



서양뒤영벌 (*Bombus terrestris*)에 대한 토마토 등록약제의 접촉 및 경구 독성평가

박영욱, 김선국, 경예진, 안현모, 송명규, 박계원, 김주형, 이경용^{1,*}

충청북도농업기술원 곤충연구소, ¹농촌진흥청 국립농업과학원 양봉과

Assessment of Contact and Oral Toxicity of Tomato Insecticides to Bumblebees (*Bombus terrestris*)

Young Uk Park, Sun Kook Kim, Ye Jin Kyung, Hyeon Mo Ahn, Myung Kyu Song, Kye Won Park, Ju Hyung Kim and Kyeong Young Lee^{1,*}

Insect Research Institute, Chungbuk Agricultural Research and Extension Services, Cheongju, CB 28130, Republic of Korea
¹Apiculture Division, Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract

Bombus terrestris is a key pollinator used alongside honey bees in crop cultivation. However, exposure to chemical pesticides applied during cultivation can cause substantial harm. We evaluated the toxicity of 60 pesticides registered for use on tomato (35 insecticides, 25 fungicides) to *B. terrestris* using acute contact and oral toxicity assays. Among the insecticides, eight formulations (clothianidin, cyantraniliprole, dinotefuran, emamectin benzoate, thiamethoxam, buprofezin + clothianidin, clothianidin + spinetoram, and dinotefuran + spinetoram) caused $\geq 90\%$ mortality in the acute contact assay. Eleven inclusive of those eight plus broflanilide, chlorfenapyr, and spinetoram — caused $\geq 90\%$ mortality in the acute oral assay. Among the fungicides, three products (copper hydroxide, tribasic copper sulfate, and fluopicolide + propamocarb hydrochloride) resulted in $\geq 90\%$ mortality at the highest application rate in both assay types. These findings indicate that selecting pesticides with lower toxicity profiles could minimize adverse effects on *B. terrestris* during tomato production.

Keywords

Bombus terrestris, Pesticide toxicity, Tomato pollination

서론

화분매개 곤충은 작물 생산에서 필수적인 역할을 담당하며, 특히 서양뒤영벌 (*Bombus terrestris*)은 토마토와 같은 주요 농작물의 수분에 중요한 역할을 한다 (Morandin *et al.*, 2001). 토마토는 자가수분이 가능한 작물이지만 화분매개 곤충에 의해 수분될 경우 과실의 크기, 무게, 품질이 크게 향상된다. 뒤영벌의 수분 활동으로 토마토 작물

의 과실 생산량 64.7%, 과실 무게 57.6%, 상품성 과실 비율 21.9% 증가시키는 것으로 보고되었다 (Al-Attal and Nazer, 2003; Yankit *et al.*, 2018). 또한 뒤영벌에 의한 수분은 기형과 발생을 54.4% 감소시키고, 종자 수를 78.5% 증가시켜 전체적인 작물 품질을 크게 향상시킨다 (Al-Attal and Nazer, 2003). 특히 뒤영벌은 ‘진동수분 (buzz pollination)’이라는 특별한 방법으로 토마토 꽃 수분의 효율을 높인다 (Cooley and Vallejo-Marín, 2021). 이는 뒤영

Table 1. List of the 35 tested insecticides in tomato

No.	Insecticides and formulation ^{a)}	AI ^{b)} (%)	Dilution rate (x)
1	Acetamiprid WP	8	2,000
2	Broflanilide SC	5	2,000
3	Chlorfenapyr SC	10	2,000
4	Clothianidin SC	8	2,000
5	Cyantraniliprole DC	5	1,000
6	Dinotefuran WP	10	2,000
7	Emamectin benzoate EC	2.15	2,000
8	Flonicamid WG	10	2,000
9	Flubendiamide SC	20	2,000
10	Fluxametamide EC	9	2,000
11	Metaflumizone EC	20	2,000
12	Milbemectin EC	1	2,000
13	Novaluron SC	10	2,000
14	Pyridalyl EW	10	1,000
15	Pyrifluquinazon WG	10	2,000
16	Spinetoram SC	5	2,000
17	Spiromesifen SC	20	2,000
18	Spirotetramat SC	22	2,000
19	Sulfoxaflor SC	7	2,000
20	Teflubenzuron SC	5	2,000
21	Tetraniliprole SC	18.18	5,000
22	Thiamethoxam WG	10	2,000
23	Abamectin + Acetamiprid ME	1.6 + 7	2,000
24	Abamectin + Chlorantraniliprole SC	1.714 + 4.286	2,000
25	Abamectin + Flometoquin SC	0.8 + 9	1,500
26	Acetamiprid + Buprofezin EC	4 + 15	1,000
27	Acetamiprid + Etofenprox WP	2.5 + 8	2,000
28	Acetamiprid + Flndiamide WG	6 + 7	2,000
29	Buprofezin + Clothianidin SC	10 + 3	2,000
30	Buprofezin + Spinetoram SC	20 + 4	2,000
31	Buprofezin + Tiacloprid SC	20 + 5	2,000
32	Clothianidin + Spinetoram SC	6 + 4	2,000
33	Cyantraniliprole + Pymetrozine WG	10 + 50	5,000
34	Dinotefuran + Spinetoram WG	16 + 4	2,000
35	Pyridaben + Pyrifluquinazon WG	20 + 5	2,000

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, DC: dispersible concentrate, ME: micro emulsion, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WG: water dispersible granule, WP: wettable powder

^{b)}AI: Active ingredient

벌이 꽃의 수술을 잡고 흉부 근육을 고주파로 진동시켜 꽃가루를 효과적으로 방출시켜 진동수분시키는 방법이다 (Lee *et al.*, 2012).

그러나 농업 생태계에서 병해충 방제를 위한 화학농약

의 사용은 서양뒤영벌을 포함한 화분매개 곤충에 심각한 위협이 되고 있다(Goulson *et al.*, 2015). 특히, 네오니코티노이드계통의 살충제들은 만성 노출된 뒤영벌 군체에 서는 벌집 성장률이 저하되고 새로운 여왕벌 생산이 85%

Table 2. List of the 26 tested fungicides in tomato

No.	Fungicides and formulation ^{a)}	AI ^{b)} (%)	Dilution rate (x)
1	Chlorothalonil WP	75	600
2	Copper hydroxide WP	77	500
3	Fenhexamid WP	50	1,000
4	Iminoctadine tris WP	40	2,000
5	Isofetamid SC	36	1,500
6	Isopyrazam EC	12.57	2,000
7	Mandipropamid SC	22.59	2,000
8	Metaconazole SC	20	5,880
9	Propamocarb hydrochloride SL	66.5	1,000
10	Pyraziflumid SC	15	4,000
11	Pyribencarb SC	20	1,500
12	Streptomycin WP	20	1,000
13	Tetraconazole EW	12.5	1,000
14	Tribasic copper sulfate SC	15	500
15	Ametoctradin + Dimethomorph SC	27 + 20	2,000
16	Cymoxanil + Famoxadone SC	12 + 9	1,000
17	Dimethomorph + Pyraclostrobin SC	16 + 9.5	2,000
18	Famoxadone + Oxathiapiprolin SC	20 + 2	2,000
19	Fenhexamid + Tebuconazol SC	30.5 + 5.8	1,500
20	Fludioxonil + Isofetamid SC	15 + 20	2,000
21	Fluopicolide + Propamocarb hydrochloride SC	5 + 50	2,000
22	Fluxapyroxad + Metalaxyl-M SC	4 + 4	2,000
23	Fluxapyroxad + Metrafenone SC	8 + 9.1	2,000
24	Fluxapyroxad + Pyraclostrobin SC	4.6 + 8.3	5,000
25	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Streptomycin WP	1.5 + 18.8	500
26	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Validamycin-A WP	5 + 15	2,000

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WP: wettable powder

^{b)}AI: Active ingredient

감소된 것으로 보고되었다(Whitehorn *et al.*, 2012). 또한, 살충제 노출은 일벌의 채집 활동 저하뿐 아니라 벌집 내 자손 생산 감소 등 봉군 수준의 악영향도 초래할 수 있다는 연구도 있다(Laycock *et al.*, 2014). 2013년 미국 오리건주에서는 dinotefuran 살포 후 4만 5천~10만 마리의 뒤영벌이 폐사한 사례도 있다(Hatfield and Jepsen, 2021). 이러한 이유로 유럽연합(EU)에서는 화분매개 곤충에 대한 위험성 때문에 일부 네오니코티노이드계 농약의 실외 사용을 금지했으나, 이로 인해 농가에서는 다른 대체 약제를 사용하게 되었다. 그러나 최근 연구에서는 일부 대체 약제가 금지된 네오니코티노이드계 약제보다 뒤영벌에 더 높은 독성을 보일 수 있음이 밝혀졌다(Cabezas and Farinós, 2022).

따라서, 토마토 재배에서 서양뒤영벌의 중요성에도 불

구하고 토마토에 등록된 농약이 서양뒤영벌에 미치는 독성에 관한 체계적인 연구는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구는 토마토 재배에 등록된 살충제와 살균제가 서양뒤영벌에 미치는 접촉 독성과 경구 독성을 평가하여, 화분매개 곤충에 안전한 농약 선택에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 시험곤충

본 시험에 사용한 서양뒤영벌은 강원도 원주 소재 ‘강한벌’이라는 업체(37°23′18.65″N, 127°59′5.86″E)에서 실내생산된 서양뒤영벌(*B. terrestris*) 봉군을 구입하여 사용

Table 3. Insecticides dose administered to *B. terrestris* according to application method

No.	Insecticides and formulation ^{a)}	Recommended rate		2X Recommended rate	
		Oral	Contact	Oral	Contact
Applied active ingredient amount (µg)					
1	Acetamiprid WP	1.60	0.08	0.80	0.04
2	Broflanilide SC	1.00	0.05	0.50	0.03
3	Chlorfenapyr SC	2.00	0.10	1.00	0.05
4	Clothianidin SC	1.60	0.08	0.80	0.04
5	Cyantraniliprole DC	2.00	0.10	1.00	0.05
6	Dinotefuran WP	2.00	0.10	1.00	0.05
7	Emamectin benzoate EC	0.43	0.02	0.22	0.01
8	Flonicamid WG	2.00	0.10	1.00	0.05
9	Flubendiamide SC	4.00	0.20	2.00	0.10
10	Fluxametamide EC	1.80	0.09	0.90	0.05
11	Metaflumizone EC	4.00	0.20	2.00	0.10
12	Milbemectin EC	0.20	0.01	0.10	0.01
13	Novaluron SC	2.00	0.10	1.00	0.05
14	Pyridalyl EW	4.00	0.20	2.00	0.10
15	Pyriproxyfen WG	2.00	0.10	1.00	0.05
16	Spinetoram SC	1.00	0.05	0.50	0.03
17	Spiromesifen SC	4.00	0.20	2.00	0.10
18	Spirotetramat SC	4.40	0.22	2.20	0.11
19	Sulfoxaflor SC	1.40	0.07	0.70	0.04
20	Teflubenzuron SC	1.00	0.05	0.50	0.03
21	Tetraniliprole SC	1.50	0.07	0.75	0.04
22	Thiamethoxam WG	2.00	0.10	1.00	0.05
23	Abamectin + Acetamiprid ME	0.03 + 0.14	0.01 + 0.07	0.02 + 0.07	0.01 + 0.04
24	Abamectin + Chlorantraniliprole SC	0.23 + 0.08	0.01 + 0.04	0.12 + 0.04	0.01 + 0.02
25	Abamectin + Flometoquin SC	0.02 + 0.24	0.01 + 0.12	0.01 + 0.12	0.01 + 0.06
26	Acetamiprid + Buprofezin EC	0.16 + 0.60	0.08 + 0.30	0.08 + 0.30	0.04 + 0.15
27	Acetamiprid + Etofenprox WP	0.05 + 0.16	0.025 + 0.08	0.03 + 0.08	0.01 + 0.04
28	Acetamiprid + Flindiamide WG	0.12 + 0.14	0.06 + 0.07	0.06 + 0.07	0.03 + 0.04
29	Buprofezin + Clothianidin SC	0.20 + 0.06	0.10 + 0.03	0.10 + 0.03	0.05 + 0.02
30	Buprofezin + Spinetoram SC	0.40 + 0.08	0.20 + 0.04	0.20 + 0.04	0.10 + 0.02
31	Buprofezin + Tiacloprid SC	0.40 + 0.10	0.20 + 0.05	0.20 + 0.05	0.10 + 0.03
32	Clothianidin + Spinetoram SC	0.12 + 0.08	0.06 + 0.04	0.06 + 0.04	0.03 + 0.02
33	Cyantraniliprole + Pymetrozine WG	0.08 + 0.40	0.04 + 0.20	0.04 + 0.20	0.02 + 0.10
34	Dinotefuran + Spinetoram WG	0.32 + 0.08	0.16 + 0.04	0.16 + 0.04	0.08 + 0.02
35	Pyridaben + Pyriproxyfen WG	0.04 + 0.10	0.20 + 0.05	0.02 + 0.05	0.10 + 0.03

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, DC: dispersible concentrate, ME: micro emulsion, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WG: water dispersible granule, WP: wettable powder

하였다. 봉군의 구성은 일벌 150 마리에 1마리의 여왕벌로 이루어져있고, 충청북도농업기술원 곤충연구소 사육실(36°43'35.00"N, 127°27'45.21"E)에서 사육하였다. 사육 환경은 온도 25±2°C, 상대습도 60±10%로 유지하였으

며, 먹이는 40% 설탕물과 화분단자를 공급하였다. 화분단자는 신선한 화분을 40% 설탕물을 혼합한 화분떡과 같은 형태로 제공하였다(Yoon *et al.*, 2010).

Table 4. Fungicides dose administered to *B. terrestris* according to application method

No.	Fungicides and formulation ^{a)}	Recommended rate		2X Recommended rate	
		Oral	Contact	Oral	Contact
Applied active ingredient amount (µg)					
1	Chlorothalonil WP	2.50	0.25	1.25	0.12
2	Copper hydroxide WP	3.08	0.31	1.54	0.15
3	Fenhexamid WP	1.00	0.10	0.50	0.05
4	Iminoctadine tris WP	0.40	0.04	0.20	0.02
5	Isofetamid SC	0.48	0.05	0.24	0.02
6	Isopyrazam EC	0.12	0.01	0.06	0.006
7	Mandipropamid SC	0.22	0.02	0.11	0.01
8	Metaconazole SC	0.06	0.01	0.03	0.003
9	Propamocarb hydrochloride SL	1.33	0.13	0.67	0.06
10	Pyraziflumid SC	0.07	0.01	0.04	0.004
11	Pyribencarb SC	0.26	0.03	0.13	0.01
12	Streptomycin WP	0.40	0.04	0.20	0.02
13	Tetraconazole EW	0.25	0.03	0.13	0.01
14	Tribasic copper sulfate SC	0.06	0.06	0.03	0.03
15	Ametoctradin + Dimethomorph SC	0.27 + 0.03	0.03 + 0.02	0.14 + 0.02	0.01 + 0.01
16	Cymoxanil + Famoxadone SC	24.0 + 0.07	0.02 + 0.02	0.12 + 0.04	0.01 + 0.009
17	Dimethomorph + Pyraclostrobin SC	0.15 + 0.01	0.02 + 0.01	0.08 + 0.01	0.008 + 0.005
18	Famoxadone + Oxathiapiprolin SC	0.20 + 0.06	0.02 + 0.002	0.10 + 0.03	0.01 + 0.001
19	Fenhexamid + Tebuconazol SC	0.40 + 0.05	0.04 + 0.01	0.20 + 0.03	0.02 + 0.004
20	Fludioxonil + Isofetamid SC	0.15 + 0.20	0.02 + 0.02	0.08 + 0.10	0.008 + 0.01
21	Fluopicolide + Propamocarb hydrochloride SC	0.05 + 0.18	0.01 + 0.05	0.03 + 0.09	0.003 + 0.02
22	Fluxapyroxad + Metalaxyl-M SC	0.03 + 0.09	0.004 + 0.004	0.02 + 0.05	0.002 + 0.002
23	Fluxapyroxad + Metrafenone SC	0.07 + 0.01	0.008 + 0.01	0.04 + 0.01	0.004 + 0.005
24	Fluxapyroxad + Pyraclostrobin SC	0.18 + 0.07	0.002 + 0.003	0.09 + 0.04	0.001 + 0.002
25	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Streptomycin WP	0.06 + 0.20	0.01 + 0.08	0.03 + 0.10	0.003 + 0.03
26	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Validamycin-A WP	0.05 + 0.50	0.01 + 0.02	0.03 + 0.25	0.003 + 0.008

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WP: wettable powder

2. 시험약제

서양뒤영벌의 접촉 및 경구 독성시험에 사용된 농약은 시판되어 판매되고 있는 토마토에 등록된 농약으로 살균제 25종과 살충제 35종, 총 60종의 제품을 구입하여 사용하였다(Tables 1, 2). 시험별 약제처리 방법별로 약제의 처리약량은 살충제와 살균제로 나누어 정리하였다(Tables 3, 4).

3. 독성 시험

독성 시험방법은 서양뒤영벌에 대한 OECD 독성시험법 가이드라인(TG 246, TG 247)을 기준으로 시험하였다(Kim *et al.*, 2020). 시험에 사용된 서양뒤영벌은 3봉군 이상에서 건강한 일벌을 무작위 선발하여 개별 체중을 잰 뒤 작거나 (< 200 mg) 큰 개체 (> 300 mg)는 제외시켰다.

처리에 사용된 개체의 평균 무게는 220.5 ± 13.0 mg이었으며, 개체 무게 분포는 정규분포와 일치하였다. 정규분포

Table 5. Mortality rate of insecticides on *B. terrestris* in contact toxicity test

No.	Fungicides and formulation ^{a)}	Mortality (%) (Mean ± SD)			
		Recommended rate		2X Recommended rate	
		24hr	48hr	24hr	48hr
1	Acetamiprid WP	0.0 ± 0.0d ^{b)}	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5cd	20.0 ± 20.0cd
2	Broflanilide SC	86.7 ± 13.1ab	86.7 ± 13.1a	100.0 ± 0.0a	
3	Chlorfenapyr SC	40.0 ± 20.0c	46.7 ± 11.5bc	100.0 ± 0.0a	
4	Clothianidin SC	100.0 ± 0.0a			
5	Cyantraniliprole DC	73.3 ± 11.5bc	100.0 ± 0.0a		
6	Dinotefuran WP	100.0 ± 0.0a			
7	Emamectin benzoate EC	100.0 ± 0.0a			
8	Flonicamid WG	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	13.3 ± 11.5cd	13.3 ± 11.5cd
9	Flubendiamide SC	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0b
10	Fluxametamide EC	6.7 ± 11.5d	6.7 ± 11.5d	6.7 ± 11.5d	6.7 ± 11.5cd
11	Metaflumizone EC	40.0 ± 20.0c	46.7 ± 11.5bc	60.0 ± 11.5b	60.0 ± 11.5bc
12	Milbemectin EC	6.7 ± 11.5d	6.7 ± 11.5d	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5cd
13	Novaluron SC	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	13.3 ± 11.5cd
14	Pyridalyl EW	6.7 ± 11.5d	6.7 ± 11.5d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d
15	Pyriproxyfen WG	20.0 ± 20.0d	20.0 ± 20.0cd	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5cd
16	Spinetoram SC	26.7 ± 30.6d	40.0 ± 34.6bc	100.0 ± 0.0a	
17	Spiromesifen SC	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d
18	Spirotetramat SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	13.3 ± 11.5c	13.3 ± 11.5cd
19	Sulfoxaflor SC	60.0 ± 40.0c	60.0 ± 40.0b	60.0 ± 11.5b	60.0 ± 11.5bc
20	Teflubenzuron SC	6.7 ± 11.5d	6.7 ± 11.5d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d
21	Tetraniliprole SC	53.3 ± 23.1c	53.3 ± 23.1b	60.0 ± 11.5b	60.0 ± 11.5bc
22	Thiamethoxam WG	100.0 ± 0.0a			
23	Abamectin + Acetamiprid ME	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	13.3 ± 11.5c	20.0 ± 20.0cd
24	Abamectin + Chlorantraniliprole SC	0.0 ± 0.0e	20.0 ± 20.0cd	53.3 ± 11.5b	53.3 ± 11.5bc
25	Abamectin + Flometoquin SC	13.3 ± 11.5de	13.3 ± 11.5cd	33.3 ± 11.5bcd	33.3 ± 11.5c
26	Acetamiprid + Buprofezin EC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0c	6.7 ± 11.5cd	6.7 ± 11.5cd
27	Acetamiprid + Etofenprox WP	26.7 ± 11.5cde	40.0 ± 20.0abc	46.7 ± 11.5bc	46.7 ± 11.5bc
28	Acetamiprid + Flindiamide WG	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d
29	Buprofezin + Clothianidin SC	100.0 ± 0.0a			
30	Buprofezin + Spinetoram SC	33.3 ± 30.7cde	46.7 ± 46.2bc	86.7 ± 11.5ab	86.7 ± 11.5a
31	Buprofezin + Tiacloprid SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0d
32	Clothianidin + Spinetoram SC	100.0 ± 0.0a			
33	Cyantraniliprole + Pymetrozine WG	0.0 ± 0.0e	6.7 ± 11.5d	33.3 ± 11.5bc	60.0 ± 20.0bc
34	Dinotefuran + Spinetoram WG	100.0 ± 0.0a			
35	Pyridaben + Pyriproxyfen WG	60.0 ± 40.0b	60.0 ± 40.0ab	60.0 ± 20.0b	60.0 ± 20.0bc

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, DC: dispersible concentrate, ME: micro emulsion, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WG: water dispersible granule, WP: wettable powder

^{b)}In a column, means followed by a same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level by Tukey's studentized range test (Systat software Inc., USA)

가정 하에서 약 68.3% 개체가 207.5~233.5 mg에 포함되었고, 95.5%는 194.5~246.5 mg 범위에 속하였다. 각 처리구는 일벌 15마리로 구성하였으며, 3반복으로 시험을 수

행하였다.

시험에 사용된 용기는 환기가 잘 되는 왕대보호기 (roller queen cage, 다인양봉원)에 주사기와 고정시킨 후

Table 6. Mortality rate of fungicides on *B. terrestris* in contact toxicity test

No.	Fungicides and formulation ^{a)}	Mortality (%) (Mean ± SD)			
		Recommended rate		2X Recommended rate	
		24hr	48hr	24hr	48hr
1	Chlorothalonil WP	0.0 ± 0.0e ^{b)}	6.7 ± 11.5d	0.0 ± 0.0c	6.7 ± 11.5bc
2	Copper hydroxide WP	40.0 ± 20.0c	73.3 ± 23.1b	60.0 ± 34.6a	93.3 ± 11.5a
3	Fenhexamid WP	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
4	Iminoctadine tris WP	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
5	Isofetamid SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	6.7 ± 11.5bc
6	Isopyrazam EC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	6.7 ± 11.5bc
7	Mandipropamid SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	13.3 ± 11.5c	13.3 ± 11.5bc
8	Metaconazole SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc
9	Propamocarb hydrochloride SL	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
10	Pyraziflumid SC	6.7 ± 11.5e	13.3 ± 11.5d	6.7 ± 11.5c	20.0 ± 0.0bc
11	Pyribencarb SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc
12	Streptomycin WP	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc
13	Tribasic copper sulfate SC	86.7 ± 13.1b	93.3 ± 11.5a	66.7 ± 30.6a	93.3 ± 11.5a
14	Ametoctradin + Dimethomorph SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc
15	Cymoxanil + Famoxadone SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
16	Dimethomorph + Pyraclostrobin SC	0.0 ± 0.0e	13.3 ± 11.5d	20.0 ± 20.0c	20.0 ± 20.0bc
17	Famoxadone + Oxathiapiprolin SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	20.0 ± 0.0b	26.7 ± 11.5b
18	Fenhexamid + Tebuconazol SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc
19	Fludioxonil + Isofetamid SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	13.3 ± 11.5c	20.0 ± 20.0bc
20	Fluopicolide + Propamocarb hydrochloride SC	24.4 ± 10.2d	48.9 ± 13.9c	77.8 ± 13.9a	93.3 ± 11.5a
21	Fluxapyroxad + Metalaxyl-M SC	0.0 ± 0.0e	13.3 ± 11.5d	6.7 ± 11.5c	13.3 ± 11.5bc
22	Fluxapyroxad + Metrafenone SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	6.7 ± 11.5c	13.3 ± 11.5bc
23	Fluxapyroxad + Pyraclostrobin SC	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	6.7 ± 11.5bc
24	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Streptomycin WP	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
25	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Validamycin-A WP	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WP: wettable powder

^{b)}In a column, means followed by a same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level by Tukey's studentized range tset (Systat software Inc., USA)

서양뒤영벌을 한 마리씩 투입할 수 있도록 하였다. 용기에 사용된 주사기(Henke Sass Wolf, Germany)는 먹이 공급과 약제 처리용으로 사용할 수 있도록 2 mL 용량으로 설치하였다. 시험에 사용된 서양뒤영벌은 시험용기에 각 1마리씩 넣고 시험 8시간 전에 50% w/v 자당용액을 먹이로 순응시켰다. 경구독성 시험에 사용되는 서양뒤영벌의 경우에는 약제 처리 4시간 전부터 먹이공급을 제한하였다.

접촉독성시험은 순응처리 후 약제 처리 전 CO₂ 가스로 마취하여 시험약제를 등쪽 흉부(thorax)에 2 µL를 처리하였다. 접촉독성시험에 사용된 약제는 증류수를 용매로 사

용하여 기준량은 각 약제의 추천 희석배수로 희석하여 사용하였으며, 배량은 추천배수의 2배 농도로 희석하여 처리하였다. 약제를 처리한 후 시험용기에 넣고 약제 처리 24, 48시간 후 사충율을 조사하였다.

경구독성시험은 각 처리약제를 50% 자당용액으로 희석한 후 약제용 주사기 팁에 40 µL씩 주입하여 4시간 동안 급여하였다. 처리농도는 접촉독성 시험방법과 동일하게 기준량과 배량 약제를 희석하여 처리하였다. 약제를 급여한 후 남은 용량을 조사하여 제공된 급여의 80% 미만으로 섭취한 개체는 조사에서 제외하였으며, 약제 처리 24, 48시간 후 사충율을 조사하였다.

Table 7. Mortality rate of insecticides on *B. terrestris* in oral toxicity test

No.	Fungicides and formulation ^{a)}	Mortality (%) (Mean ± SD)			
		Recommended rate		2X Recommended rate	
		24hr	48hr	24hr	48hr
1	Acetamiprid WP	13.3 ± 11.5c ^{b)}	13.3 ± 11.5c	26.7 ± 11.5bc	26.7 ± 11.5bc
2	Broflanilide SC	100.0 ± 0.0a			
3	Chlorfenapyr SC	100.0 ± 0.0a			
4	Clothianidin SC	100.0 ± 0.0a			
5	Cyantraniliprole DC	100.0 ± 0.0a			
6	Dinotefuran WP	100.0 ± 0.0a			
7	Emamectin benzoate EC	100.0 ± 0.0a			
8	Flonicamid WG	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c	40.0 ± 2.0b	40.0 ± 2.0b
9	Flubendiamide SC	13.3 ± 23.1c	13.3 ± 23.3c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
10	Fluxametamide EC	100.0 ± 0.0a			
11	Metaflumizone EC	100.0 ± 0.0a			
12	Milbemectin EC	13.3 ± 11.5c	13.3 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc	6.7 ± 11.5bc
13	Novaluron SC	20.0 ± 20.0b	20.0 ± 20.0c	13.3 ± 11.5bc	13.3 ± 11.5bc
14	Pyridalyl EW	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c	80.0 ± 34.6a	80.0 ± 34.6a
15	Pyrifluquinazon WG	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
16	Spinetoram SC	100.0 ± 0.0a			
17	Spiromesifen SC	13.3 ± 11.5c	13.3 ± 11.5c	13.3 ± 23.1bc	13.3 ± 23.1bc
18	Spirotetramat SC	6.7 ± 11.5bc	6.7 ± 11.5c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
19	Sulfoxaflor SC	100.0 ± 0.0a			
20	Teflubenzuron SC	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
21	Tetraniliprole SC	100.0 ± 0.0a			
22	Thiamethoxam WG	100.0 ± 0.0a			
23	Abamectin + Acetamiprid ME	66.7 ± 23.1b	66.7 ± 23.1b	100.0 ± 0.0a	
24	Abamectin + Chlorantraniliprole SC	93.3 ± 11.5a	93.3 ± 11.5a	100.0 ± 0.0a	
25	Abamectin + Flometoquin SC	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5c	20.0 ± 20.0b	20.0 ± 20.0c
26	Acetamiprid + Buprofezin EC	6.7 ± 11.5bc	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5bc	6.7 ± 11.5bc
27	Acetamiprid + Etofenprox WP	100.0 ± 0.0a			
28	Acetamiprid + Flindiamide WG	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
29	Buprofezin + Clothianidin SC	100.0 ± 0.0a			
30	Buprofezin + Spinetoram SC	100.0 ± 0.0a			
31	Buprofezin + Tiacloprid SC	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0c
32	Clothianidin + Spinetoram SC	100.0 ± 0.0a			
33	Cyantraniliprole + Pymetrozine WG	6.7 ± 11.5c	6.7 ± 11.5c	73.3 ± 30.6a	73.3 ± 30.6a
34	Dinotefuran + Spinetoram WG	100.0 ± 0.0a			
35	Pyridaben + Pyrifluquinazon WG	93.3 ± 11.5a	93.3 ± 11.5a	100.0 ± 0.0a	

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, DC: dispersible concentrate, ME: micro emulsion, SC: suspension concentrate,

SL: soluble concentrate, WG: water dispersible granule, WP: wettable powder

^{b)}In a column, means followed by a same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level by Tukey's studentized range tset (Systat software Inc., USA)

4. 통계분석

서양뒤영벌에서 살균제와 살충제별 경구와 접촉독성의

치사율은 정규성 검정 후, 분산분석을 실시하여 유의성을 확인하고, Tukey's HSD로 사후분석 하였다. 통계분석 패키지는 SPSS ver 20 (IBM, Chicago, IL, USA)를 사용하였다.

Table 8. Mortality rate of fungicides on *B. terrestris* in oral toxicity test

No.	Fungicides and formulation ^{a)}	Mortality (%) (Mean ± SD)			
		Recommended rate		2X Recommended rate	
		24hr	48hr	24hr	48hr
1	Chlorothalonil WP	2.2 ± 3.8cd ^{b)}	4.4 ± 3.8de	4.4 ± 3.8cde	11.1 ± 3.8cde
2	Copper hydroxide WP	93.3 ± 6.7a	100.0 ± 0.0a	100.0 ± 0.0a	
3	Fenhexamid WP	8.9 ± 3.8cd	11.1 ± 3.8def	11.1 ± 3.8bcde	11.1 ± 3.8cde
4	Iminoctadine tris WP	0.0 ± 0.0c	4.4 ± 3.8de	6.7 ± 6.7cde	8.9 ± 3.8cde
5	Isofetamid SC	2.2 ± 3.8cd	4.4 ± 7.7de	4.4 ± 7.7cde	8.9 ± 3.8cde
6	Isopyrazam EC	15.6 ± 3.8c	20.0 ± 11.5bc	22.2 ± 7.7b	31.1 ± 3.8b
7	Mandipropamid SC	11.1 ± 3.8cd	13.3 ± 6.7cd	15.6 ± 10.2bc	17.8 ± 7.7c
8	Metaconazole SC	8.9 ± 10.2cd	11.1 ± 7.7def	8.9 ± 10.2cde	17.8 ± 7.7c
9	Propamocarb hydrochloride SL	8.9 ± 7.7cd	11.1 ± 3.8def	6.7 ± 6.7cde	17.8 ± 7.7c
10	Pyraziflumid SC	2.2 ± 3.8cd	2.2 ± 3.8de	4.4 ± 3.8cde	4.4 ± 3.8de
11	Pyribencarb SC	4.4 ± 3.8cd	4.4 ± 3.8de	4.4 ± 3.8cde	6.7 ± 0.0cde
12	Streptomycin WP	8.9 ± 7.7cd	11.1 ± 3.8def	8.9 ± 7.7cde	13.3 ± 6.7cd
13	Tribasic copper sulfate SC	100.0 ± 0.0a			
14	Ametoctradin + Dimethomorph SC	13.3 ± 6.7c	28.9 ± 15.4b	22.2 ± 13.9b	31.1 ± 13.9b
15	Cymoxanil + Famoxadone SC	2.2 ± 3.8cd	2.2 ± 3.8de	2.2 ± 3.8de	6.7 ± 6.7cde
16	Dimethomorph + Pyraclostrobin SC	4.4 ± 3.8cd	4.4 ± 3.8de	6.7 ± 0.0cde	8.9 ± 3.8cde
17	Famoxadone + Oxathiapiprolin SC	4.4 ± 3.8cd	4.4 ± 3.8de	6.7 ± 0.0cde	8.9 ± 3.8cde
18	Fenhexamid + Tebuconazol SC	6.7 ± 6.7cd	8.9 ± 10.2def	13.3 ± 13.3bcd	13.3 ± 13.3cd
19	Fludioxonil + Isofetamid SC	4.4 ± 3.8cd	6.7 ± 6.7de	4.4 ± 3.8cde	11.1 ± 3.8cde
20	Fluopicolide + Propamocarb hydrochloride SC	80.0 ± 20.0b	95.6 ± 7.7a	95.6 ± 3.8a	100.0 ± 0.0a
21	Fluxapyroxad + Metalaxyl-M SC	2.2 ± 3.8cd	4.4 ± 3.8de	4.4 ± 3.8cde	6.7 ± 0.0cde
22	Fluxapyroxad + Metrafenone SC	0.0 ± 0.0c	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0e	0.0 ± 0.0e
23	Fluxapyroxad + Pyraclostrobin SC	2.2 ± 3.8cd	2.2 ± 3.8de	8.9 ± 3.8cde	8.9 ± 3.8cde
24	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Streptomycin WP	2.2 ± 3.8cd	2.2 ± 3.8de	2.2 ± 3.8de	6.7 ± 6.7cde
25	Oxytetracycline calcium alkyltrimethylammonium + Validamycin-A WP	4.4 ± 3.8cd	6.7 ± 6.7de	11.1 ± 3.8bcde	11.1 ± 3.8cde

^{a)}EC: emulsifiable concentrate, EW: emulsion in water, SC: suspension concentrate, SL: soluble concentrate, WP: wettable powder

^{b)}In a column, means followed by a same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level by Tukey's studentized range tset (Systat software Inc., USA)

결과 및 고찰

1. 접촉독성 시험

서양뒤영벌에 대하여 토마토에 등록되어 있는 살충제 35종(단제 22종, 합제 13종)과 살균제 25종(단제 13종, 합제 12종) 농약의 독성을 조사하였다(Tables 1, 2). Table 5 과 같이 살충제를 대상으로 접촉독성에 의한 사충률을 조사한 결과, 살충제의 종류별로 유의미한 차이를 보였다 (oneway ANOVA test 기준량 처리 24시간 $F_{(34,70)} = 74.97$,

$p < 0.001$; 48시간 $F_{(34,70)} = 16.45$, $p < 0.001$; 배량 처리 24시간 $F_{(34,70)} = 9.65$, $p < 0.001$; 48시간 $F_{(34,70)} = 31.71$, $p < 0.001$). 기준량으로 처리 된 후 48시간 내에 100% 사충율을 보인 농약은 총 8종으로 조사되었다. 그 중에서 단제는 4종(clothianidin, cyantraniliprole, dinotefuran, emamectin benzoate, thiamethoxam)이었으며, 이 중 cyantraniliprole을 제외한 나머지 4종이 처리 후 24시간 내에 사충율이 100% 조사되었다. 사충율이 80% 이상인 단제는 acetamiprid이었다. Broflanilide와 chlorfenapyr 및 spinetoram은 배량으로 처리하였을 때 24시간 내에

사충율이 100% 나타났다. Clothianidin과 thiamethoxam은 대표적인 neonicotinoid계통으로 꿀벌에 농약의 기준량으로 분무처리하였을 때 높은 독성이 나타났으며, 약제 처리 후 약 30일 전후까지 살충효과가 90% 이상 나타나 잔류기간도 긴 것으로 알려져있다(Ahn *et al.*, 2008). Dinotefuran 또한 *Nannotrigona perilampoides*에 처리하였을 때 24시간 내에 90% 이상의 높은 살충효과가 보고되어져 있으며(Góngora-Gamboa *et al.*, 2022), 2013년 미국 오리건주 월슨빌에서는 dinotefuran을 살포 후 약 4만 5천~10만마리의 뒤영벌(*Bombus* sp.)이 폐사하여 높은 독성이 있음이 보고되었다(Hatfield and Jepsen, 2021). Abamectin 계열의 살충제인 Emamectin benzoate는 곤충의 아세틸콜린에스테라이스(AChE) 및 항산화 효소 활성에 영향을 주어 신경계 기능에 영향을 주는 물질로 알려져 있다. Emamectin benzoate는 꿀벌에 대하여 약제 처리 후 24시간 노출시 LC₅₀이 0.275 mg/L로 시험에 사용된 타 약제보다 2배 이상 높은 독성이 있다고 보고되었다(Abdu-allah and Pittendrigh, 2018). 합제에서는 3종(buprofezin + clothianidin, clothianidin + spinetoram, dinotefuran + spinetoram)이 처리 후 24시간 내에 사충율이 100% 나타났다. Buprofezin + clothianidin 합제는 배량 처리 시에도 처리 48시간 후에 86.7% 사충율을 보였다. Buprofezin은 탈피억제제로 꿀벌에 대하여 LD₅₀이 100 µg/마리로 낮은 독성을 보였다. Spinetoram은 꿀벌에 대한 독성이 매우 높은 것으로 분류되어 있으며, spinetoram 처리 시 꿀벌 비행 지속시간이 58% 낮아졌으며 귀소 능력상실로 인한 군집 붕괴위험이 3.4배 증가한 것으로 알려져있다(U.S. EPA, 2009).

살균제의 경우에서도 농약의 종류별로 유의미한 차이를 보였다(one-way ANOVA test 기준량 처리 24시간 $F_{(24,50)} = 46.20, p < 0.001$; 48시간 $F_{(24,50)} = 49.98, p < 0.001$; 배량 처리 24시간 $F_{(24,50)} = 14.69, p < 0.001$; 48시간 $F_{(24,50)} = 27.82, p < 0.001$). 기준량에서 높은 사충율을 보인 약제는 tribasic copper sulfate로 처리 48시간에 사충율이 93.3%이었다. Tribasic copper sulfate는 배량처리 시에도 기준량과 비슷한 93.3% 사충율로 조사되었으며, 이외 배량처리시 90% 이상의 사충율을 보인 약제는 copper hydroxide 단제와 fluopicolide + propamocarb hydrochloride 합제 2종이었다(Table 6). Tribasic copper sulfate는 *Partamona helleri*에 대하여 LC₅₀이 142.95 µg/

mL로 측정되었으며 처리 농도에서 벌의 행동이 변화되고 중장 세포가 손상되며 산화 스트레스 지표도 증가되는 것으로 알려져 있어 서양뒤영벌에도 독성이 있는 것으로 여겨진다(Bernardes *et al.*, 2021). Propamocarb hydrochloride 약제는 꿀벌(*Apis mellifera*)에 대하여 접촉 독성 LD₅₀이 100 µg/마리 이상이었으며 경구 독성은 84 µg/마리로 비교적 저독성으로 조사되었으나 기생말벌(*Aphidius rhopalosiphii*)에 처리시 번식률이 72.4% 감소하는 영향을 주어 서양뒤영벌에도 부정적인 영향을 준 것으로 생각된다(ECPA, 2008).

2. 경구독성 시험

살충제를 대상으로 경구독성에 의한 사충율을 조사한 결과, 살충제의 종류별로 유의미한 차이를 보였다(one-way ANOVA test 기준량 처리 24시간 $F_{(34,70)} = 26.88, p < 0.001$; 48시간 $F_{(34,70)} = 52.48, p < 0.001$; 배량 처리 24시간 $F_{(34,70)} = 26.88, p < 0.001$; 48시간 $F_{(34,70)} = 41.15, p < 0.001$). 기준량에서 90% 이상의 사충율을 보인 약제는 19종으로 단제 12종(broflanilide, chlorfenapyr clothianidin, cyantraniliprole, dinotefuran, emamectin benzoate, spinetoram, sulfoxaflor, tetraniliprole, thiamethoxam)과 합제 7종(abamectin + chlorantraniliprole, acetamiprid + etofenprox, buprofezin + clothianidin, buprofezin + spinetoram, clothianidin + spinetoram, dinotefuran + spinetoram, pyridaben + pyrifluquinazon)이었으며, 배량에서 3종(pyridalyl, abamectin + acetamiprid, cyantraniliprole + pymetrozine) 약제가 추가적으로 높은 사충율을 보였다(Table 7). 기준량에서 접촉독성에서 사충율이 80% 이상으로 독성이 높았던 단제 6종(broflanilide, clothianidin, cyantraniliprole, dinotefuran, emamectin benzoate, thiamethoxam)과 합제 3종(buprofezin + clothianidin, clothianidin + spinetoram, dinotefuran + spinetoram)은 경구독성 처리 시 약제 처리 후 48시간에서 100% 높은 사충율이 나타났다. 또한, 접촉독성이 낮았던 약제들 중 단제 5종(chlorfenapyr, fluxametamide, metaflumizone, spinetoram, sulfoxaflor, tetraniliprole)과 합제 4종(abamectin + chlorantraniliprole, acetamiprid + etofenprox, buprofezin + spinetoram, pyridaben + pyrifluquinazon)은 약제를 급여한 후 48시간 후 사

충율이 90% 이상으로 높게 나타났다. 시험에 사용된 약제 중에서 높은 독성을 나타낸 약제들은 대부분 GABA-gated chloride channel modulator, Ryanodine receptor modulators 및 neonicotic AchE 계열에 속하는 약제들 (broflanilide, clothianidin, cyantraniliprole, dinotefuran, fluxametamide, tetraniliprole, thiamethoxam)이었다. 또한, neonicotic AchE 계열의 clothianidin, dinotefuran, spinetoram이 함유되거나 단독처리에서 높은 독성이 조사되었다. 낮은 독성을 나타낸 계열은 chitin biosynthesis inhibitors, feeding blockers, lipid synthesis inhibitors로 해당약제들은 buprofezin, flonicamid, novaluron, pyri-fluquinazon, pymetrozine, spiromesifen, spirotetramat, teflubenzuron이었다.

살균제에서는 경구독성에서도 농약의 종류별로 유의미한 차이가 확인되었다(ANOVA test 기준량 처리 24시간 $F_{(24,50)} = 79.51, p < 0.001$; 48시간 $F_{(24,50)} = 87.59, p < 0.001$; 배양 처리 24시간 $F_{(24,50)} = 82.5, p < 0.001$; 48시간 $F_{(24,50)} = 97.86, p < 0.001$). 기준량에서 90% 이상 높은 사충율을 나타낸 약제는 총 3종(copper hydroxide, tribasic copper sulfate)으로 조사되었다. 3종은 접촉독성 시험에서보다 더 높은 살충효과를 나타내었다(Table 8). 살충제와 살균제 모두 접촉했을 때 보다 경구를 하였을 때 처리 후 짧은 시간 안에 사충율이 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 곤충의 외피를 통하여 흡수되는 경우 농약의 제형과 화학적 특성에 따라 많은 경우의 수가 발생하게 되어 살충효과를 떨어뜨릴 수 있게 되는데 비해 경구할 경우 소화관 내에서 직접 작용하여 농약의 대사가 유도될 가능성이 높기 때문인 것으로 생각된다(Devillers, 2002; Thompson *et al.*, 2014).

국내 토마토의 작과를 위하여 뒤영벌은 10농가 중 7농가 이상이 사용할 정도로 보편화되었다(Yoon *et al.*, 2021). 그럼에도 불구하고 현행 농약등록에는 꿀벌에 대한 독성평가만 이루어지고 있기 때문에(농약관리법) 뒤영벌에 대한 영향 평가는 제한적이다. 우리는 최근 5년간 토마토 재배시에 사용되고 있는 화학농약 60종에 대하여 뒤영벌에 대한 독성평가에 대한 데이터를 확보하였다. 특히 단기간의 접촉 및 경구 노출만으로도 뒤영벌의 개체군 유지 및 수분 활동에 큰 피해를 줄 수 있다. 따라서, 이번 연구를 통하여 토마토에서는 뒤영벌로만 화분매개자 이루어지기 때문에 우리의 연구는 토마토 생산에 있어 화분매

개용 뒤영벌에 대한 농약 피해를 최소화하는데 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 이번연구는 접촉과 경구독성만을 평가하였기 때문에 실제로 농가가 봉군에 농약 노출을 최소화하기 위하여 벌통을 이동시킬 때 언제 다시 벌통을 비닐하우스내에 다시 넣어야 하는 지에 대한 충분한 정보를 제공해줄 수 없다. 따라서 향후에는 뒤영벌에 대한 독성이 강한 농약 중 엽상잔류독성에 대한 평가도 추가로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이러한 연구를 통하여, 뒤영벌에 대한 농약에 대한 독성데이터를 축적하여 농가가 뒤영벌에 독성이 적은 농약을 선택함으로써 뒤영벌 봉군의 수명을 연장시키거나 활동량을 증대시켜 더 많은 수확량을 기대할 수 있을 것이다.

적 요

서양뒤영벌 (*Bombus terrestris*)은 작물을 재배시 수분 매개자로 꿀벌과 함께 사용되고 있는 대표적인 화분매개곤충이다. 하지만, 작물 재배시 사용되는 화학농약 등에 노출되어 피해가 발생하고 있어 본 연구에서는 토마토 등록된 화학농약에 대하여 서양뒤영벌의 독성을 평가하였다. 화학농약 60종(살충제 35종, 살균제 25종)에 대하여 접촉과 경구 독성을 조사하였다. 살충제는 접촉독성 평가에서 사충율이 90% 이상인 약제가 8종(clothianidin, cyantraniliprole, dinotefuran emamectin benzoate, thiamethoxam, buprofezin + clothianidin, clothianidin + spinetoram, dinotefuran + spinetoram)이었으며, 경구독성 평가에서는 접촉독성에서 높은 사충율이었던 약제 8종을 포함한 11종(broflanilide, chlorfenapyr, spinetoram)으로 나타났다.

살균제는 접촉 및 경구독성 평가에서 배양처리 시에 사충율이 90% 이상인 약제는 3종(copper hydroxide, tribasic copper sulfate, fluopicolide + propamocarb hydrochloride)으로 조사되었다. 이러한 결과를 통하여 토마토 재배시 독성이 낮은 농약을 선택하여 서양뒤영벌의 피해를 최소화할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(주요 과채류에 대

한 화분매개곤충 기술 적용 및 실증, 과제번호:RS-2021-RD009627) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

인용 문헌

- Abdu-Allah, G. A. and B. R. Pittendrigh. 2018. Lethal and sub-lethal effects of select macrocyclic lactones insecticides on forager worker honey bees under laboratory experimental conditions. *Ecotoxicology* 27: 81-88.
- Al-Attal, Y. Z. and I. K. Nazer. 2003. Monitoring bumblebee (*Bombus terrestris* L.) activity in pollinating tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill) under plastic houses in Jordan. *Dirasat Agric. Sci.* 3: 149-155.
- Ahn, G. S., M. G. Oh, H. H. Ahn, C. M. Yoon and G. H. Kim. 2008. Evaluation of toxicity of pesticides against honeybee (*Apis mellifera*) and Bumblebee (*Bombus terrestris*). *J. Pestic. Sci.* 12: 382-390.
- Bernardes R. C., K. M. Fernandes, D. S. Bastos, A. F. P. A. Freire, M. P. Lopes, L. L. Oliveira, M. G. Tavares, R. D. S. Araújo and G. F. Martins. 2021. Impact of copper sulfate on survival, behavior, midgut morphology, and antioxidant activity of *Partamona helleri* (Apidae: Meliponini). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27: 6294-6305.
- Cabezas, G. and G. P. Farinós. 2022. Sensitivity of Buff-Tailed Bumblebee (*Bombus terrestris* L.) to insecticides with different mode of action. *Insects*. 13: 184.
- Cooley, H. and M. Vallejo-Marín. 2021. Buzz-pollinated crops: a global review and meta-analysis of the effects of supplemental bee pollination in tomato. *J. Econ. Entomol.* 114: 505-519.
- Devillers, J. and M. H. Pham-Delègue. 2002. Acute toxicity of pesticides to honeybees. In: *Honey bees: estimating the environmental impact of chemicals*. CRC Press, London, 57.
- European Crop Protection Association. 2008. Propamocarb hydrochloride: active substance information and risk assessment. Univ. Hertfordshire Pestic. Prop. Database.
- Hatfield, R. G. and S. Jepsen. 2021. A conservation conundrum: protecting bumble bees under the California Endangered Species Act. *California Fish Wildlife J.* 107: 98-106.
- Góngora-Gamboa, C., E. Ruiz-Sánchez, H. S. Ballina-Gómez, A. González-Moreno and R. Zamora-Bustillos. 2022. Survival rate of the neotropical stingless bees *Nannotrigona perilampoides* and *Frieseomelitta nigra* after exposure to five selected insecticides, under controlled conditions. *Insects* 13: 961.
- Goulson, D., E. Nicholls, C. Botías and E. L. Rotheray. 2015. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347: 1255-1257.
- Kim, B. S., A. R. N. R. Kim, K. M. Jeon, H. Lee, Y. K. Park, A. S. You and H. J. Yoon. 2020. Establishment of OECD acute contact and oral toxicity test methods for *Bombus* spp. in Korea. *J. Pestic. Sci.* 24: 63-70.
- Laycock, I., K. C. Cotterell, T. A. O'Shea-Wheller and J. E. Cresswell. 2014. Effects of the neonicotinoid pesticide thiamethoxam at field-realistic levels on microcolonies of *Bombus terrestris* worker bumble bees. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 100: 153-158.
- Lee, S. B., K. H. Park, Y. C. Choi, W. T. Kim, S. W. Kang, Y. B. Ihm, K. S. Han and I. G. Park. 2012. Comparison of the pollinating activities of *Bombus terrestris* hives produced by domestic bumblebee rearing companies at beefsteak-tomato houses in Korea. *J. Apic. Res.* 27: 275-282.
- Morandin, L. A., T. M. Lavery and P. G. Kevan. 2001. Effect of bumble bee (Hymenoptera: Apidae) pollination intensity on the quality of greenhouse tomatoes. *J. Econ. Entomol.* 94: 172-179.
- Thompson, H. M., S. L. Fryday, S. Harkin and S. Milner. 2014. Potential impacts of synergism in honeybees (*Apis mellifera*) of exposure to neonicotinoids and sprayed fungicides in crops. *Apidologie* 45: 545-553.
- United States Environmental Protection Agency. 2009. Pesticide fact sheet: Spinetoram. Off. Prev. Pestic. Tox. Subst.
- Whitehorn, P. R., S. O'Connor, F. L. Wackers and D. Goulson. 2012. Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production. *Science* 336: 351-352.
- Yankit, P., M. Thakur, S. Sharma, R. S. Chandel and R. Kumar. 2018. Effect of bumble bee pollination on quality and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) grown under protected conditions. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 7: 257-263.
- Yoon, H. J., K. Y. Lee, I. G. Park, M. A. Kim. 2010. Temperature and humidity favorable for colony development of Korean native bumblebee *Bombus hypocrita sapporoensis*. *J. Apic.* 25: 83-89.
- Yoon, H. J., K. Y. Lee, Y. B. Lee, M. Y. Lee, S. Kathanan and J. D. Park. 2021. Current status of insect pollinators use for horticultural crops in Korea, 2020. *J. Apic.* 36: 111-123.