

영경귀 중 살충제 Etofenprox 및 Deltamethrin의 잔류특성 및 위해성 평가

이지연¹, 송민호², 유지우¹, 이정훈², 안희연¹, 박건우¹, 신지원¹, 손하진¹, 최은송², 김영수¹, 이지호^{2*}

Residual Characteristics and Risk Assessment of Etofenprox and Deltamethrin in *Cirsium japonicum spinosissimum*

Ji-Yeon Lee ¹, Min-Ho Song ², Ji-Woo Yu ¹, Jung-Hoon Lee ², Hui-Yeon Ahn ¹, Geon-Woo Park ¹, Ji-Won Shin ¹, Ha-Jin Son ¹, Eun-Song Choi ², Young-Soo Keum ¹ and Ji-Ho Lee ^{2*}

¹건국대학교 식량자원과학과, ²강원대학교 농업생명과학대학 환경융합학부 바이오자원환경학과

¹Department of Crop Science, Konkuk University, Seoul 05029, Korea, ²School of Natural Resources and Environmental Science, Department of Biological Environment, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

* Correspondence: micai@kangwon.ac.kr

Abstract: The increase in pesticide use for agricultural production may affect consumer health due to pesticide residues in crops. Consequently, many countries have established maximum residue limits (MRLs) for pesticides. This study evaluated the characteristics of residues and conducted a risk assessment of etofenprox and deltamethrin in *Cirsium japonicum spinosissimum*. The residue levels of the two pesticides ranged from 0.99 to 8.07 mg/kg and 0.03 to 0.71 mg/kg, with half-lives of 5.0 days and 3.5 days. The risk assessment based on the highest exposure scenario (99th percentile) indicated hazard index (HI) values of 0.369 and 0.097, suggesting a low-level risk (HI <1). Considering actual intake scenarios within the agricultural environment, risk assessments were conducted for treated plots at 3, 7, and 14 days after pesticide application. The results showed that the pesticide exposure risk decreased less than 0.1 at 7 and 0 days after treatment compared to the harvest day (etofenprox, deltamethrin HI = 0.090, 0.097). From this research, it was suggested that for safety standards regarding pesticide use, etofenprox should be applied twice as a foliar spray at least 7 days before harvest, while deltamethrin should be no later than 3 days before harvest.

Keywords: *Cirsium japonicum spinosissimum*, Deltamethrin, Etofenprox, Residual characteristics, Risk assessment

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.09>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 78-86

Received: December 23, 2024

Revised: January 9, 2025

Accepted: February 25, 2025

Published: April 2, 2025

Online ISSN: 1233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

서론

최근 식품 소비의 다양화, 건강 기능성 식품에 대한 소비 증가와 함께 소비자들의 식품 선택의 기준이 높아지며 잔류농약, 중금속 등으로부터의 농산물 안전성에 대한 관심이 고조되고 있다. 농약에 대한 안전성을 확보하기 위한 방안으로 농산물

에 대한 농약허용물질목록관리제도(Positive List System, PLS)가 시행되고 있다. PLS 제도는 잔류허용기준(Maximum Residue Limit, MRL)이 설정되지 않은 농약이 농산물에서 검출될 경우 일률적으로 0.01 mg/kg을 적용하는 제도로 2019년 국내 모든 농산물에 대하여 적용되었으며 2024년부터 5대 주요 축산물인 소·돼지·닭고기와 달걀, 우유를 대상으로 범위가 확대되었다. 최근 농민들이 신선 채소류(엽채류 및 엽경채류)를 고소득 작물로 여겨 재배면적이 증가하는 반면[1], 영경귀와 같이 특수목적으로 사용되는 특용작물은 대부분 재배면적이 적은 소면적 재배 작물로 분류되며 이에 따라 등록된 농약의 종류가 제한적이다. 이러한 제약은 효과적인 병해충 방제를 어렵게 만들며, 때문에 농업 현장에서는 등록되지 않은 농약을 사용하거나 부적절한 약제 처리가 이루어질 위험성이 높아진다. 농식품에서 MRL을 초과하거나 등록되지 않은 농약이 0.01 mg/kg 수준보다 초과되어 검출될 경우, 부적합 농산물로 판정되어 출하 연기, 용도 변경 등의 행정처분을 받게 되는 등 농업인에게 경제적 피해가 발생할 수 있다[2]. 따라서 농약을 안전하게 사용하여 생산한 농산물을 소비자에게 공급하기 위해서는 소면적 작물에 대한 농약 등록 시험이 시급한 상황이다.

영경귀(*Cirsium japonicum spinosissimum*)는 가시나물로도 불리는 국화과 영경귀속에 속하는 다년생 초본으로, 식용 및 약용으로 재배한다[3]. 영경귀는 플라보노이드, 플라보노리그난 등이 풍부하며 이 중 실리마린은 간 보호 및 뇌출혈, 고혈압 완화 효과가 있어 건강 기능성 식품의 원료로 사용되고 있다[4,5]. 현재 영경귀에 사용가능한 살충제는 영경귀수염진딧물 방제를 목적으로 한 afidopyropen, cyantraniliprole 및 pyrifluquinazon 총 3종만이 등록되어 있어 고품질의 안전한 영경귀 생산과 공급을 위해 농약안전사용기준 및 MRL 설정을 위한 연구가 절실한 상황이다[6].

시험에 사용된 농약 etofenprox와 deltamethrin은 합성 pyrethroids 계에 속하는 살충제로, 전위 의존 Na⁺ 통로를 열린 상태로 유지하여 axon 세포막에서 탈분극 상태를 분극 상태로 되돌리는 과정을 저해하는 작용에 의해 살충활성을 갖는다[7]. Pyrethroids 계 농약은 1973년 미국에 permethrin이 도입된 후부터 사용량이 급증하였으며, 현재 세계 살충제 시장의 약 23%를 차지하며 농업, 가정 환경 등에서 사용되고 있다[8]. 같은 pyrethroids계 농약이어도 etofenprox은 기존 합성 pyrethroids 살충제가 공통적으로 갖는 ester 결합 대신 ether 결합을 포함하여 pseudo-pyrethroids로 분류된다(Table 1). 약제의 어독성이 기존 pyrethroids계 농약 대비 최대 50배 낮은 수준이며 꿀벌 독성 및 포유독성 또한 기존 pyrethroids계 농약보다 낮은 것으로 보고되고 있다[8-10].

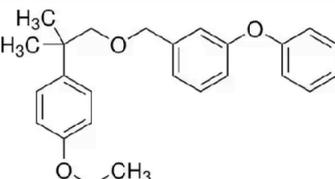
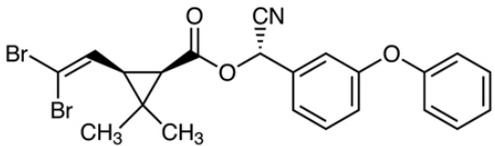
본 연구에서는 노지재배 중인 영경귀에 살충제 etofenprox 및 deltamethrin을 경엽처리 후 작물 내 농약의 잔류 특성 및 위해성 평가를 실시하여 영경귀 중 농약 MRL 설정을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

시험약제 및 시험

포장 시험 수행 시 농약 품목은 etofenprox 10% 유탁제(명타자, FarmHannong, Seoul, Republic of Korea), deltamethrin 1% 유제(데스플러스, Seoul, Republic of Korea, Kyungnong)를 선정하여 살포하였다. 농약의 표준물질 etofenprox (98.7%, 순도)와 deltamethrin (98.6%, 순도)은 Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하여 검량선 표준용액 조제 및 회수율 실험에 사용하

Table 1. Physico-chemical properties of etofenprox and deltamethrin

	Etofenprox	Deltamethrin
Structure		
Molecular weight (g/mol)	376.5	505.2
Vapor pressure (25°C, mPa)	8.13 × 10 ⁻⁴	1.24 × 10 ⁻⁵
Log Kow	6.9 (20°C)	4.6 (25°C)
Solubility in water	0.0225 mg/L (20°C)	< 0.002 mg/L (25°C)

였다. 시험물질의 물리적 특성(화학적 구조, 분자량, 증기압, Log Kow, 용해도)은 Table 1에 제시하였다.

잔류분석 시험에 사용된 유기용매는 HPLC grade의 acetonitrile (J.T.Baker, Radnor, PA, USA)를 사용하였고, 시약으로 사용된 formic acid는 LC grade급으로서 Honeywell (Charlotte, North Carolina, USA)에서 구입하여 사용하였다. 추출 및 정제에 사용되는 QuEChERS Extraction Kit, QuEChERS Dispersive Kit 및 DIAMOND Florentine syringe filter (0.22 µm, 13 mm)는 CTK corporation (Daejeon, Korea) 제품을 사용하였다.

포장시험

시험 작물 영경귀는 재래종으로 충청북도 괴산군에 위치한 노지재배 포장에서 2024년 4월 9일 파종 후 6월 12일까지 약 2달간 시험을 수행하였다. 포장 내 무처리 및 약제살포 시험구(반복당 10 m²)를 배치하고 반복간 교차오염을 방지하기 위해 1 m²의 완충지대를 두었다. Etofenprox 10% 유타제와 deltamethrin 1% 유제 시험구는 5개 처리구(무처리구, 수확 0일, 3일, 7일, 14일 전 2회 살포구)로 설정하였다. 농약은 etofenprox 10% 유타제 및 deltamethrin 1% 유제 1000배 희석액(20 mL/20 L)을 조제한 후 처리구별 7일 간격을 두고 2회 살포(10 a당 120 L)하였다. 시료는 수확 0일(최종살포 2시간 후), 3일, 7일, 14일 전 2회 살포한 처리구에 대하여 반복구당 1 kg 이상 채취하였다. 처리구별 시료가 섞이지 않도록 수확 일자 및 약제 정보를 표시한 polyethylene (P.E) film bag에 넣어 당일 실험실로 운반하였다.

시료 조제

수확한 영경귀는 한 개체의 무게를 측정하고(etofenprox: 31.43 ± 5.35 g, deltamethrin: 31.90 ± 4.60 g), 1 kg의 시료를 드라이 아이스를 추가하여 homogenizer로 균질화하였다. 이후 10 g을 칭량하여 분석에 사용하였고 남은 시료는 분석 기간 동안 -20°C 이하의 온도로 냉동보관하였다. 저장안정성 평가를 위해 etofenprox와 deltamethrin의 표준용액을 0.1 mg/kg 농도가 되도록 무처리 시료 10 g에 처리한 후, 분석시료와 동일하게 냉동보관하였다.

분석법 상 정량한계 및 직선성

분석 시 기기의 정량한계(Instrumental Limit of Quantitation, ILOQ)는 분석물질의 chromatogram 내 peak의 signal to noise ratio (S/N)이 10 이상인 농도로 설정했다. 분석법의 정량한계(Method Limit of Quantitation, MLOQ)는 아래와 같은 산출식 (1)과 같이 ILOQ에 주입량(µL)을 곱한 값인 최소검출량(Minimum Detectable Amount, MDA)에 시료 무게(g), 기기 주입량(µL), 분석 용액의 최종부피(mL) 및 희석배수를 적용하여 산출하였다.

$$MLOQ (mg/kg) = \frac{MDA (ng) \times Final\ volume (mL) \times Dillution\ factor}{Injection\ volume (\mu L) \times Sample\ weight (g)} \quad (1)$$

농약의 정량분석을 위한 검량선은 etofenprox 표준품(98.7%, 순도)을 10.01 mg 칭량한 후 10 mL volumetric flask에 10 mL의 acetonitrile로 용해하여 농도가 996.9 µg/mL가 되도록 primary stock solution을 조제하였다. Deltamethrin 표준품(98.6%, 순도) 또한 10.01 mg 칭량 후 동일한 방법으로 용해하여 995.8 µg/mL 농도의 primary stock solution을 조제하였다. 이 primary stock solution을 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 µg/mL 농도로 희석한 후 무처리 시료를 acetonitrile로 추출한 용액과 50:50 (v/v)로 혼합하여 최종 농도가 0.0025, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25 µg/mL인 matrix matched working solution을 조제하였다. GC-MS/MS에 etofenprox는 working solution 1 µL를, deltamethrin은 2 µL를 주입하여 분석을 수행하였다. Chromatogram 내 peak area를 기반으로 표준 검량선을 작성하였고, 표준 검량선의 직선성은 회귀식에 의한 결정계수(r²) 값을 통해 확인하였다.

영경귀 중 Etofenprox 및 Deltamethrin의 회수율 시험

무처리 영경귀 시료 10 g에 1.0, 10.0 mg/L 농도의 working solution을 0.1 mL씩 주입하여 추출물의 최종농도가 0.01, 0.1 mg/kg가 되도록 3반복으로 처리하여 회수율 실험을 수행하였다. 저장안정성을 확인하기 위해 etofenprox와 deltamethrin이 0.1 mg/kg 수준이 되도록 무처리 영경귀 시료에 처리한 후 각각 20, 39일 동안 냉동보관(-20°C)하였다. 회수율 실험과 동일한 방법으로 추출하여 시료 저장기간 동안 시험 농약의 안정성을 확인하였다.

영경귀 중 Etofenprox 및 Deltamethrin의 잔류분석

영경귀 중 etofenprox 및 deltamethrin의 추출은 QuEChERS EN 15662 방법을 이용하였다. 균질화된 시료 10 g (± 0.01 g)을 칭량하여 50 mL centrifuge tube에 넣고, 10 mL acetonitrile을 첨가 후 1분간 shaker로 강하게 진탕 추출하였다. 진탕 추출한 시료에 MgSO₄ 4 g, NaCl 1 g, sodium citrate 1 g과 disodium citrate sesquihydrate 0.5 g을 첨가하여 1분간 진탕 후, 4,000 rpm에서 5분간 원심 분리하였다. 상정액을 1 mL 취하여 PSA 25 mg, MgSO₄ 150 mg이 담긴 2 mL micro tube에 넣고 교반한 후 10,000 rpm에서 5분간 원심 분리하였다. 이 후 상정액을 DIAMOND Florentine syringe filter (0.22 μ m, 13 mm)에 여과하여 얻은 0.5 mL를 acetonitrile 0.5 mL과 혼합하여 etofenprox는 1 μ L, deltamethrin는 2 μ L를 GC-MS/MS에 주입하여 EI(Electrospray ionization) mode로 분석하였다. Deltamethrin의 경우 retention time이 13.5분 및 13.7분에서 검출된 두 개의 peak 면적을 합산한 데이터를 정량에 사용하였다. Etofenprox와 deltamethrin의 세부적인 분석 조건은 Table 2에 제시되어 있다. 농약의 잔류농도는 matrix matched 검량선을 이용하여 계산하였다.

반감기 산출

영경귀에 살포된 etofenprox와 deltamethrin의 소실 특성 및 반감기는 first-order kinetics equation을 바탕으로 한 지수함수를 이용하여 아래의 식 (2, 3)으로 계산하여 산출하였다[11,12].

$$Concentration\ at\ time\ (C_{(t)}) = ae^{-bt} \tag{2}$$

a = Initial concentration (mg/kg), b = Dissipation constant, t = Time

$$Half-life\ of\ pesticide\ (t_{1/2}) = \frac{\ln 2}{b} \tag{3}$$

b = Dissipation constant

위해성 평가

농산물에 잔류하는 etofenprox 및 deltamethrin의 잠재적인 건강 위험을 평가하기 위해 위해성 평가를 실시하였다. 그러나 영경귀에 대한 국내 섭취량 통계 자료가 미비하여, 동일한 국화과에 속하는 쑥갓을 대체 작물로 선정하고, 체중 kg당 하루 섭취량 데이터를 활용하였다(한국보건산업진흥원, 2021). 영경귀는 특정 용도로 제한적으로 소비되는 반면, 쑥갓은 대표적인 식용 엽채류로 널리 활용되며, 이에 대한 섭취량 자료가 충분히 확보되어 있다. 또한 쑥갓은 잎의 결각이 뚜렷하고 가장자리가 뾰족하여

Table 2. Analytical condition of GC-MS/MS for quantitative analysis of etofenprox and deltamethrin

Pesticides	Etofenprox			Deltamethrin		
Instrument	Shimadzu LC-MS TQ8050 NX with Nexis GC-2030					
Column	DB-5ms (Agilent, USA) (30 m L. \times 0.25 mm I.D., 0.25 μ m film thickness)					
Ionization mode	Electrospray ionization (EI)					
Mobile phase	Rate (min)	Column Oven Temperature ($^{\circ}$ C)	Hold time (min)	Rate (min)	Column Oven Temperature ($^{\circ}$ C)	Hold time (min)
	0.01	130.0	1.5	0.01	130.0	1.5
	30.00	230.0	0.0	60.00	230.0	0.0
	5.00	300.0	3.0	10.00	300.0	3.0
Retention time	15.7 min			13.5 min	13.7 min	
Injection volume	1 μ L			2 μ L		
Quantifier (CE ^{a)})	163.2/135.1 (-10.0)			252.9/93.1 (-8.0)		
Qualifier (CE ^{a)})	135.1/107.1 (-10.0)			252.9/171.9 (-20.0)		

^{a)} CE: Collision energy

영경귀와 유사한 구조적 특징을 지니며, 이에 따라 두 작물의 잔류특성이 유사할 것으로 판단하였다. 이와 더불어, 싹갓에서는 시험 농약에 대한 시험 농약에 대한 MRL 기준이 이미 확립되어 있어 본 연구에서는 싹갓을 대체 식물로 활용하여 위해성 평가를 수행하였다. 식품의약품안전처의 잔류물질정보에 등록된 국내 일일섭취허용량(Acceptable Daily Intake, ADI)은 etofenprox에서 0.03 mg/kg·bw/day, deltamethrin은 mg/kg·bw/day로 설정되어 있다(식품의약품안전처, 2008). 안전성 평가를 위해 ADI 대비 일일섭취추정량(Estimated Daily Intake, EDI)인 HI (Hazard Index)를 아래의 식 (4, 5)을 이용하여 산출하였다.

$$EDI (mg/kg \cdot bw/day) = Daily \ intake (g/kg \cdot bw \cdot day) \times Pesticide \ residue \ level (mg/kg) \div 1000 \tag{4}$$

$$HI (\%) = \frac{EDI (mg/kg \cdot bw/day)}{ADI (mg/kg \cdot bw/day)} \times 100 \tag{5}$$

결과 및 고찰

분석법 검증

농도 별 etofenprox와 deltamethrin을 분석한 matrix matched 검량선의 결정계수(r^2)는 0.0025에서 0.25 µg/mL 범위에서 0.99 이상으로 직선성은 양호하였다(Table 3). Etofenprox의 영경귀 중 회수율은 0.01 및 0.1 mg/kg 수준에서 91.7~105.8%를 나타냈으며, deltamethrin의 회수율은 0.01 및 0.1 mg/kg 수준에서 95.2~110.4%를 나타냈다. 저장안정성 시험 결과, 모든 물질의 회수율이 89.6~102.8% 범위로 저장 중 안정한 것으로 확인되었다. 회수율의 변이계수는 모두 20% 이내로, 농촌진흥청 고시 제2024-5호 ‘잔류성 시험의 기준 및 방법’의 분석법 검증 기준을 만족하였다(농촌진흥청, 2024)(Table 3).

영경귀 중 etofenprox 및 deltamethrin의 잔류 특성

영경귀 중 etofenprox와 deltamethrin의 국내 MRL은 설정되어 있지 않으며, 형태적 특성이 비슷하고 영경귀가 속한 국화과인 싹갓에서 etofenprox 및 deltamethrin의 MRL은 각각 15.0 mg/kg, 0.3 mg/kg으로 고시되어 있다(식품의약품안전처, 2024).

Etofenprox의 잔류량은 최종 약제살포 당일 및 14일 후 처리구에서 평균 7.65 및 1.00 mg/kg으로, 최종 약제살포 14일 후 처리구의 잔류량은 초기 잔류량에 대비해 87%가 감소하였다. Deltamethrin의 경우 0.63 및 0.04 mg/kg으로 최종 약제살포 14일 후 농약의 잔류량은 초기 잔류량 대비 94% 감소하였다(Table 5).

Table 3. Validation of analytical method for the pesticide residue in *Cirsium japonicum var. spinosissimum*

Pesticide	Calibration equation	r^2	Fortification level (mg/kg)	Recovery (%)			CV ^{b)} (%)
				Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	
Etofenprox	$y = 3,997,005.7700x + 32,814.4924$	0.9988	0.01	99.2	103.6	105.8	3.2
			0.1	95.5	91.7	95.3	2.3
			0.1 ^{a)}	89.6	91.8	92.3	1.6
Deltamethrin	$y = 100,262.2875x - 89.1606$	0.9992	0.01	110.4	95.2	107.4	7.7
			0.1	102.4	100.5	99.7	1.4
			0.1 ^{a)}	92.5	94.1	102.8	5.7

^{a)} Storage stability test, ^{b)} Coefficient of variation

Table 4. Half-life of the pesticides in *Cirsium japonicum var. spinosissimum* and dissipation equation

Pesticide	Dissipation equation ($y^a) = ae^{-bx}$, x = half-life)	r^2	Half-life (day)
Etofenprox	$y = 6.0385e^{-0.1374x}$	0.9229	5.0
Deltamethrin	$y = 0.5233e^{-0.1988x}$	0.9729	3.5

^{a)} Residual concentration of pesticide at time

Table 5. Residual concentration of etofenprox and deltamethrin in *Cirsium japonicum var. spinosissimum*

Pesticide	DAT ^{a)}	Residual amount (mg/kg)				
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Mean	SD ^{b)} (%)
Etofenprox	14	0.99	0.99	1.03	1.00	0.02
	7	1.98	1.97	1.88	1.94	0.05
	3	3.31	3.33	3.34	3.33	0.02
	0	7.45	8.07	7.43	7.65	0.37
Deltamethrin	14	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01
	7	0.11	0.10	0.11	0.11	0.00
	3	0.26	0.27	0.24	0.26	0.02
	0	0.57	0.62	0.71	0.63	0.07

^{a)} Day after treatment, ^{b)} Standard deviation

두 농약의 초기잔류량 차이는 etofenprox가 deltamethrin의 약 12배 높은 수준으로 잔류하였다. 이는 각 농약의 살포액 중 유효성분의 농도가 etofenprox (함량 10%, 1000배 희석)가 deltamethrin (함량 1%, 1000배 희석)보다 10배 높은 것과 상응하는 것으로 사료된다. 또한 etofenprox는 유탁제, deltamethrin은 유제로 제형이 다르며, 유탁제는 유제의 특성 중 유기 용제의 환경 독성 및 인화성으로 인한 보관 및 운송 문제를 줄이기 위해 유제보다 적은 양의 소수성 용매에 녹여 조제된다[13,14]. 때문에 유효성분을 고르게 살포하기 위한 농약성분의 종류 및 부제의 조성이 달라 살포 시 잔류특성에 차이를 보일 수 있다. 이 밖에도 잎 표면에 응모와 가시를 가져 농약에 노출되는 표면적이 넓고, 노지재배되어 강우와 같은 환경적 영향을 받는 것이 농약 잔류량에 영향을 미친 것으로 판단된다[15].

생물학적 반감기 및 감소상수

영경귀 중 etofenprox와 deltamethrin의 잔류농약의 소실 특성은 first-order kinetics equation을 이용해 각각의 감소 회귀식 $y = 6.0385e^{-0.1374x}$ ($R^2=0.9229$), $y = 0.5233e^{-0.1988x}$ ($R^2=0.9729$)로 나타내었다(Table 4, Fig. 1). 회귀식을 통해 영경귀 중 etofenprox 및 deltamethrin의 생물학적 반감기는 5.0일 및 3.5일로 산출되었다. 이는 각 성분의 물리화학적 특성을 비교하였을 때 etofenprox는 ether 결합을 갖는 pseudo-pyrethroids로 구분되는 반면 deltamethrin은 ester 결합을 갖는 제II형 pyrethroid로 구분되며 구조의 차이에 의해 분해과정에서도 차이가 존재한다. Pyrethroids는 공통적으로 cyclopropane 고리의 치환기 이성질화, 산 및 알칼기의 산화, dihalovinyl 유도체의 탈 할로겐화 반응을 통해 빠르게 분해된다. Deltamethrin이 속한 제II형 pyrethroids는 탈카르복실화로 인한 광화학 반응을 통해 빠르게 분해되며, esterase를 갖는 미생물에 의해서도 탈카르복실화 반응을 통해 분해된다. 반면 non-ester pyrethroids인 etofenprox는 deltamethrin과 달리 탈카르복실화 및 가수분해가 일어나지 않는다. 대신 과산화수소가 수산화 라디칼과 반응하여 진행되는 ether cleavage로 수화 반응을 일으킨다. 위와 같은 잔류 양상의 차이는 deltamethrin이 etofenprox보다 더 반감기 일수가 짧게 되는 결과의 요인으로 사료된다[8,16].

다른 작물과 영경귀의 반감기를 비교하였을 때 etofenprox는 영경귀(5.0일)가 엽채류인 애호박 잎(7.1일), 엽경채류인 파(7.9일)보다는 짧았다[15,17]. Deltamethrin의 경우 반감기는 영경귀(3.5일)에서 엽채류인 포도잎(5.68~7.22일)보다 길었다[18]. 이는 각 작물마다 갖는 증체율, 농약에 대한 체내 흡수율 및 흡착력 등의 고유한 특성과, 온·습도, 강우, 일조량 등의 재배환경 조건이 농약의 거동에 영향을 준 것으로 사료된다[19-21].

위해성 평가

Etofenprox와 deltamethrin의 ADI는 각각 0.03 mg/kg·b.w./day, 0.01 mg/kg·b.w./day로 설정되어 있으며(식품의약품안전처, 2024), 시험 농약의 최대잔류량은 8.07 및 0.71 mg/kg이었다(Table 5). 실제 농업환경 내 섭취 시나리오(수확 0, 3, 7, 14일 전 농약 처리)를 고려하여 위해성 평가를 실시하였다. 국내 전체 축산 섭취자의 99퍼센타일을 대상으로 HI를 계산한 결과, 가장 위해성이 높은 살포 후 당일 수확 처리구에서 etofenprox는 36.9%, deltamethrin는 9.7%로(Table 6), HI가 1보다 낮아 위해성이 낮다고 판단되었다(미국환경보호청, 2024). 수확 3일, 7일 및 14일 전 농약 처리구에서 etofenprox의 경우 15.3%, 9.0% 및 4.7%이

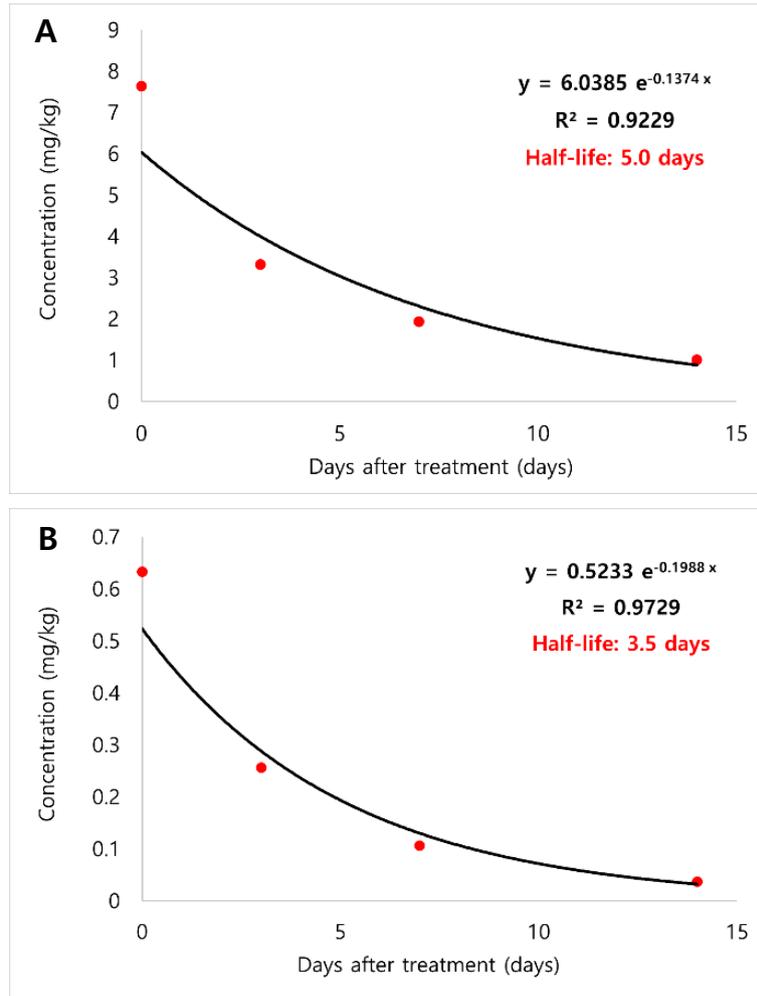


Fig. 1. Dissipation kinetics of etofenprox (A), deltamethrin (B) sprayed onto *Cirsium japonicum var. spinosissimum*.

Table 6. Hazard index (%) of exposure scenarios of pesticides for different treatment groups

Pesticide	HI of p99 ^{a)} (%)			
	14 DAT ^{b)}	7 DAT	3 DAT	0 DAT
Etofenprox	4.7	9.0	15.3	36.9
Deltamethrin	0.5	1.5	3.7	9.7

^{a)} Hazard index of 99th percentile of the distribution of intake amounts, ^{b)} Day after treatment

였으며, deltamethrin의 경우 3.7%, 1.5% 및 0.5%로 살포 후 당일 수확 시나리오에 비해 위해성이 낮았다. etofenprox의 경우 수확 7일 전 처리구, deltamethrin의 경우 수확 당일 처리구에서 HI가 10% 이하로 위해 지수가 매우 낮은 것으로 판단된다. 더하여 본 시험에서 확인된 농약 잔류량과 MRL 기준 충족 여부를 종합적으로 고려할 때, etofenprox는 수확 7일 전 처리구, deltamethrin은 수확 3일 전 처리구에서 영경귀 섭취 시 농약 노출 위해성이 낮아 안전한 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 영경귀 재배 시 안전한 농약 사용을 위한 안전사용기준 및 MRL 설정의 기초자료로 활용될 수 있다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: J.H.L. conceptualized, supervised the research; J.Y.L., M.H.S., J.W.Y., J.H.L., H.Y.A., G.W.P., J.W.S., H.J.S. and E.S.C. let the field investigation, measurement and collected the data; J.Y.L. performed the instrumental analysis; J.Y.L. wrote the manuscript; J.H.L., Y.S.K. provide feedback of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was supported by Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea (Project No. RS-2024-00396930).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.09>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Ji-Ho Lee.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Lee SB, Lee YJ, Song YS, Lee DB, Sung J (2019) Growth stage-based fertigation guideline for greenhouse spring Chinese cabbage. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 52(4), 429-437. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2019.52.4.429>.
2. Seong KY, Jeong MH, Hur JH, Kim JG, Lee KS, Choi KI (2004) Residues and half-lives of bitertanol and tebuconazole in greenhouse-grown peppers. *Applied Biological Chemistry*, 47(1), 113-119.
3. Hong IK, Park BR, Jeon GS, Lee SB (2016) Extraction of flavonoid components from persimmon leaf, thistle and new green. *Applied Chemistry for Engineering*, 27(3), 276-279. <https://doi.org/10.14478/ace.2016.1027>.
4. Lee JS, Paje LA, Rodriguez JP, Kang KS, Hahm DH, Shim JS, Choi YJ, Lee S (2020) Validation of an HPLC/UV analysis method for cirsimaritin in *Cirsium japonicum var. maackii*. *Korean Journal of Pharmacognosy*, 51(3), 217-221. <https://doi.org/10.22889/KJP.2020.51.3.217>.
5. Nam SH, Lee BH, Kim YJ (2018) Silymarin contents and liver protection effects of six domestic cultivated thistles. *Trends in Agriculture & Life Sciences*, 56, 55-62. <https://doi.org/10.29335/tals.2018.56.55>.
6. Yoo NY, Kim YS, Kim ST, Song SH, Lim JH, Han YL, Choi HJ, Kim YH, Seo JH, et al. (2022) Analysis of pesticide residues in stalk and stem vegetables marketed in northern Gyeonggi-do. *Journal of Food Hygiene and Safety*, 37(3), 149-158.
7. Vijverberg HP, van den Bercken J (1990) Neurotoxicological effects and the mode of action of pyrethroid insecticides. *Critical Reviews in Toxicology*, 21(2), 105-126. <https://doi.org/10.3109/10408449009089875>.
8. Schleier JJ III, Peterson RKD (2011) Pyrethrins and pyrethroid insecticides. pp. 94-131. *Green trends in insect control*. Vol. 11, Royal Society of Chemistry, USA.
9. Sun H, Yang B, Zhang Y, Liu Z (2017) Metabolic resistance in *Nilaparvata lugens* to etofenprox, a non-ester pyrethroid insecticide. *Pesticide biochemistry and physiology*, 136, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.08.009>.
10. Watanabe E, Baba K (2015) Highly sensitive quantification of pyrethroid insecticide etofenprox in vegetables with high-performance liquid chromatography and fluorescence detection. *Journal of Chromatography A*, 1385, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.01.056>.
11. Beulke S, Brown CD (2001) Evaluation of methods to derive pesticide degradation parameters for regulatory modelling. *Biology and Fertility of Soils*, 33, 558-564. <https://doi.org/10.1007/s003740100364>.
12. Song MH, Yu JW, Keum YS, Lee JH (2023) Dynamic modeling of pesticide residue in proso millet under multiple application situations. *Environmental Pollution*, 334, 121993. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121993>.
13. Tadros TF (1990) Disperse systems in pesticidal formulations. pp. 205-234. *Advances in Colloid and Interface Science*. Vol. 32.
14. Gašić S, Brkić D, Radivojević L, Tomašević A (2012) Development of water based pesticide system. *Pesticidi i fitomedicina*, 27(1), 77-81. <https://doi.org/10.2298/PIF1201077G>.
15. Kim HY, Hwang JI, Lee EH, Jeon YH, Kim JH, Ahn JW, Park HJ, Chung CK, Kim SY, et al. (2012) Residue patterns of insecticide flubendiamide by varieties of peaches. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 31(2), 152-156. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2012.31.2.152>.
16. Mendes KF, de Sousa RN, da Costa LA, Junior MAG (2023) Understanding the environmental behavior of herbicides: A systematic review of practical insights. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1002280>.

17. Hwang KW, Bang WS, Jo HW, Moon JK (2015) Dissipation and removal of the etofenprox residue during processing in spring onion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(30), 6675-6680. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02345>.
18. Balkan T, Kara K (2023) Dissipation kinetics of some pesticides applied singly or in mixtures in/on grape leaf. *Pest Management Science*, 79(3), 1234-1242.
19. Saber AN, Malhat FM, Badawy HM, Barakat DA (2016) Dissipation dynamic, residue distribution and processing factor of hexythiazox in strawberry fruits under open field condition. *Food chemistry*, 196, 1108-1116. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.052>.
20. Jacobsen RE, Fantke P, Trapp S (2015) Analysing half-lives for pesticide dissipation in plants. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 26(4), 325-342. <https://doi.org/10.1080/1062936X.2015.1034772>.
21. Chen G, Liu F, Zhang X, Zhang R, Cheng A, Shi D, Dong J, Liao H (2022) Dissipation rates, residue distribution, degradation products, and degradation pathway of sulfoxaflor in broccoli. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59592-59605. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20037-z>.