Original article KOREAN JOURNAL OF APPLIED ENTOMOLOGY

한국응용곤충학회지
Korean J. Appl. Entomol. 63(1): 13-23 (2024)
DOI: https://doi.org/10.5656/KSAE.2024.01.1.044

ⓒ The Korean Society of Applied Entomology
pISSN 1225-0171, eISSN 2287-545X

꿀벌 해충 등검은말벌 방제를 위한 화학 살충제 이용 가능성 평가

홍동의[1] · 정철의[1,2]*
[1]국립안동대학교 식물의학과, [2]국립안동대학교 농업과학기술연구소

Evaluation of The Susceptibility of Several Insecticides to Honey Bee Pest, *Vespa velutina nigrithorax* (Hymenoptera: Vespidae)

Dongeui Hong[1] and Chuleui Jung[1,2]*
[1]Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong 36729, Korea
[2]Agriculture Science and Technology Research Institute, Andong National University, Andong 36729, Korea

ABSTRACT: *Vespa velutina nigrithorax* du Buysson, 1905 is the invaded species in Korea since 2003. Since its importance as the honey bee pest, beekeepers use insecticides to kill the adult and immature hornets. However, its legality and effectiveness has not been confirmed. This study investigated the susceptibility of insecticides commonly used to control hornets by beekeepers in Korea. Eight insecticides were tested on adult worker and larvae by topical or oral treatment. Adults showed more than 70% mortalities from Clothianidin, Dinotefuran, and Carbosulfan treatment within 30 minutes. Bifenthrin and Cartap hydrochloride showed relatively low toxicity. The median lethal dose (LD_{50}) for Clothianidin, Dinotefuran, and Carbosulfan was 0.29, 0.65, and 2.21 μg/bee, respectively. In larval feeding test where 5th instar larvae were fed 3 times every 24 hours, the mortality began after second treatments. After 3rd treatments (72 h), all insecticides showed mortality more than 70%. The LD_{50} values of Clothianidin, Dinotefuran, and Carbosulfan to *V. velutina* were approximately 10 to 100 times higher than those to honey bee, *Apis mellifera*. This study provides the basic information of those chemical toxicities to Vespa hornet and honey bees.

Key words: Clothianidin, Dinotefuran, Selectivity, Invasion, Hazard

초 록: 등검은말벌은 우리나라 뿐 아니라 유럽지역에 침입한 꿀벌의 중요한 포식해충이다. 양봉가들이 살충제를 활용하여 밀도 억제를 시도하고 있으나 아직까지 실현가능하고 과학적 방법과 적용 가능성이 정형화되지 않았다. 본 연구는 양봉가들이 주로 사용하는 살충제를 가지고, 등검은말벌의 유충과 성충의 살충율과 반응 패턴을 조사하였다. Clothianidin, Dinotefuran, Carbosulfan은 처리 후 30분 내 70% 이상의 살충률을 보였으며, Bifenthrin, Cartap hydrochloride의 상대적으로 살충률이 낮았다. Clothianidin, Dinotefuran, Carbosulfan의 반수치사약량(LD_{50})은 각 0.29, 0.65, 2.21 μg/bee이었다. 5령 유충에 대한 24시간 간격으로 3회 연속 섭식 처리를 했을 때, 2일이후에 약효가 나타났고 72시간 후에는 모두 70% 이상 살충률을 보였다. 등검은말벌의 반수치사약량은 양봉꿀벌의 것보다 10-100배 더 높았다. 향후 이 살충제를 말벌 방제에 이용할 수 있을지 추가적 검토가 필요하다.

검색어: 착농송환법, 클로티아니딘, 디노테르판, 선택성, 생물침입, 위해성

0기후변화 및 국제교역 등의 이유로 외래생물의 침입사례가 증가하고 있다(Jung, 2012a). 우리나라에 유입된 외래생물은 2011년 기준 총 1,109종(동물 800종, 식물 309종), 2021년 기준 총 2,149종(동물 1,812종, 식물 337종)으로 약 10년 동안 두 배 가까이 증가하였다(Son et al., 2021). 생물 침입 발생 시 잠복기를 가지다가 번식을 반복해 충분한 개체군이 이루어지면 본격적인 팽창과 확산이 시작된다. 이후 침입한 생태계 내 지위를 획득하고 안정화되며 귀화종으로 분류되기도 한다(Ruiz and Carlton, 2003). 외래생물은 토착 생물과의 경쟁, 먹이사슬 교란, 물질순환과 같은 물리 화학적 특성을 변화시켜 생물 다양성을 해치는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2013).

***Corresponding author:** cjung@andong.ac.kr
Received August 28 2023; **Revised** January 26 2024
Accepted February 7 2024

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

등검은말벌(*Vespa velutina*)은 인도, 중국 남부, 동남아시아 등 열대-아열대 지역이 원산지인 말벌류로(Carpenter and Kojima, 1997), 국내에 침입한 아종은 *V. velutina nigrithorax* Buysson, 1905이다. 유럽의 경우 2003년 프랑스 남부에서 보고된 이후 스페인, 벨기에 등으로 확산하기 시작하였다(Rodriguez-Flores et al., 2019; Villemant et al., 2006; Rome et al., 2013). 우리나라에서는 Kim et al. (2006)에 의하여 2003년 부산 봉래산에서 처음 보고되었다. 침입 이후 연간 약 12 km/yr 속도로 북상하여 현재는 전국적인 분포를 보인다(Jung, 2012b; Kim et al., 2023). 토착 말벌류(Genus: Vespa)와 유사한 생활사를 지녔으나 뛰어난 비행 능력과 긴 활동 시간 등으로 비교적 큰 규모의 집단을 형성한다(Jung, 2012a). 1년 동안 한 말벌집에서 최대 13,000마리의 일벌을 생산할 수 있고, 생식벌 시기에는 최대 500마리 이상의 처녀 여왕벌이 출현한다(Jung, 2012a; Rome et al., 2015). 이와 같은 특징뿐 아니라 꿀벌에 대한 먹이 선호도 또한 높기 때문에 먹이원이 대량으로 분포해있는 양봉장을 방문해 양봉산업에 경제적 피해를 입힌다(Jung et al., 2007).

등검은말벌은 벌통 입구 주위를 비행하다 꿀벌을 낚아챈 후 주변 나뭇가지에서 큰턱으로 경단으로 만들어 말벌집으로 가져가는 사냥 행동을 보인다(Abrol, 1994; Rojas-Nossa and Calviño-Cancela, 2020). 집단 사냥을 하는 장수말벌과 달리 단독 사냥을 하나(Jung, 2012b; Choi et al., 2012), 등검은말벌 한 마리가 하루에 약 10마리의 꿀벌을 사냥할 수 있다고 보고되어 있으며(Tan et al., 2007), 평균 사냥 성공률이 84.2%로 비교적 높기 때문에 큰 피해를 입힌다(Choi, 2020). Rojas-Nossa and Calviño-Cancela (2020)은 등검은말벌에 의해 양봉장 봉군의 80% 이상이 폐사하였다고 보고하였으며 경남 지방에서는 말벌에 의한 피해 중 93%가 등검은말벌로 보고되었다(Jeong et al., 2016).

이와 같은 말벌류 피해를 줄이기 위해서는 동면에서 깨어난 여왕벌을 포획해 가을철 잠재적인 개체군 수를 줄이는 방법과(Sim et al., 2014), 피해가 가장 극심한 가을철에 일벌을 집중적으로 방제하는 방법이 있다. 적절한 방제 시기 선택을 통해 양봉 꿀벌 봉군의 월동 성공률을 높일 수 있고, 이듬해 양봉 산물을 안정적으로 생산할 수 있다. 현재 국내에서 주로 사용되는 방제법은 당액이 포함된 유인 트랩을 이용해 양봉장에 방문하는 일벌을 포획하는 것이다. 말벌 유인 트랩은 당류가 포함된 유인제와 콘 형태의 트랩이 시중에 판매되며, 양봉농가에서 자체 제작해 사용되고 있다. 그러나 등검은말벌만을 선택적으로 유인하지 못하고(Kang et al., 2016), 방제 효율성이 부족하다. 해외에서는 꿀벌만 통과할 수 있는 줄에 전류가 흐르는 하프 트랩(Rojas-Nossa et al., 2022), 독성 미끼를 이용해 접촉한 일벌과 둥지의 유충을 제거할 수 있는 방법(Sackmann et al., 2001), 벌통 입구에 꿀벌만 통과할 수 있는 벌통 보호망을 씌우는 Beehive muzzle 등(Turchi and Derijard, 2018) 보다 다양한 방제법을 사용하고 있지만 큰 효과를 보지 못하고 있다.

기존에 사용된 방제법은 양봉장에 방문하는 말벌을 대상으로 유인, 포획, 살충하는 방식이다. 그러나 말벌집을 찾아 직접 제거하는 것이 가장 효율적인 방법으로 알려졌다(Kennedy et al., 2018). 등검은말벌은 높은 나무에 집을 짓기 때문에 여름에는 초목이 우거져 이를 발견하기 어렵다(Rome et al., 2015; Franklin et al., 2017). 그러나 양봉장에 찾아오는 말벌에 화학 살충제를 도포하여 둥지로 돌려보내는 착농약송환법을 사용하면 둥지를 발견하지 않고도 콜로니 자체를 방제할 수 있다는 보고가 있으며(Jang et al., 1994), 좀말벌을 대상으로 한 선행연구 결과 둥지 내부에 충분히 약제를 전파할 수 있음을 확인하였다(Kim et al., 2021). 그러나 약제를 도포한 말벌을 방사하는 방식이기 때문에 비표적 생물 및 공간에 위해를 가할 수 있어 사용에 각별한 주의가 요구된다.

본 연구에서는 농민들이 직접 사용하는 약제를 탐색하고 이에 대한 정량적인 살충효과를 검정하였다. 또한 선발된 약제의 최적농도를 구명하고 꿀벌 위해성을 포함해 말벌 방제 약제를 평가하였다. 이를 통해 살충제를 이용한 등검은말벌 방제 가능성을 제기하고자 한다.

재료 및 방법

실험 곤충

2022년 9월 23일 안동시 북후면(36°41′41.05″N, 128°44′4’8.04″E)에 위치한 등검은말벌집을 사다리차를 이용해 훼손되지 않게 수거하였다. 터널형 온실 프레임에 매쉬를 씌운 야외 말벌 사육장(36°32′48.71″N, 128°48′8.61″E) 내로 이동시켰으며, 50% 자당 용액을 제공하며 공시충으로 이용하였다. 포충망으로 함께 채집해온 외부 일벌과 벌집 내부에 있는 일벌을 채집 당일 실험에 사용하였다.

시험 약제 선정

전국의 20개 양봉 농가를 대상으로 말벌류 방제에 사용된 이력이 있는 화학 살충제를 유선상 설문 형식으로 조사하였다(Table 1). 총 8가지 살충제를 선발하여 실험에 사용하였다(Table 1). 클로티아니딘(Clothianidin)과 디노테퓨란(Dinotefuran)은 네오니코티노이드 계열 살충제로 곤충의 중추신경계에 분포하

Table 1. Eight insecticides selected from the beekeepers' questionnaires survey and their frequencies of use for control Vespa hornets

Pesticides	Product	code[d]	*a.i.* (%)	RC[e] (*ai* mg/ml)	Frequency (%)
Clothianidin SC[a]	Saesimi	4a	8	0.04	73.4
Clothianidin WP[b]	Bigcard	4a	8	0.04	40.7
Carbaryl WP	Sevin	1a	50	0.5	11.1
Dinotefuran WP	Ohsin	4a	8	0.08	18.5
Dinotefuran,Etofenrox WP	Cheongsil hongsil	4a, 3a	13	0.13	3.7
Bifenthrin WP	Tasta	3a	2	0.02	7.4
Carbosulfan SC	Manropo	1a	20	0.2	7.4
Cartap hydrochloride SC[c]	Padan	14	50	0.5	3.7

[a]Suspension Concentrate, [b]Water Powder, [c]Soluble Concentrate, [d]Code; 1a=inhibition of acetylcholinesterase, 3a=sodium channel regulation, 4a=blocking neurotransmitter receptors, 14=blocking neurotransmitter receptor pathway, [e]RC: recommended concentration

는 시냅스 후 니코틴성 아세틸콜린 수용체에 결합하여 과흥분시키는 기작을 지니고 있다(Simon-Delso et al., 2015; Ji, 2022). 네오코티노이드 계열 살충제는 개발 당시 곤충 중추신경계에 특이적으로 작용하며 포유류에 저독성으로 알려져 각광받는 살충제였으나(Jeschke and Nauen, 2008), 이후 조류 및 꿀벌에 대한 고독성이 보고됨에 따라 유럽에서는 사용이 금지되었다(Gross, 2013). 카바릴(Carbaryl)은 카바메이트 계열 살충제로 아세틸콜린에스터라제(AChE)를 저해해 신경 기능을 저해시킨다(Fukuto, 1990). 에토펜프록스(Etofenprox)와 비펜트린(Bifenthrin)은 합성 피레스로이드 계열 살충제로 나트륨 통로에 이상을 주어 반복흥분을 통해 곤충을 마비시킨다(Narahashi, 1971). 카탑하이드로클로라이드(Cartap hydrochloride)는 네레이스 톡신 유사체로 신경전달물질 수용체와 아세틸콜린이 결합해 신경전달물질 수용체 통로를 폐쇄시킨다(Sattelle et al., 1985).

유충 대상 섭식 감수성 평가

등검은말벌 유충은 추천농도로 희석한 약제를 경구로 투여해 섭식에 의한 독성을 평가하였다. 각 살충제 별로 5령 유충을 10마리씩 3반복하여 실험에 사용하였으며, 섭식 거부를 고려해 분유(임페리얼분유XO, 세종, 대한민국), 설탕, 약제 희석액을 2:1:5 비율로 희석해 투여하였다(Table 2). 0, 24, 48 h에 50 µl씩 경구로 총 3번 처리하였으며 최초 급여 후 0.5, 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120 h까지 생충수를 조사하였다. 물리적 자극을 주어 움직임이 없거나 검게 변한 개체는 사망한 것으로 판단했다.

성충 대상 접촉 감수성 평가

등검은말벌 성충은 추천농도로 희석한 약제를 가슴에 국부

Table 2. The amount of active ingredient (*a.i.* µg) in 50µl pesticide solution for *V. velutina* adult topical application or larval feeding

Pesticides	Adult			Larvae
	RC*	RC/10	RC/10^2	
Clothianidin SC	2	0.2	0.02	1.25
Clothianidin WP	2	0.2	0.02	1.25
Carbaryl WP	25	2.5	0.25	15.63
Dinotefuran WP	4	0.4	0.04	2.5
Dinotefuran,Etofenrox WP	6.5	0.65	0.065	4.06
Bifenthrin WP	1	0.1	0.001	0.63
Carbosulfan SC	10	1	0.1	6.25
Cartap hydrochloride SC	25	2.5	0.25	156.25

*RC: Recommended Concentration

접촉시켜 살충제에 대한 약효를 검정하였다. 가슴 등판에 접촉된 살충제는 날개짓, 청소 행동 등에 의해 자신을 비롯한 주변에 전파할 수 있을 것으로 가정하였다(Jang et al., 1994; Kim et al., 2021). 마이크로 피펫(Axygen 10-100 µl, Poland)을 사용해 가슴 등판에 50 µl씩 도포하였다. 도포 시 털에 의해 약액이 묻지 않을 것을 대비해 피펫 팁을 가슴에 마찰시켰다. 무처리구는 증류수를 같은 방식으로 처리하였다. 약제를 처리한 등검은말벌 성충은 175 ml 플라스틱 용기에 담아 25°C에서 개별 관리하였으며 천공한 1.5 ml 마이크로 튜브(MCT-150-C, Axygen, 폴란드)로 매일 신선한 50% 자당 용액을 공급해주었다. 살충제 별 10마리씩 3반복하여 총 30마리를 처리하였다. 약제 처리 후 0.5, 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72 h에 생충수를 조사하였다. 물리적 자극을 주어 움직임이 없는 개체는 사망한 것으로 판단했다.

약제 처리 후 높은 사망률을 보이는 약제는 추천농도의 10, 100배 농도로 처리하여 반수치사약량을 산출하였다(Table 2).

자료 분석

각 실험은 약제 처리 1 h와 12 h의 생충수를 조사하여 SAS 프로그램으로 Proc probit 분석을 진행해 성충에 대한 반수치사약량(LD_{50})를 산출하였다. 등검은말벌과 꿀벌에 대한 반수치사약량을 비교하여 농업과학원 환경생물 독성 평가 기준을 적용하여 독성 평가를 비교 분석하였다.

결 과

유충 대상 섭식 감수성 평가

모든 처리구에서는 약제 처리 후 24시간에서 첫 사망 개체가 기록되었다. 카바릴, 디노테퓨란, 클로티아니딘 등의 살충제는 48시간부터 급격한 사망률 증가를 보였으며, 비펜트린과 카탑하이드로클로라이드는 72시간 전에는 반수치사에 이르지 못하였다. 3회 급여 후 72 h에 모든 약제의 사망률이 급격히 상승했으며 카바릴과 디노테퓨란은 모든 개체가 사망하였다. 약제 희석액을 급여하기 시작한 지 5일 후 비펜트린과 카탑하이드로클로라이드를 제외한 모든 약제가 100% 사망률을 보였다(Fig 1).

성충 대상 접촉 감수성 평가

8가지 살충제 중 가장 살충효과가 빠르게 나타난 살충제는 클로티아니딘과 디노테퓨란이었다. 해당 주성분이 포함된 네 가지 살충제(클로티아니딘 액상수화제, 클로티아니딘 수화제, 디노테퓨란 수화제, 디노테퓨란-에토펜프록스 수화제)는 약제 접촉 30분 이내에 80% 이상의 사망률을 기록하였으며, 1시간 이후 모든 개체가 사망하였다. 카보설판 액상수화제와 카바릴 수화제는 접촉 1시간 후 사망률이 급격히 증가하기 시작하였으며, 6시간 후 각각 80, 60%로 안정화되었다. 반면 비펜트린 수화제와 카탑하이드로클로라이드 수용제는 접촉 후 72시간이 지나도 반수 치사에 이르지 못하였다(Fig. 2).

8가지 약제 중 가장 효과적인 3가지 약제(클로티아니딘 액상수화제, 디노테퓨란 수화제, 카보설판 액상수화제)를 대상으로 농도를 낮추어 실험한 결과, 추천농도와 비교해 늦은 살충효과를 보였다. 모든 처리구에서 약제 접촉 30분 후 20% 이하의 사망률을 보였다. 그러나 클로티아니딘 4 ppm은 6 h 후 모두 사망하였고 0.4 ppm은 70% 이상이 사망하였으며 점차 안정되었다. 디노테퓨란 두 농도(8, 0.8 ppm)의 사망률 모두 약제 접촉 12 h 후까지 40% 미만이었으나 72 h 후 100%를 기록하였다. 카보설판의 경우 두 농도(20, 2 ppm) 모두 72 h 후 반수 치사 수준에 머물렀다(Fig 3, Fig 4).

꿀벌 선택 독성 평가

클로티아니딘, 디노테퓨란, 카보설판은 국내 환경생물독성 평가 기준에 따라 꿀벌에 대한 고독성 약제로 등록되어있다(LD_{50} < 11 μg/bee). 세가지 살충제에 대한 등검은말벌의 반수치사약량은 꿀벌과 비교해 월등히 높았다(Table 3). 클로티아니딘과 디노테퓨란의 등검은말벌에 대한 반수치사약량은 0.29 μg, 0.65 μg으로 꿀벌의 0.03 μg, 0.06 μg과 비교해 약 89.6%, 90.% 가량 높았다. 카보설판에 대한 등검은말벌의 반수치사약량은 2.21 μg, 꿀벌은 0.18 μg으로 월등히 높았다(91.9%). 등검은말벌에 대한 세 약제의 반수치사약량은 꿀벌과 비교해 높았으나 11 μg 이하로 선택성은 없는 것으로 판단된다(Table 3).

고 찰

동일한 약제에 대한 반수치사약량은 꿀벌과 비교해 높았다. 반수치사약량은 감수성에 따라 다르지만 공시생물이 커질수록 약제가 희석될 가능성이 높다. 또한 반수가 치사되는 약량을 kg당 mg으로 산출한 것이기 때문에 대상 생물의 무게에 비례하는 것이 일반적이다(Akhila et al., 2007). 등검은말벌 일벌의 평균 체중은 140-475 mg으로(Kennedy et al., 2018) 꿀벌의 평균 체중인 115-128 mg보다 무겁기 때문에(Harbo et al., 1993; Meikle et al., 2008) 이와 같은 것으로 판단된다. 또한 꿀벌에 대한 독성을 평가할 때 처리되는 약량은 1-5 μl 수준으로(Iwasa et al., 2004) 본 연구에서 처리된 50 μl보다 확연히 적기 때문에 이의 영향도 있을 것으로 사료 된다.

등검은말벌의 유충은 단백질원을 먹이로 하기 때문에 성충은 경단화한 먹이를 급여한다(Rome et al., 2021). 국외에서는 이러한 생태학적 특징을 겨냥해 독성 단백질 미끼를 이용한 방제가 시도 되었다(Barandika et al., 2023). 본 연구에서는 이와 연관해 벌집 내 활동에 의해 살충제가 먹이에 전파될 것을 고려하였다. 유충의 감수성은 약제마다 차이는 있었으나 2회 이상 섭식 시 본격적인 살충효과를 나타내었다. 이는 유충의 섭식 거부를 고려해 약제 희석액, 분유 가루, 설탕을 혼합하여 급여했기 때문에 투입되는 약제의 총량이 감소하였기 때문으로 사료된다. 또한 실험에 같은 5령 유충의 평균 무게는 일벌 성충보다 상대적으로 무겁기 때문에 치사에 필요한 약량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 아세타미프리드, 디메토에이트 등의 약제는 꿀벌 유충에 대한 반수치사약량이 성충보다 높은 것으로 보고되었다(Aupinel et al., 2010; Ulziibayar et al., 2021; PPDB,

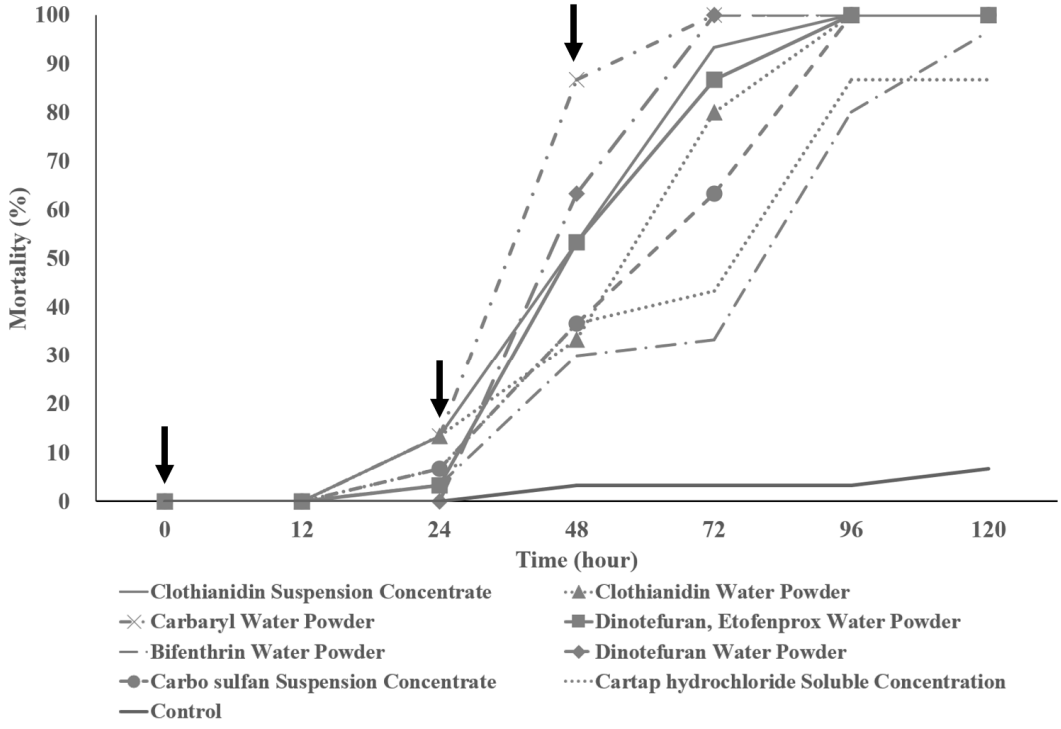

Fig. 1. Cumulative change of *V. velutina* larval mortalities (%) after feeding of insecticide-diluted solution. Milk powder, sugar, pesticide solution were mixed at a ratio of 2:1: 5. 5th instar larvae was used, and treated 3 times, 50μl every 24 hours(↓).

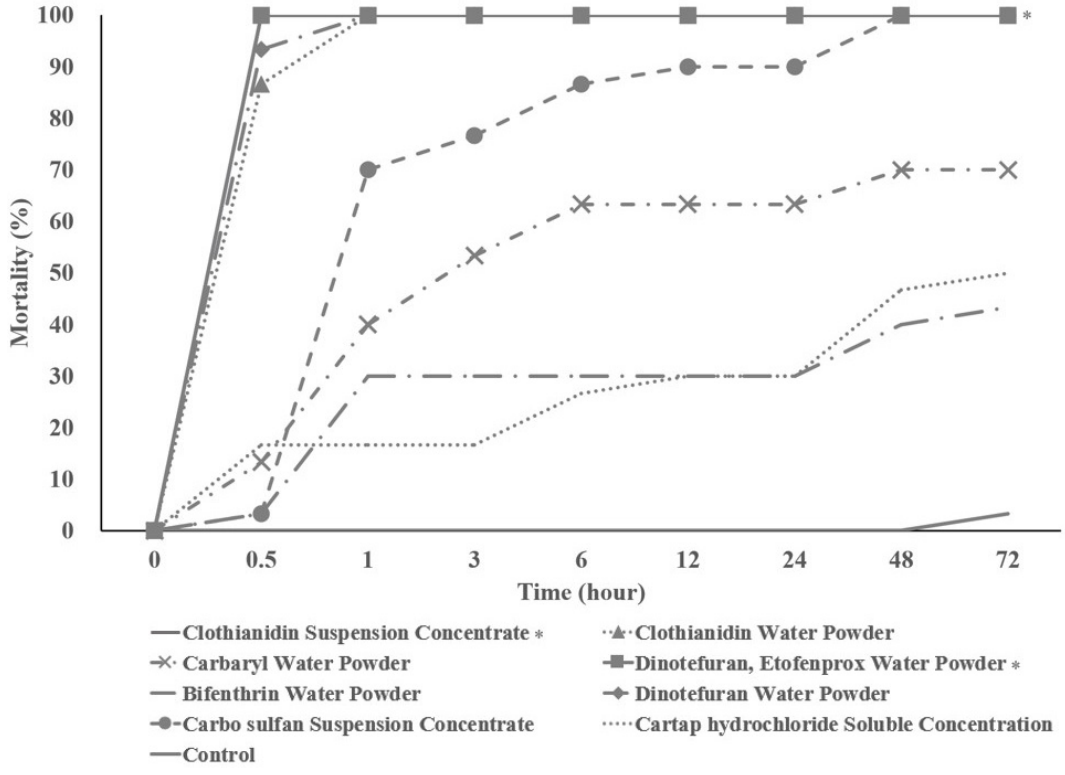

Fig. 2. Temporal changes of adult mortality of *V. velutina* after thorax topical treatments of insecticides. All insecticides were diluted to the recommended concentration. It was applied by 50μl with a micro pipette into dorsal part of thorax. * Two insecticides showed the same response.

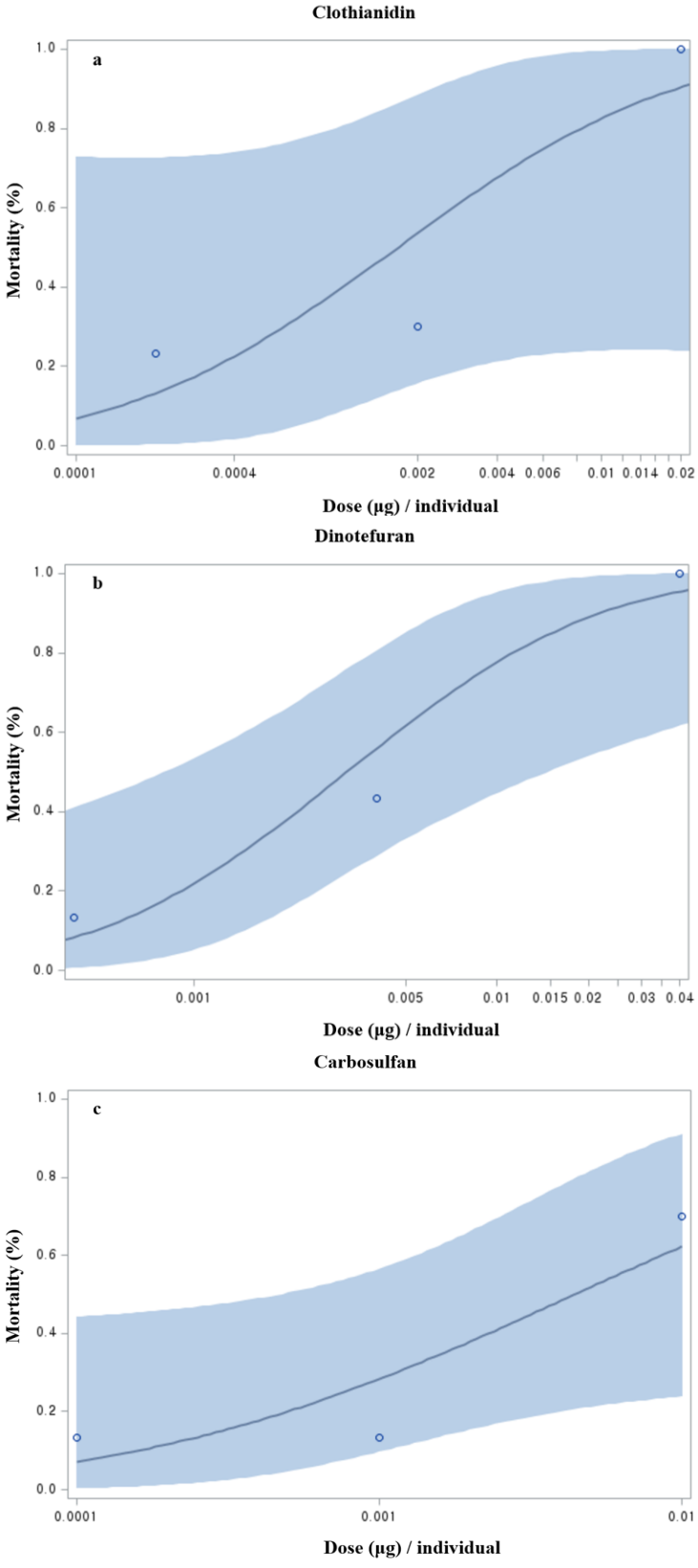

Fig. 3. Dose-mortality relationships of three insecticides to the adult *V. velutina* after 1 hr of topical treatment; (a) Clothianidin (y = 41.247x + 0.1793), (b) Dinotepuran (y = 21.091x + 0.1634) and (c) Carbosulfan(y = 5.9654x + 0.101).

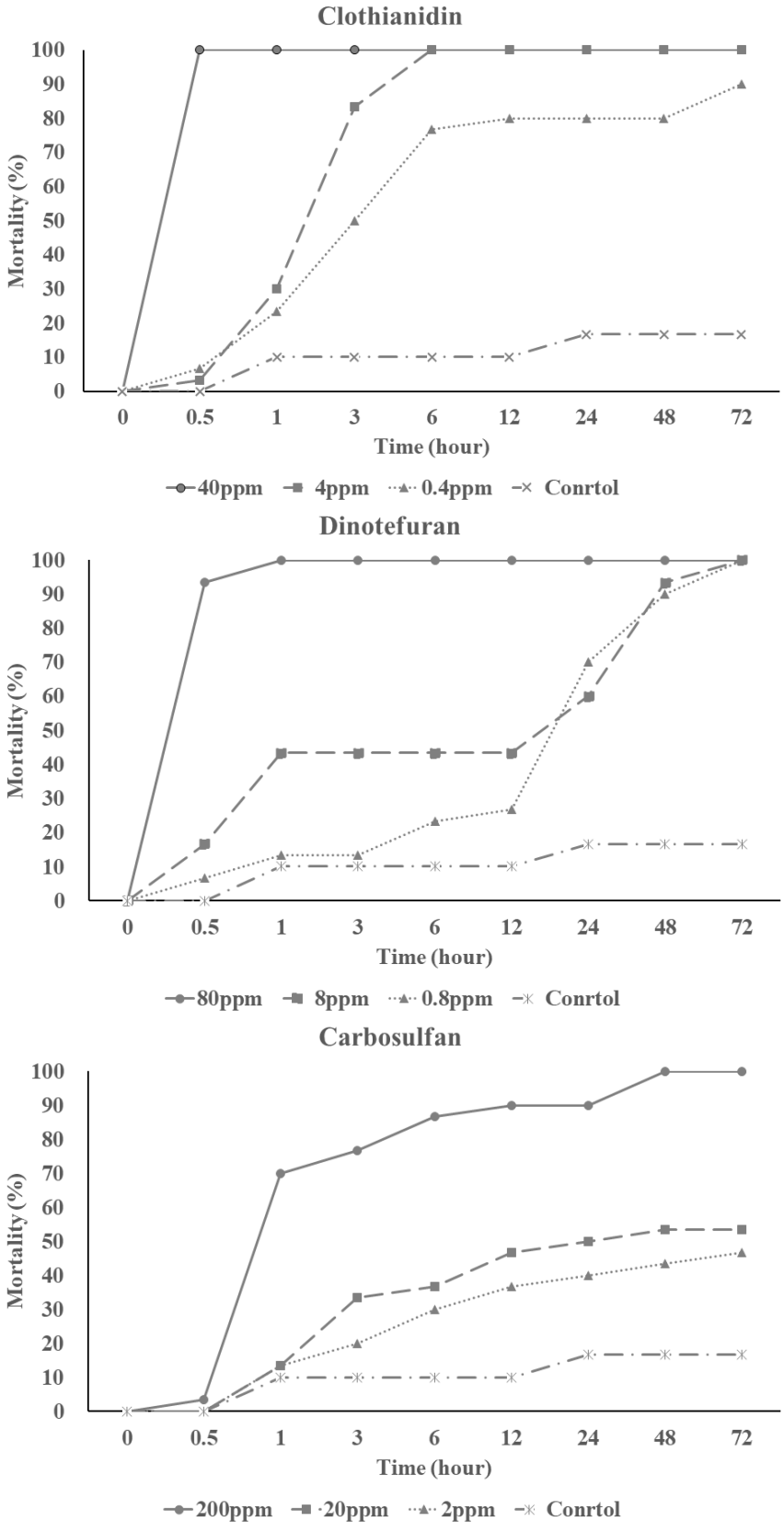

Fig 4. Temporal changes of Mortality (%) of *V. velutina* adult after 1 hr of topical treatments of Clothianidin, Dinotepuran, and Carbosulfan.

Table 3. Comparison of median lethal dose (LD_{50}) of *V. velutina* and *Apis mellifera* and for 3 pesticides. The LD_{50} of *V. velutina* was estimated from 1 HAT (hour after treatment) in this study, and the values for *A. mellifera* were collected from the literatures

Pesticide	LD_{50} of *V. velutina* (μg/individual)	LD_{50} of *A. mellifera* (μg/individual ± SE)*
	1 HAT	24 ~ 48 HAT
Clothianidin	0.29	0.03 ± 0.005
Dinotefuran	0.65	0.06 ± 0.010
Carbosulfan	2.21	0.18

* Source data listed in the appendix 1.

2022). 그러나 전반적인 약제에 대한 감수성은 성충과 유사한 점을 확인할 수 있었다.

말벌속(Vespa) 곤충의 유충 기간은 환경에 따라 다르지만 약 12일 전후로 보고되었다(Chen and Tong, 2004). 그러나 5령 유충을 사용한 본 연구에서는 조사기간 내(5일) 용화한 개체는 발견되지 않았다. 말벌 유충은 성충에게 공급받는 동물성 단백질을 주로 섭식하나(Ishay and Ikan, 1968), 본 연구에서는 용이한 섭식 및 약제 적용을 위해 단백질 함량이 높은 분유를 희석해 사용했다. 먹이를 섭식한 대부분의 유충은 육안 관찰 시 표면의 윤기가 사라지고 활동성이 적어지는 경향을 보였다. 무처리구의 사망률은 10% 이하였으나 상태의 변화는 동일하였다.

성충 접촉 독성 실험 시 약제를 희석하고 처리함에 있어 전착제를 사용하지 않았다. 대부분의 곤충의 털은 방수 효과를 지니고 있기 때문에(Crisp and Thorpe, 1948), 약제 희석액이 담긴 피펫을 등검은말벌의 가슴에 직접 마찰시켜 접촉을 확인하였다. 같은 방식으로 처리한 control의 경우 사망률이 10% 이하였으나 살충제 처리구의 경우 직접적인 마찰에 의한 영향을 고려해야 한다.

착농약송환법 사용 시 약제를 도포한 말벌이 말벌집까지 도달해야 한다. 단순히 약효가 빠른 약제보다는 말벌의 비행 속도, 양봉장과 말벌집사이의 거리와 지형 등을 고려해야 한다. 등검은말벌의 비행 속도는 평균 6.66±2.31 m/s로 기록되었으며 양봉장과 말벌 집 사이의 거리는 평균 395±208 m로 보고되었다(Lioy et al., 2021). 국내에서 등검은말벌은 대부분 양봉장 인근 1 km 내 서식하며 비교적 가까운 곳에 둥지를 짓는다(Jung, 2012a,b). 또한 국내 양봉장의 약 57.8%는 농경지, 30.3%는 산간지역에 위치하며(Kim et al., 2011) 이에 따라 지형이 미치는 영향도 함께 고려해야 한다. 등검은말벌은 양봉장에서 꿀벌을 낚아챈 후 근처 나무에서 가슴근육만을 손질한 후 둥지로 돌아가는 습성이 있기 때문에(Abrol, 1994) 본 연구 결과를 이에 대입하기 위해서는 여러 가지 변수를 고려해야 한다.

본 연구에서는 착농약송환법을 통한 말벌류 방제를 위해 국내에서 사용 중인 약제를 조사하여 선발하고 등검은말벌에 대한 살충력을 실험하였다. 등검은말벌의 성충을 대상으로 접촉 감수성, 유충을 대상을 섭식 감수성을 조사하였다. 성충의 경우 클로티아니딘, 디노테퓨란, 카보설판이 가장 효과적이었으며 반수치사약량은 꿀벌보다 높았으나 11 μg/bee보다 낮아 선택독성은 없는 것으로 판단된다. 유충은 치사에 성충보다 많은 약제가 필요하였으나 약제 감수성은 두 경우 모두 유사하였다. 화학 살충제를 이용한 말벌류 방제는 양봉장 주변에서 이루어질 가능성이 높다. 또한 처리 특성 상 꿀벌을 비롯한 비표적 생물과 환경에 대한 오염 및 잔류 문제가 발생할 수 있으므로 약제 선발에 있어 복합적인 숙고가 필요하다. 꿀벌 및 환경에 대한 위해성 평가가 추가로 이루어진다면 향후 등검은말벌 화학 살충제 등록 및 관리기준을 설정하기 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 이공계대학중점연구소사업 (NRF-2018R1A6A1A03024862)과 농촌진흥청 기후변화 말벌(PJ014761022202) 지원을 받았습니다.

저자 직책 & 역할

홍동의: 안동대, 석사과정; 실험수행 및 논문작성
정철의: 안동대, 교수; 실험설계 및 논문작성

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음.

Literature Cited

Abrol, D.P., 1994. Ecology, behaviour and management of social wasp, *Vespa velutina* Smith (Hymenoptera: Vespidae), attacking honeybee colonies. J. Apic. Sci. 9, 5-10.

Akhila, J.S., Shyamjith, D., Alwar, M.C., 2007. Acute toxicity studies and determination of median lethal dose. Curr. Sci. 93, 917-920.

Aupinel, P., Fortini, D., Michaud, B., Medrzycki, P., Padovani, E., Przygoda, D., Tasei, J.N., 2010. Honey bee brood ring-test: method for testing pesticide toxicity on honeybee brood in laboratory conditions. Julius-Kühn-Archiv. 423, 96.

Badawy, M.E., Nasr, H.M., Rabea, E.I., 2015. Toxicity and biochemical changes in the honey bee *Apis mellifera* exposed to four insecticides under laboratory conditions. Apidologie 46, 177-193.

Barandika, J.F., de la Hera, O., Fañanás, R., Rivas, A., Arroyo, E., Alonso, R.M., García-Pérez, A.L., 2023. Efficacy of protein baits with fipronil to control *Vespa velutina nigrithorax* (Lepeletier, 1836) in Apiaries. Animals. 13, 2075.

Carpenter, J.M., Kojima, J.I., 1997. Checklist of the species in the subfamily Vespinae (Insecta: Hymenoptera: Vespidae). Nat. his. Bull. Ibaraki Univ. 1, 51-92.

Chen, Y., Tong, X., 2004. Biological habit of *Vespa bicolor*. J. Jishou Univ. 25, 80.

Choi, M.B., 2020. Ecology of *Vespa velutina nigrithorax* (Hymenoptera: Vespidae), an invasive alien species in Korea: its behavioral analysis for aggressiveness, foraging and defense. Doctoral dissertation. Kyungbuk National University.

Choi, M.B., Martin, S.J., Lee, J.W., 2012. Distribution, spread, and impact of the invasive hornet *Vespa velutina* in South Korea. J. Asia Pac. Entomol. 15, 473-477.

Crisp, D.J., Thorpe, W.H., 1948. The water-protecting properties of insect hairs. Faraday Discuss. 3, 210-220.

Decourtye, A., Devillers, J., 2010. Ecotoxicity of neonicotinoid insecticides to bees. Adv. Exp. Med. Biol. 683, 85-86.

Franklin, D.N., Brown, M.A., Datta, S., Cuthbertson, A.G., Budge, G.E., Keeling, M.J., 2017. Invasion dynamics of Asian hornet, *Vespa velutina* (Hymenoptera: Vespidae): a case study of a commune in south-west France. Appl. Entomol. Zool. 52, 221-229.

Fukuto, T.R., 1990. Mechanism of action of organophosphorus and carbamate insecticides. Environ. Health. Perspect. 87, 245-254.

Gross, M., 2013. EU ban puts spotlight on complex effects of neonicotinoids. Curr. Biol. 23, R462-R464.

Harbo, J.R., 1993. Worker-bee crowding affects brood production, honey production, and longevity of honey bees (Hymenoptera: Apidae). J. Eco. Entomol. 86, 1672-1678.

Ishay, J., Ikan, R., 1968. Food exchange between adults and larvae in *Vespa orientalis* F. Anim. Behav. 16, 298-303.

Iwasa, T., Motoyama, N., Ambrose, J.T., Roe, R.M., 2004. Mechanism for the differential toxicity of neonicotinoid insecticides in the honey bee, *Apis mellifera*. Crop. Prot. 23, 371-378.

Jang, Y.D., Lee, M.Y., Yoon, Y.N., 1994. Visiting pattern and control of Giant hornet, *Vespa mandarinia* (Hymenoptera : Vespoidea), in apiary. Korean J. Apiculture. 9, 178-180.

Jeong, S.M., Lee, C.Y., Kim, D.W., Jung, C., 2016. Questionnaire study on the overwintering success and pest management of honeybee damage assessment of *Vespa* hornets in Korea. Korean J. Apic. 31, 201-210.

Jeschke, P., Nauen, R., 2008. Neonicotinoids-from zero to hero in insecticide chemistry. Pest. Manag Sci. 64, 1084-1098.

Ji, S.G., 2022. Joint toxic effects between clothianidin and imidacloprid on Zebrafish Embryonic development. Doctoral Dissertation, Bpukyong National University.

Jung, C., 2012a. Initial stage risk assessment of an invasive hornet, *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) in Korea. Korean J. Apic. 27, 87-93.

Jung, C.E., 2012b. Spatial expansion of an invasive hornet, *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) in Korea. Korean J. Apic. 27, 95-104.

Jung, C., Kang, M.S., Kim, D.W., 2007. *Vespid* Wasps (Hymenoptera) occurring around apiaries in Andong, Korea. Korean J. Apic. 22, 63-70.

Kang, E.J., Lee, M.I., Lee, M.Y., Kim, H.G., Choi. Y.S., 2016. Attractive effect using honeybee extraction against *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) queen. Korean J. Apic. 31, 195-199.

Kennedy, P.J., Ford, S.M., Poidatz, J., Thiéry, D., Osborne, J.L., 2018. Searching for nests of the invasive Asian hornet (*Vespa velutina*) using radio-telemetry. Commun. Biol, 1, 88.

Kim, A.S., Kim, S.E., Kim, K.W., 2011. Analysis of honeybee-keeping management types and skills level in Korea. J. Anim. Sci. Technol. 53, 59-66.

Kim, J.G., Choi, Y.S., Kang, E.J., Kim, S.B., Kim, K.M., Park, B.S., Kim, D.W., 2021. Evaluation of control efficiency against *Vespa* spp. (Family: Vespadae) using method of release after applying pesticide to the *Vespa* body. Korean J. Apic. 36, 105-110.

Kim, J.K., Choi, M.B., Moon, T.Y., 2006. Occurrence of *Vespa velutina* Lepeletier from Korea, and a revised key for Korean *Vespa* species (Hymenoptera: Vespidae). Int. J. Entomol. Res. 36, 112-115.

Kim, M.J., Bak, S.B., Jung, C.E., 2023. Modeling abundance and risk impact of *Vespa velutina nigrithorax* (Hymenoptera: Vespidae) in Korea: application of a species abundance model. Sci. Rep. 13, 13616.

Lee, S.M., Park, C.M., Goo, J.M., Lee, H.J., Wi, J.Y., Kang, C.H., 2013. Invasive pulmonary adenocarcinomas versus preinvasive lesions appearing as ground-glass nodules: differentiation by using CT features. Radiology 268, 265-273.

Lioy, S., Bianchi, E., Biglia, A., Bessone, M., Laurino, D., Porporato, M., 2021. Viability of thermal imaging in detecting nests of the invasive hornet *Vespa velutina*. Insect. Sci. 28, 271-277.

Matsumoto, T., 2013. Reduction in homing flights in the honey bee *Apis mellifera* after a sublethal dose of neonicotinoid insecticides. Bull. Insectology. 66, 1-9.

Meikle, W.G., Rector, B.G., Mercadier, G., Holst, N., 2008. Within-day variation in continuous hive weight data as a measure of honey bee colony activity. Apidologie. 39, 694-707.

Narahashi, T., 1971. Mode of action of pyrethroids. Bull. World Health. Org. 44, 337.

Rodriguez-Flores, M.S., Seijo-Rodríguez, A., Escuredo, O., Seijo-Coello, M.D.C., 2019. Spreading of *Vespa velutina* in northwestern Spain: influence of elevation and meteorological factors and effect of bait trapping on target and non-target living organisms. J. Pest. Sci. 92, 557-565.

Rojas-Nossa, S.V., Calviño-Cancela, M., 2020. The invasive hornet

Vespa velutina affects pollination of a wild plant through changes in abundance and behaviour of floral visitors. Biol. Invasions. 22, 2609-2618.

Rojas-Nossa, S.V., Dasilva-Martins, D., Mato, S., Bartolomé, C., Maside, X., Garrido, J., 2022. Effectiveness of electric harps in reducing *Vespa velutina* predation pressure and consequences for honey bee colony development. Pest. Manag. Sci. 78, 5142-5149.

Rome, Q., Dambrine, L., Onate, C., Muller, F., Villemant, C., García-Pérez, A., Bruneau, E., 2013. Spread of the invasive hornet *Vespa velutina* Lepeletier, 1836, in Europe in 2012 (Hym., Vespidae). Bull. Soc. Entomol. France. 118, 21-22.

Rome, Q., Muller, F.J., Touret-Alby, A., Darrouzet, E., Perrard, A., Villemant, C., 2015. Caste differentiation and seasonal changes in *Vespa velutina* (Hym.: Vespidae) colonies in its introduced range. J. Appl. Entomol. 139, 771-782.

Rome, Q., Perrard, A., Muller, F., Fontaine, C., Quilès, A., Zuccon, D., Villemant, C., 2021. Not just honeybees: predatory habits of *Vespa velutina* (Hymenoptera: Vespidae) in France. Ann. Soc. Entomol. Fr. 57, 1-11

Ruiz, G.M., Carlton, J.T., 2003. Invasive species: vectors and management strategies. Island Press, Washington DC, p. 520.

Sackmann, P., Rabinovich, M., Corley, J.C., 2001. Successful removal of German yellowjackets (Hymenoptera: Vespidae) by toxic baiting. J. Econ. Entomol. 94, 811-816.

Sattelle, D.B., Harrow, I.D., David, J.A., Pelhate, M., Callec, J.J., Gepner, J.I., Hall, L.M., 1985. Nereistoxin: actions on a CNS acetylcholine receptor/ion channel in the cockroach Periplaneta americana. Eur. J. Exp. Biol. 118, 37-52.

Sim, H.S., Lee, M.L., Choi, Y.S., Kim, H.Y., Hong, I.P., Woo, S.O., Byeon, K.H., Lee, M.Y., 2014. Pattern of emergence of *Vespa velutina nigrithorax* buysson (Hymenoptera: Vespidae) on spring in south part of Korea. Korean J. Apic. 29, 353-358.

Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L.P., Bonmatin, J.M., Chagnon, M., Downs, C., Wiemers, M., 2015. Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. Environ. Sci. Pollut. Res. 22, 5-34.

Stoner, K.A., Eitzer, B.D., 2013. Using a hazard quotient to evaluate pesticide residues detected in pollen trapped from honey bees (*Apis mellifera*) in Connecticut. PLoS One. 11, e0159696.

Tan, K., Radloff, S.E., Li, J.J., Hepburn, H.R., Yang, M.X., Zhang, L.J., Neumann, P., 2007. Bee-hawking by the wasp, *Vespa velutina*, on the honeybees *Apis cerana* and *A. mellifera*. Naturwissenschaften. 94, 469-472.

Tarek, H., Hamiduzzaman, M.M., Morfin, N., Guzman-Novoa, E., 2018. Sub-lethal doses of neonicotinoid and carbamate insecticides reduce the lifespan and alter the expression of immune health and detoxification related genes of honey bees (*Apis mellifera*). Genet. Mol. Res. 17, gmr16039908.

Turchi, L., Derijard, B., 2018. Options for the biological and physical control of *Vespa velutina nigrithorax* (Hym.: Vespidae) in Europe: A review. J. Appl. Entomol. 142, 553-562.

Ulziibayar, D., Begna, T., Ghosh, S., Jung, C.E., 2021. Acute and chronic toxicity of selected pesticides used in strawberry greenhouse to honeybee (*Apis mellifera*) larvae. Korean J. Apic. 36, 281-287.

Ulziibayar, D., Jung, C.E., 2019. Comparison of acute toxicity of different groups of pesticides to honey bee workers (*Apis mellifera* L.). Korean J. Apic. 34, 305-313.

Villemant, C., Streito, J.C., Haxaire, J., 2006. Premier bilan de l'invasion de *Vespa velutina* Lepeletier en France. Bull. Soc. Entomol. Fr. 111, 447-450.

Zhang, Z., Muhammad, Y., Chen, Y., Shah, S.J., Peng, Y., Shao, S., Zhao, Z., 2021. Construction of ultra-stable and Z-scheme Fe-Graphdiyne/MIL-100 (Fe) photo-Fenton catalyst with C=C-Fe|O interface for the highly enhanced catalytic degradation of Dinotefuran. Chem. Eng. J. 426, 131621.

Son, S.H., Jo, AR. Kim, D.E., 2021. Current status of alert alien species management for the establishment of proactive management systems in Korea. J. Eco. Envir. 45, 26. https://doi.org/10.1186/s41610-021-00204-y

Appendix 1. Toxicological data of clothianidin, dinotefuran and carbosulfan for *Apis mellfera* used in table 3

Insecticide	LD50	HAT	Reference
Clothianidin	0.05	24	Ulziibayar and Jung, 2019
	0.022	48	Ulziibayar and Jung, 2019
	0.0218	24	Iwasa et al., 2004
	0.0147	24	Tarek et al., 2018
	0.00218	24	Matsumoto, 2013
	0.044	48	Decourtye and Devillers, 2010
	0.0439	24	Stoner et al., 2013
Dinotefuran	0.138	24	Ulziibayar and Jung, 2019
	0.14	48	Ulziibayar and Jung, 2019
	0.075	24	Iwasa et al., 2004
	0.0075	24	Matsumoto, 2013
	0.023	48	PPDB
	0.0006	24	Badawy et al., 2015
	0.03	48	Zhang et al., 2021
	0.47	24	Stoner et al., 2013
Carbosulfan	0.18	24	PPDB