1979; Shukla and Anjaneyulu, 1980; DiSanzo, 1981; Yen et al., 1997; Salman, 2013). 위와 같이 카보퓨란은 식물 체내 침투 이행성을 갖고 있어 이 특성을 이용한 관주처리나 토양혼화 처리는 다른 약제 처리 방법과 비교하여 약효나 저항성 발 현에 어느 정도 영향을 주는가에 대해서는 정확히 평가되고 있지 않고 있다. 이에 따라 식물체 침투에 의한 섭식독성과 접촉독성을 동시에 갖고 있는 카보퓨란의 특성을 이용, 처 리 방법에 의한 살충 작용을 분석함으로써 일반 살충제의

살충 작용의 연구, 분석에 기초가 되는 연구 방법과 분석 방 법을 제시코자 본 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 카보 퓨란을 이용하여 관주처리에 의한 뿌리 침투에 의한 효과, 국소처리에 의한 표피 침투 효과, 그리고 잎침지처리에 의 한 표피 침투와 잎 침투 효과 등을 비교 분석하여, 약제 처 리 방법에 따른 약제처리 효율성과 약제 저항성 평가를 위 한 최적 평가 방법을 찾기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

시험약제

실험에 사용된 카보퓨란(Carbofuran)은 원제 70% 테크니 컬 등급을 사용하였으며 이는 농업과학원 작물보호과에서 분양 받았다. 잎침지와 관주처리, 미량국소처리에 사용한 카 보퓨란은 아세톤에 희석하여 카보퓨란 기준 10,000 ppm 농 도의 보관용액을 만들고 필요에 따라 처리 농도에 맞게 희 석하여 사용하였다. 3% 카보입제 4kg을 1,000 m² (300평)에 물 6cm를 대고 살포 시 농도는 약 2 ppm이 되어 이를 추천 농도로 이용하였다.

실험곤충 및 기주식물

실험 곤충으로 감수성 벼멸구는 농업과학원 작물해충과 사육실에서 1995년부터 약제에 노출시키지 않고 추정벼 유 묘에서 누대 사육되어온 벼멸구를 감수성 대조 계통으로 사 용하였으며, 저항성 벼멸구는 농촌진흥청 작물보호과에서 누대 사육 중인 감수성 대조계통 대비 카보퓨란에 대해 약 제 처리 19.2배의 저항성을 보이는 남해에서 채집된 계통을 추정벼를 이용하여 키워가면서 실험에 사용하였다. 벼멸구 의 먹이로는 벼씨를 살균제 베노람® 수화제(베노밀(20%)+ 티람(20%)) 200배 희석액에 하루 저녁 침지한 후 흐르는 물 에 씻고 물을 갈아주면서 물 속에서 발아시킨 후 실험 바트 (30 × 40 × 8 cm)에 가제를 깔고 발아 벼씨로 얇게 깔아 25°C 인큐베이터에서 물을 공급해 가면서 키운 유묘를 사 용하였다. 벼씨 짝이 1 cm 정도 자라면 인큐베이터에서 꺼내 실험실 아크릴 상에서 3 cm 정도 키워 실험에 사용하였다. 벼멸구 사육과 유묘 재배는 온도 25°C, 상대습도 80%, 광주 기 16:8의 실내 조건에서 이루어졌다.

관주처리 검정법

뿌리를 통한 식물체 내 침투 이행에 의한 카보퓨란의 흡 흡 독성 효과를 알아보기 위하여 관주처리 실험을 수행하였 다. 보관용액(10,000 ppm)으로부터 0.01% 트윈80 증류수로 추천농도의 50배(100 ppm)인 농도를 만든 후 증류수로 1/2 씩 희석하여 6개 농도로 만들어 관주 처리에 사용하였다. 각 농도 별 카보퓨란 약액을 25 ml씩 시험관(φ3 × 25 cm)에 채우고, 20일 이상 육묘상에서 자란 추정벼 유묘를 15개씩

탈지면에 말아서 시험관에 약액이 닿을 정도로 끼워 넣었다. 우화한지 3-5일 된 벼멸구 암컷 성충 30마리를 10마리씩 흡충기로 잡아 이산화탄소로 2초간 마취 후 각각의 농도로 처리된 유묘 시험관에 10마리씩 3개의 시험관에 접종, 망사로 막은 후 온도 25°C 실험실에서 보관하면서 6일 간 사충수를 조사하였다. 실험은 3반복으로 실시되었다.

침지처리 검정법

잎을 통한 식물체 내 카보퓨란의 침투이행에 의한 흡충독성과 잎 표면 부착 약제의 벼멸구 표피 침투에 의한 접촉독성을 알아보기 위해 침지처리 실험을 수행하였다. 보관용액(10,000 ppm)으로부터 0.01% 트윈80 증류수로 추천농도의 150배(300 ppm)의 약액을 조제 후, 증류수로 1/2씩 희석하여 6개의 농도를 만들어 사용하였다. 희석된 카보퓨란 6 농도의 약액에 20일 이상 육묘상에서 자란 추청벼 유묘를 위부분인 잎만을 1분간 침지하여 30분간 음건한 후, 25 ml씩 증류수를 채운 시험관에 처리된 유묘를 15개씩 탈지면에 말아 시험관에 끼워 물이 닿을 정도로 밀어 넣었다. 여기에 우화한지 3-5일 된 암컷 성충을 흡충기를 이용하여 시험관 당 10마리씩 3개의 시험관에 접종, 6일간 사충수를 조사하였다. 실험은 3반복으로 실시되었다.

국소처리 검정법

국소처리 실험은 살충제가 곤충 표피를 통해 체내로 직접 침투하여 독성을 나타내는 접촉독성 정도를 알아보기 위해

실시되었다. 보관용액(10,000 ppm)으로부터 아세톤으로 1/32배로 희석하여 처리 용액 (312.5 ppm)을 만들고, 이를 1/2씩 아세톤으로 희석하여 6 종류의 농도를 만들어 실험에 이용하였다. 20일 이상 육묘상에서 자란 추청벼를 15개씩 솥에 말아서 25 ml 물을 채운 시험관에 끼워 넣은 유묘 시험관을 준비하고, 흡충기를 이용하여 우화한지 3-5일 된 벼멸구 암컷 성충을 처리 농도 당 10마리씩 잡아 CO₂로 2초간 마취시킨 뒤, 각각의 농도로 희석된 카보퓨란 약액을 국소 처리기(Hamilton Micro dispense, PB-600)로 벼멸구 복부에 0.22 µl씩 처리하여 준비한 3개의 유묘 시험관에 10마리씩 총 30마리를 접종한 후 6일간 사충수를 조사하였다. 실험은 3반복으로 실시되었다.

결 과

관주처리(Root zone treatment)

작물체의 뿌리를 통한 카보퓨란 흡수, 즉 식물체내로 침투에 의한 독성 효과를 보는 관주처리 시험 결과 벼멸구의 사충율은 처리 후 경과 시간에 따라 높아지고 있다. 감수성 벼멸구의 흡충에 대한 영향은 높은 농도(8-30 ppm)의 처리에서 처리 일 수가 지남에 따라 사충율의 증가율이 낮아져 가는 로그 형태를 보이나, 낮은 농도(1-2 ppm)의 처리에서는 시간에 따른 사충율 증가 패턴이 초기에는 낮고 시간이 지남에 따라 사충율 증가율이 커지다 다시 낮아지는 S자 모양의 sigmoid 곡선의 형태를 보이고 있었다(Lee et al.,

Table 1. Probit analysis of Carbofuran bioassay to resistant BPH strain by three application method

Bioassay Method	Observation time (Day)	n	LC ₅₀	95% CL		χ ²	df	p	slope	Intercept
				Lower	Upper					
Drench Application (Root)	1 day	540	45.4	37.5	57.0	0.2	4	0.781	1.5829	-2.6232
	2 days	540	19.0	15.5	23.4	5.4	4	0.249	1.3060	-1.6710
	3 days	540	11.7	6.6	18.8	12.6	4	0.013	1.4828	-1.5849
	4 days	540	5.2	1.0	9.7	26.2	4	0.000	1.7387	-1.2404
	5 days	540	2.2	0.1	4.2	14.1	4	0.070	1.7208	-0.5842
	6 days	540	1.5	0.7	2.2	1.7	4	0.796	2.5011	-0.4739
Dipping Application (Leaf & Stem)	1 day	540	114.7	83.2	173.1	7.1	4	0.129	1.6848	-3.4699
	2 days	540	98.1	82.6	118.6	4.8	4	0.308	1.6536	-3.2931
	3 days	540	80.7	66.7	99.4	2.5	4	0.642	1.4190	-2.7061
	4 days	540	70.0	57.7	85.9	3.6	4	0.460	1.3867	-2.5585
	5 days	540	43.8	24.5	74.0	9.1	4	0.059	1.1165	-1.8329
	6 days	540	22.3	8.6	38.4	10.4	4	0.035	1.1143	-1.5020
Topical Application (BPH)	1 day	540	19.6	10.7	29.2	9.6	4	0.047	1.6848	-3.4699
	2 days	540	15.9	12.9	19.0	4.9	4	0.296	1.6347	-2.1132
	3 days	540	13.3	10.7	15.9	2.5	4	0.648	1.9849	-2.3871
	4 days	540	12.6	10.3	14.7	4.7	4	0.323	2.1758	-2.4477
	5 days	540	12.4	10.3	14.5	6.4	4	0.168	2.5446	-2.7997
	6 days	540	11.9	9.8	14.0	5.8	4	0.213	2.6734	-2.9276

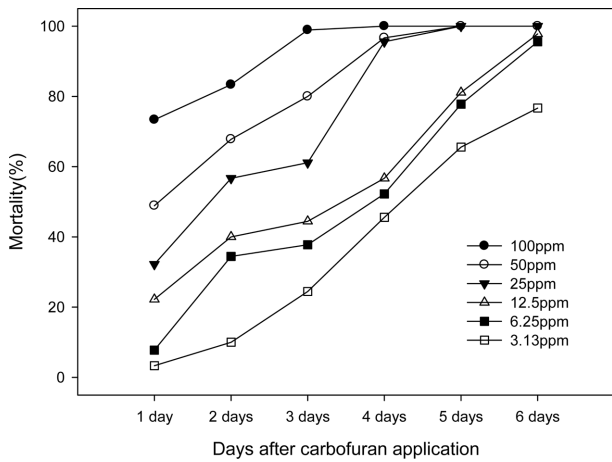


Fig. 1. Mortality of resistant BPH on the days after carbofuran treatment by drench application.

2017). 그러나 저항성 벼멸구는 낮은 농도인 3.13 ppm에서 만 S자 모양의 sigmoid 곡선의 형태를 보였고 그 모양도 감수성 벼멸구에서 보인 S형 사충율 증가 패턴보다(Lee et al., 2017) 좀 더 직선화된 S자 형태의 sigmoid 곡선의 형태를 보였다 (Fig. 1).

침지처리(Leaf and stem treatment)

침지 처리의 경우 처리 후 경과 시간에 따른 사충율의 차이가 감수성의 경우 30-45%인데 반해 저항성은 20-30%의 차이로 저항성에서 시간에 따른 사충율이 감수성에서보다 천천히 증가하고 있음을 보여주고 있다(Fig. 2). 침지 처리에서는 높은 농도의 처리에서도 약효가 낮으며 모든 농도에서 시간에 따른 약효 증가 속도가 낮아(감수성 45% 증가/6일간, 저항성 28%/6일간) 카보퓨란의 식물체나 충체 표피 침투에 의한 살충 효과 발현이 저항성 벼멸구에서 더 어렵다는 것 보여주고 있다. 저항성 벼멸구는 대체로 침지처리 후 4일까지는 사충율의 증가가 완만하여(평균 사충율 증가율 10.8%/4 농도), 감수성과 비교하여(평균 27.3%/4 농도) 사충율 증가율 거의 반 수준 이하의 증가율이었다. 이 후 다소 사충율 증가 속도가 빨라졌으나 감수성의 증가율에는 못 미치고 있다(Lee et al., 2017).

국소처리(Insect body treatment)

국소처리의 경우 처리 3일 이후에는 약효가 증가하지 않아(Fig. 3) 감수성과 거의 같은 경향을 보였는데(Lee et al., 2017) 약제 처리와 함께 3일 까지 약제의 낮은 침투율로 사충율이 소폭 상승하다 3일 이후 약효의 증가를 보이지 않아 카보퓨란은 접촉에 의한 약효 발현을 위해서는 표피의 낮은 투과성을 넘어설 수 있는 많은 양 즉 38 ppm 이상의 약제를 투입하여야 80% 이상의 살충율을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

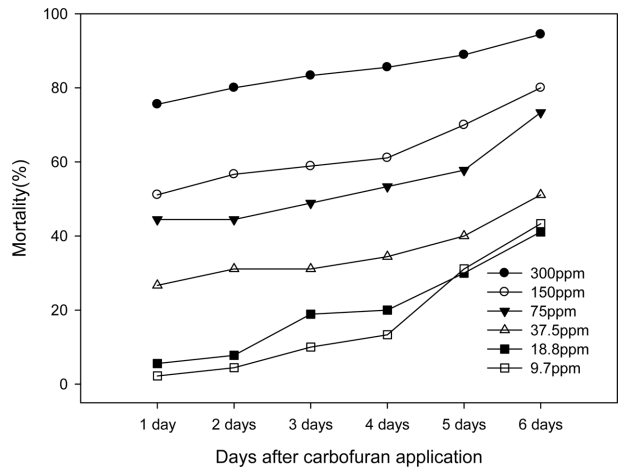


Fig. 2. Mortality of resistant BPH on the days after carbofuran treatment by dipping application.

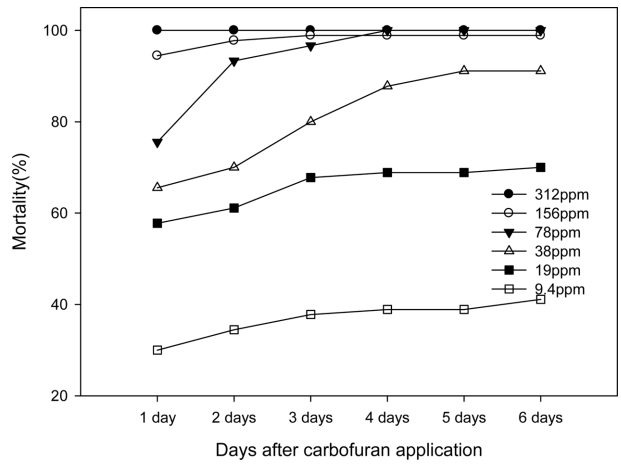


Fig. 3. Mortality of resistant BPH on the days after carbofuran treatment by topical application.

LC₅₀을 기준으로 한 최적 약효 조사 시점

처리 방법 별로 시간 경과에 따른 LC₅₀의 변화를 비교하여 약효의 발현 일을 추정하여 보면 그 패턴이 처리 방법 별로 차이를 보이고 있다. 시간이 지남에 따라 LC₅₀이 가장 큰 차이를 보이는 것이 관주처리였으며(Fig. 4) 침지처리 (Fig. 5)에서는 LC₅₀의 변화가 관주처리(Fig. 4)와 국소처리 (Fig. 6)와는 달리 일정하게 계속 줄어들어 저항성 벼멸구에서 침지에 의한 약효 판별 시기 결정에 다소 혼란을 주고 있다. 저항성 벼멸구의 경우 관주처리와 국소처리는 처리 후 경과 일수에 따른 LC₅₀의 변화를 보면 초기에 높고 3일 혹은 4일까지 급격히 줄어들며 그 후 변동율이 낮아는데 비해 침지처리의 경우는 계속 약제 영향을 받아 반수치사농도가 계속 줄어드는 경향을 보였는데, 침지처리는 표피 침투에 의한 살충력과 흡입에 의한 살충력이 동시에 작용함으로써 일어나는 현상으로 생각된다.

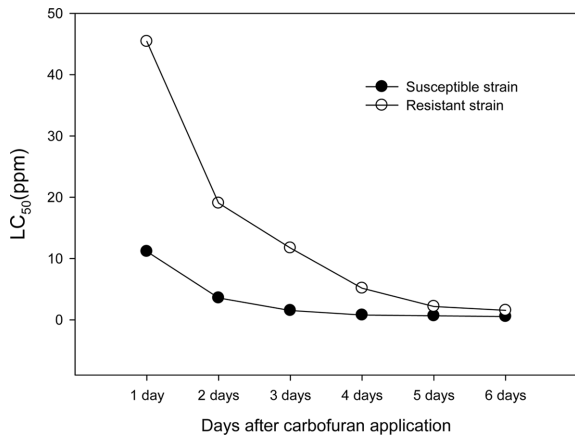


Fig. 4. LC₅₀ change of susceptible and resistant BPH to carbofuran by drench application.

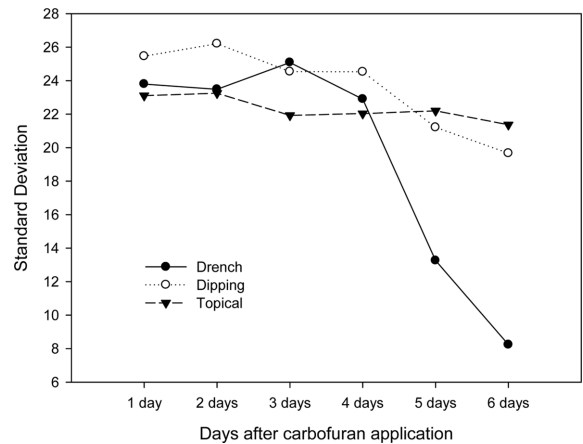


Fig. 7. Standard deviation of resistant BPH mortality at each day after carbofuran treatment by three application methods.

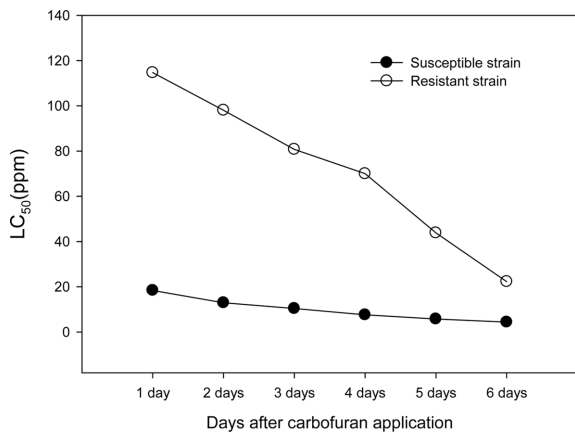


Fig. 5. LC₅₀ change of susceptible and resistant BPH to carbofuran by dipping application.

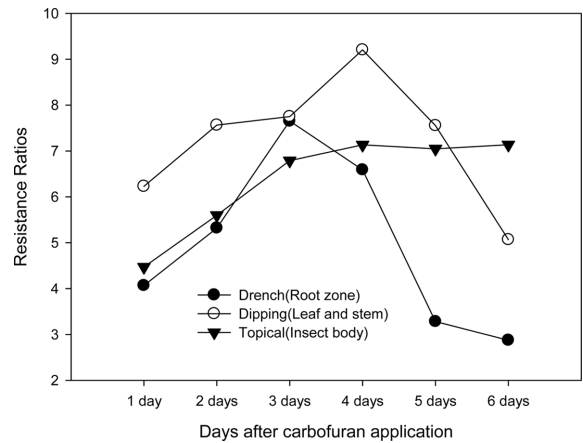


Fig. 8. Resistance ratios from LC₅₀ of resistant and susceptible BPHs by three carbofuran application methods.

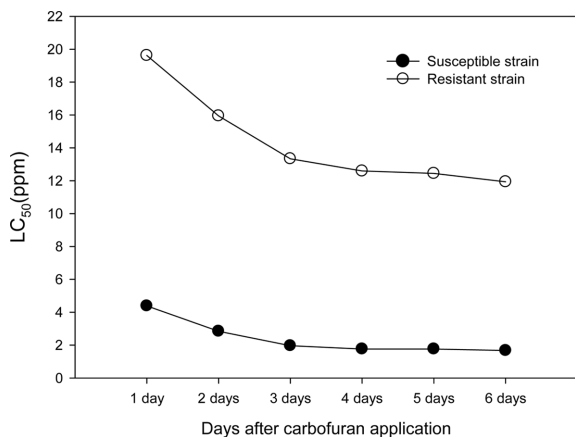


Fig. 6. LC₅₀ change of susceptible and resistant BPH to carbofuran by topical application.

사충율 편차와 약제저항성비를 기준으로 한 최적 약효 조사 시점

표준편차 변화에 의한 사충율 조사일은 처리후 높은 편차

의 변화가 적은 1-4일 후 모든 처리에서 최적 조사시기로 보인다(Fig. 7). 관주처리의 경우 LC₅₀을 기준으로 하는 저항성 비는 조사 일에 따라 3-7배의 차이(Fig. 8)를 보이고 있고 관주 처리의 경우 상대적으로 높은 저항성 비를 보이는 3일 후에 저항성비를 조사하는 것이 좋으리라 생각된다. 침지처리의 경우 LC₅₀에 의한 저항성비는 조사 시간에 따른 변화가 6-9배로, 최대 저항성 비를 보이는 시간은 처리 후 4일(Fig. 8)로 저항성 판별 최적 조사시간도 이를 따르는 것이 타당할 듯 보인다. 국소처리의 경우 LC₅₀은 3-7배로 3일까지 증가하고 있어(Fig. 8) 최적 저항성 조사일은 처리 후 3일이 예상된다.

고 찰

본 실험은 카보퓨란의 3가지 처리 방법에 따른 약효 발현 특성을 이용하여 약효와 저항성 발현 효과를 비교, 고찰함으로써 합리적인 해충의 약제 저항성 평가를 도모 하고자

실시되었다. 카보퓨란의 3가지 처리 방법 별 특성을 보면 관주처리는 농약이 뿌리에서 작물 체내로 흡수되어 해충이 식물체액을 흡즙(섭식)함으로써 약효를 나타내고(섭식독성), 미량국소처리는 충체에 부착된 약제의 표피 침투에 의한 접촉 독성이 주로 작용하여, 침지 처리는 잎 표면 부착 농약의 충체 표피 침투에 의한 접촉독성과 잎 표면에 부착된 농약의 식물체내 침투에 의한 흡즙(섭식)독성이 합쳐져 약효를 나타낸다. 따라서 침지처리에 의한 독성은 관주처리와 미량국소처리에 의한 독성이 합쳐져 나타난다고 볼 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 약제 처리 방법에 따른 약제의 효과를 분석하여 벼멸구의 저항성 발현과 저항성 평가에 영향을 주는 독성 작용의 요인을 추적하고, 이를 바탕으로 벼멸구의 약제저항성 평가에 대한 합리적인 방법을 모색하였다.

관주처리(Root zone treatment)

카보퓨란의 뿌리 흡수, 즉 식물체내로 침투에 의해 독성 효과를 나타내는 카보퓨란 관주처리 경우 약제 침투량은 처리 농도와 노출 시간에 의존하는데(Trevisan et al., 2004) 사충율도 이에 따라 달라진다(Lee et al., 2017). 저항성 벼멸구의 경우 처리 후 시간에 따른 사충율 증가 속도가 감소성과 다른 양상을 보이고 있는데 이는 저항성이 발달하면서 약제의 해독 능력이 높아져 침투되는 카보퓨란을 꾸준히 일정한 속도로 농약을 분해하다가(Yoo et al., 2002) 늘어나는 카보퓨란을 감당 못해 죽음에 이른다고 볼 수 있다. 카보퓨란은 처리 후 2-3일에 치사량에 이르게 되며, 높은 농도의 처리로 인한 침투농약의 증가로 사충률이 높아져 가는 것으로 보인다. 일반적으로 살충력의 발현은 노출 시간이 지남에 따라 약제가 체내에 축적되어 해독되고 남은 양이 치사량을 넘어감에 따라 사충율이 높아지는데(Dosono-Lopez and Frigarick, 1969), 감수성 벼멸구에서는 30 ppm의 농도에서는 하루 만에 치사율이 70% 정도 도달할 정도의 많은 카보퓨란 양이 체내로 흡수되었는데(Lee et al., 2017) 반해, 저항성 벼멸구는 저항성기작에 의해 침투된 많은 살충제를 해독할 수 있어(Yoo et al., 2002) 살충 효과 발현이 상당히 지연되어 감수성보다 낮은 기율기의 사충율 증가를 보이고 증가 폭도 크지 않으며, 사충율이 100%에 이르는 시간도 더 길게 나타나고 있는 것으로 보인다. 카보퓨란의 침투성 약효는 시간에 따라 흡수된 농약의 축적에 의해 계속 증가할 것이므로 실제 포장에서의 약효는 감수성과 마찬가지로 처리 5일 이후에도 사충율이 계속 높아질 것으로 예상된다. 실제 포장에서 카보퓨란의 살충 효과는 17일에서 30일간 지속되며(Aquino and Pathak, 1976; Bae et al., 1992; Bae and Hyun, 1987; Bautista et al., 1979; Pham et al., 2008), 약효 조사기간도 처리 후 30일 까지 일주일 간격 또는 10일 간격으로 조사하고 있다(Jotwani et al., 1979; Yen et al., 1997). 포장에서 살포되는 추천 농도 2 ppm(벼 재배에 있어서

논의 물을 평균 6 cm의 깊이로 유지하고 가정하고 10a 당 3% 카보퓨란을 4 kg을 살포할 경우 카보퓨란 농도는 약 2 ppm이 됨)으로 관주처리 될 경우 감수성 벼멸구의 경우 처리 5일 후에는 거의 100%에 달하는 사충율을 얻을 수 있었으며 그의 1/2인 1 ppm의 농도를 처리할 경우에도 계속되는 침투효과로 인한 카보퓨란의 지속적 체내 축적 효과로 처리 6일 후, 벼멸구의 사충율이 80%에 달하며 시간이 흐르면 더 높은 살충효과를 기대할 수 있으나(Lee et al., 2017) 저항성 벼멸구의 경우 3 ppm의 농도에서 5일 후 60%, 6일 후 70%의 사충율을 보였다. 그러므로 2 ppm의 추천 농도에서 저항성 벼멸구로부터 충분한 사충율을 얻기 위해서는 5일 이상의 시간이 필요하고 저항성 벼멸구의 방제를 위해서 카보퓨란을 사용하는 것은 무의미한 일로 대체 약제를 적극 추천하는 바이다.

침지처리(Leaf and stem treatment)

침지 처리의 경우 사충율이 감수성(Lee et al., 2017)에 비해 처리 후 경과 시간에 따라 천천히 증가하고 있음을 보여 주고 있다(Fig. 2). 침지 처리에서는 높은 농도의 처리에서도 약효가 낮으며 모든 농도에서 시간에 따른 약효 증가 속도가 낮아(감수성 45%/6일간, 저항성 28%/6일간) 카보퓨란의 충체 표피 침투에 의한 약효 발현이 저항성 벼멸구에서 더 어렵다는 것 보여주고 있다. 저항성 벼멸구는 대체로 침지처리 후 4일까지는 사충율의 증가가 완만하여 감수성(Lee et al., 2017)과 비교하여 거의 반 수준의 증가율이었다. 이 후 다소 사충율 증가 속도가 빨라졌으나 감수성의 증가율에는 못 미치고 있다.

국소처리(Leaf and stem treatment)

국소처리 결과가 침지처리의 경우와 다른 이유는 침지처리는 약제의 충체 표피 침입과 흡즙에 의한 소화관으로의 침투 피해가 같이 작용하므로 관주처리와 국소처리 효과가 함께 작용한 결과로 보이기 때문이다. 즉 침지처리는 식물체가 약액에 침지된 후 표피에 부착된 농약 중 일부는 벼멸구의 접촉에 의해 충체내로 들어가 효과를 나타냄과 동시에 일정 부분은 식물체 표피로 침투하여 흡즙에 의한 약제 체내 축적으로 약제처리 4일 이 후 사충율이 증가하는 현상이 나타나(Fig. 2) 국소처리는 처리 3일 후 약제 침입이 끝나 더 이상 사충율의 증가가 일어나지 않는 것으로 보인다(Fig. 3). 따라서 4일 이후의 사충율 증가는 식물체 표면에 부착된 농약의 식물체 침입에 의한 벼멸구 흡즙으로 일어난다 볼 수 있다. 이는 저항성 벼멸구에서 약제 관주처리 시 약효가 3일 이후 증가하는 현상과 일치하고 있다. 일반적으로 카보퓨란은 처리 후 2-4시간 후에 급격히 약제 침투 평형에 이르고 이 후 서서히 침투가 일어나는 것으로 알려져 있다(Liu and Kim, 2003; Salman, 2013). 이를 고려하

면 국소처리하는 처리 후 4시간 이내에 접촉에 의해 유효 약량이 이미 체내에 침투되었다고 판단할 수 있고, 이 후는 추후 접촉되거나 과잉 양이 처리되어 표피에 침착, 투과되지 않은 약제가 천천히 침투하여 약효가 서서히 증가하는 것으로 판단된다. 감수성의 경우와 마찬가지로 저항성 벼멸구의 경우도 단시간에 평형을 이룬 후 계속 천천히 침투하는 카보퓨란이 총체 내의 해독작용을 거치면서 2-3일 후까지 사충율을 천천히 높아지다가 이 후 체내 침투 약제가 감소하여 사충율이 증가하지 않는 것으로 생각된다. 3가지 처리 방법의 결과를 종합하여 보면 벼멸구에서 약제의 표피투과성 저하가 약제 저항성 발달의 한 요인이 됨을 알 수 있다.

LC₅₀과 사충율 편차를 기준으로 한 최적 약효 조사

처리 방법 별로 시간 경과에 따른 LC₅₀의 변화를 비교하여 약효의 발현 일을 추정해 보면 그 패턴이 처리 방법 별로 차이를 보이고 있다. 저항성 벼멸구에 대한 카보퓨란의 약효 평가 시기는 약효가 충분히 발현되는 시기, 즉 LC₅₀ 값이 낮아 지는 비율이 급격히 줄어드는 시기로 관주처리는 조사일이 처리 후 4일, 침지처리는 처리 후 4일, 국소처리는 처리 후 3일이 적절한 것으로 보인다. 또한 약효 평가 시 처리 방법 별 조사시기 결정에 대해서는 약제 간 혹은 처리 농도 간 사충율의 편차가 가장 큰 시기에 조사를 하는 것이 (Lee et al., 2017) 가장 합리적임을 선행 연구자들이 보고하고 있어(Lee et al., 2017; Jeong et al., 2019), 이들의 논문에 따른 최적 저항성 벼멸구에 대한 카보퓨란의 약효 조사 일은 앞으로 깊은 논의가 되어 결정되어야 할 것이지만 선행 연구자의 제안에 따라 반수 치사농도의 10% 이내의 증감은 같은 결과로 보면 관주처리 시는 1-4일, 침지처리 시는 1-4일, 국소 처리 시는 1-6일로 되어 LC₅₀의 변화에 따른 최적 약제 조사일을 포함하고 있어 LC₅₀과 표준편차에 의한 최적 조사일과 일치함을 보여준다. 다만 약제의 처리방법 별 처리 후 조사 일의 불일치에 의한 혼란을 피하기 위해 처리 방법에 관계없이 저항성 벼멸구에 대한 카보퓨란 약효 평가 조사일로는 처리 후 4일이 가장 합당한 것으로 보인다 (Fig. 7). 감수성 벼멸구에 대한 약효 평가 최적일이 약제 처리 후 2일로 저항성 벼멸구에서의 카보퓨란 약효 평가일 4일과 서로 달라 혼란을 야기할 수 있지만 해충의 약제저항성을 정확히 평가하기 위해서는 조사일이 서로 다름을 받아들이는 것이 합리적이라 판단된다.

약제저항성 비를 기준으로 한 최적 약효 조사

약제 저항성 평가를 위한 약제저항성 비는 약효 평가와는 개념이 다른, 감수성과 저항성 해충의 상대적 개념으로 반수치사농도 비율로 나타내므로 감수성 해충에 대한 약제 평가 시기에 따라 저항성 비가 달라진다. 따라서 저항성 해충에 대한 약효 평가 조사시기가 감수성과는 다를 것으로 판

단된다. 최적 약효 발현 시점과는 달리 약제저항성비를 기반으로 한 최적 조사 시간으로 관주처리 시 3일, 침지처리 시 4일, 국소처리 시 3일을 추천하는 바이다(Fig. 8). 이는 저항성 해충에 대한 약효 평가와 약제 저항성 평가의 조사 시기를 서로 달리해야 함을 말하고 있다.

저항성 벼멸구에 대한 카보퓨란의 최적 약효 조사 시기와 저항성 발현

카보퓨란의 저항성 벼멸구의 약효 평가를 위한 최적 약효 조사 일을 종합하면 LC₅₀과 약효 표준편차를 기반으로 한 최적 조사일은 약제 살포 후 4일로 감수성의 경우 약 2일보다 2일 늦으며, 약제에 대한 저항성을 판단하기 위한 최적 조사 일은 관주처리하는 카보퓨란 처리 3일 후, 침지처리는 카보퓨란 처리 4일 후와 국소처리는 카보퓨란 처리 3일 후로 처리 간 혼란을 없애기 위해 약제저항성 판단을 위한 조사일을 통합하면 처리 후 3일을 권한다. 결국 저항성과 감수성 계통 사이에 최적 조사 일과 1일 정도 차이가 있다. 결론적으로 정확한 약효와 저항성 평가를 위해서는 약제에 따라서, 혹은 처리 방법과 해충의 감수성, 저항성 계통에 따라서 약제의 조사 일이 달라져야 한다. 더욱이 포장에서의 카보퓨란의 벼멸구에 대한 약효는 약제 살포 후 시간이 지남에 따라 계속 늘어나므로 사충율이 최고에 달하는 시간에 약효가 평가되는 것이 합당하므로 이를 감안하여 실내 약효 실험에서 감수성 벼멸구에 대한 카보퓨란의 약효는 처리 후 2일(Lee et al., 2017), 저항성 벼멸구에 대해서는 4일, 그리고 저항성 비는 처리 후 3일에 조사하는 것을 카보퓨란의 약효와 저항성 평가를 위한 최적 조사일로 추천하는 바이다. 마지막으로 처리 방법에 따른 저항성 발현을 분석하면 관주처리와 국소처리의 저항성 비는 LC₅₀ 기준으로 1일 후 관주처리가 4.2 정도, 국소처리가 4.5 정도이고 2일 후에는 각각 5정도(Fig. 8)로 초기 카보퓨란의 저항성의 1/2은 약제 대사에 의한 생리적인 것으로 1/2은 표피의 약제 침투저항에 의한 것으로 판단되며, 시간이 지날수록 관주처리는 저항성 비가 떨어지고 국소처리는 저항성비가 줄지 않아 처리 3일 이후에는 총체 표면의 카보퓨란 침투가 저항성 발현에 더욱 중요하게 된다고 하겠다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010821)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

Literature Cited

Aquino, G. B., and M. D. Pathak (1976) Enhanced absorption and persistence of carbofuran and chlorodimeform in rice

- plant on root zone application under flooded conditions. *J. Econ. Entomol.* 69(5):686-690.
- Bae, Y. H. and J. S. Hyun (1987) Studies on the effects of systematic applications of several insecticides on the population of the Brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. I. Effects of some systemic insecticides of the early population. *Korean J. Appl. Entomol.* 26(1):9-12.
- Bae, Y. H., J. H. Lee and J. S. Hyun (1992) Effects of carbofuran soil incorporation on the early occurring rice insect pests and the brown planthopper. *Korean J. Appl. Entomol.* 31(4):536-542.
- Bautista, G. V., A. Bautista, A. H. Cruz and E. A. Heinrichs (1979) Soil incorporated carbofuran for control of rice whorl maggot and early stem borers. *Int. Rice Res. Newsl.* 4(4):15-16.
- Carson, R. (1962) *Silent spring*. Houghton Mifflin Co. New York. Anniversary ed (2002). 400 p.
- Chiu, S. (1980) Integrated control of rice insect pests in China. In *Rice Improvement in China and Other Asian Countries*. IRRI and CAAS, pp. 239-250.
- DiSanzo, C. P. (1981) Effect of foliar application of carbofuran and a related compound on plant-parasitic nematodes under greenhouse and growth chamber conditions. *J. Nematol.* 13(1):20-24.
- Dosono-Lopez, J. G. and A. A. Grigarick (1969) An evaluation of carbofuran for control of several stages of the rice water weevil in greenhouse tests. *J. Econ. Entomol.* 62(5):1024-1028.
- Dyck V. A. and B. Thomas (1979) The brown planthopper problem, IRRI Ed; *Brown Planthopper Threat to Rice Production in Asia*. IRRI, pp. 3-17.
- Jeong, I. H., S. W. Lee, J. K. Jeong and D. H. Kwon (2019) Toxicity Responses by Three Different Bioassay Methods and Establishment of Optimum Observation Time by Variances of Mortality in *Nilaparvata lugens* (Stål). *Korean J. Pestic. Sci.* 23(1):33-39.
- Josie, G. (2007) Better Planet: "Can A Maligned Pesticide Save Lives?" *Discover Magazine*. p. 34.
- Jotwani, M. G., P. Kishore, T. R. Sukhani and K. P. Srivastava (1979) Relative efficacy of carbofuran seed treatment and granular formulation of systemic insecticides for the control of sorghum shootfly. *Pesticides* 13(2):40-43.
- Kiritani, K. (1979) Pest management in rice. *Ann. Rev. Entomol.* 24(1):279-312.
- Korea Crop Protection Association (KCPA) (2014) *Agrochemicals Use Guide Book 2014*, 1440 p.
- Lee, S., J. K. Jung, B. Y. Seo and C. G. Park (2017) Optimal duration of determining the insecticidal effect of carbofuran on *Nilaparvata lugens* using different application methods. *Korean J. Appl. Entomol.* 56(4):351-356.
- Liu, K. H. and J. H. Kim (2003) *In vitro* dermal penetration study of carbofuran, carbosulfan, and furathiocarb. *Arch. Toxicol.* 77(5):255-260.
- Liu, X.-D., Q.-H. Sun (2016) Early assessment of the yield loss in rice due to the brown planthopper using a hyperspectral remote sensing method. *International Journal of Pest Management.* 62(3):205-213.
- Liu, Z., M. S. Williamson, S. J. Lansdell, I. Denholm, Z. Han and N. S. Millar (2005) A nicotinic acetylcholine receptor mutation conferring target-site resistance to imidacloprid in *Nilaparvata lugens* (Brown planthopper). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102(24):8420-8425.
- Mastumura M. and S. Sanada-Morimura (2010) Recent status of insecticide resistance in asian rice planthoppers. *JARQ* 44(3):225-230.
- Matsumura M., H. Takeuchi, M. Satoh, S. Sanada-Morimura, A. Otuka, T. Watanabe and D. V. Thanh (2009) Current status of insecticide resistance in rice planthoppers in Asia. In *Planthoppers; New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production Systems in Asia*. K. L. Heong and B. Hardy Ed. pp. 233-243. IRRI 460 p.
- Mochida, O., T. Suryana and A. Wahyu (1977) Recent outbreaks of the brown planthopper in Southeast Asia (with special reference to Indonesia). *The Rice Brown Planthopper*, pp. 170-191. *Food Fert. Technol. Cent. Asian Pac. Reg.* Taipei, 258 p.
- Nagata T., T. Kamimuro, Y. C. Wang, S. G. Han and N. M. Noor (2002) Recent status of insecticide resistance of long-distance migrating rice planthoppers monitored in Japan, China and Malaysia. *J. Asia-Pacific Entomol.* 5(1):113-116.
- Nauen R. and I. Denholm (2005) Resistance of insect pests to neonicotinoid insecticides: current status and future prospects. *Arch. Insect Biochem. Physiol.* 58(4):200-215.
- Paull, J. (2013) *The Rachel Carson Letters and the Making of Silent Spring*. Archived 2013-11-03 at the Wayback Machine, Sage Open, 3 (July):1-12.
- Pham, H. H., J. K. Kim, B. R. Choi and Y. H. Song (2008) Effects of root zone applications of some systemic insecticides for control of the Brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Korean J. Pestic. Sci.* 12(3):236-242.
- Richards, H (1999) *Beyond Silent Spring: Integrated Pest Management and Chemical Safety*. Edited by H.F. van Emden and D.B. Peakall. *Integrated Pest Management Reviews.* 4(3):269-270.
- Salman, J. M. (2013) Batch study for insecticide carbofuran adsorption onto palm-oil-fronds-activated carbon. *J. of Chemistry.* 2013:1-5.
- Scott, J. G. (1990) *Investigating Mechanisms of Insecticide Resistance: Methods, Strategies, and Pitfalls; Pesticide Resistance in Arthropods*. Roush, R. T. and B. E. Tabashnik, Ed. pp. 39-57. Chapman and Hall, New York, 303 p.
- Shukla, V. D. and A. Anjaneyulu (1980) Evaluation of systemic insecticides for control of rice Tungro. *Plant Disease.* 64(8):790-792.
- Soderlund D. M. and J. R. Bloomquist (1990) *Molecular*

- mechanisms of insecticide resistance; Pesticide Resistance in Arthropods, Roush, R. T. and B. E. Tabashnik, ed. pp. 58-96. Chapman and Hall, New York, 303 p.
- Trevisan, M. J., G. C. Baptista, L. R. P. trevisan and G. Papa (2004) Residues of carbosulfan and its carbofuran metabolites and 3-hydroxy-carbofuran in oranges. Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal-SP. 26(2):230-233.
- Varca, A. S. and R. Feuer (1976) The brown planthopper and its biotypes in the Philippines. Plant Prot. News 5:1-4.
- Wang, Y. H., C. F. Gao, Y. C. Zhu, J. Chen, W. H. Li, Y. L. Zhuang, D. J. Dai, W. J. Zhou, C. Y. Ma and J. L. Shen (2008) Imidacloprid susceptibility survey and selection risk assessment in field populations of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). J. Econ. Entomol. 101(2):515-522.
- Wen Y., Z. Liu, H. Bao and Z. Han. (2009) Imidacloprid resistance and its mechanisms in field populations of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål in China. Pestic. Biochem. Physiol. 94(1):36-42.
- Wu, S.-F., B. Zeng, C. Zheng, X.-C. Mu, Y. Zhang, J. Hu, S. Zhang, C.-F. Gao and J.-L. Shen (2018) The evolution of insecticide resistance in the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) of China in the period 2012-2016. Nature Scientific Reports, 8(4586):1-11.
- Yen, J. H., F. L. Hsiao and Y. S. Wang (1997) Assessment of the insecticide carbofuran's potential to contaminate groundwater through soils in the subtropics. Ecotoxicology and Environmental Safety. 38(3):260-265.
- Yoo, J. K., S. W. Lee, Y. J. Ahn, T. Nagata and T. Shono (2002) Altered acetylcholinesterase as a resistance mechanism in the brown planthopper (Homoptera: Delphacidae), *Nilaparvata lugens* Stål. Appl. Entomol. Zool. 37(1):37-41.

카보퓨란 처리 방법에 따른 약제 저항성 최적 평가 시기

정인홍 · 이시우¹ · 박창규² · 권덕호^{1*}

국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과, ¹한국농수산대학교 채소학과, ²한국농수산대학교 산업곤충학과

요 약 본 실험에서는 카보퓨란의 3가지 처리 방법에 따른 약효 발현 특성을 이용하여 약효와 저항성 발현 효과를 비교, 고찰함으로써 합리적인 해충의 약제 저항성 평가 시기에 대해 고찰하고자 한다. 저항성 벼멸구에 대한 카보퓨란의 LC₅₀ 변동을 기반으로 한 약효 평가 시기는 관주처리는 처리 후 4일, 침지처리는 4일, 국소처리는 3일이 적절한 것으로 보인다. 약효의 표준 편차를 기반으로 한 약효 최적 조사시기는 표준 편차의 10% 이내의 증감은 같은 결과로 보면 관주처리 시는 1-4일, 침지처리 시는 1-4일, 국소 처리 시는 1-6일로 되어 LC₅₀의 변화에 따른 최적 약제 조사 일을 포함하고 있다. 다만 약제의 처리방법 별 처리 후 조사일의 불일치에 의한 혼란을 피하기 위해 처리 방법에 관계없이 저항성 벼멸구에 대한 카보퓨란 약효 평가 조사일로는 처리 후 4일이 가장 합당한 것으로 보인다. 저항성비 조사 최적 시간은 관주처리 시 3일, 침지처리 시 4일, 국소처리 시 3일을 추천하는 바이다. 정확한 약효와 저항성 평가를 위해서는 약제에 따라서, 혹은 처리 방법과 해충의 감수성, 저항성 계통에 따라서 약제의 조사 일이 달라져야 한다.

색인어 벼멸구, 카보퓨란, 저항성, 최적시기, 처리방법