



ORIGINAL ARTICLES

갯잎 중 플루벤디아마이드 및 테플루벤주론의 잔류 소실특성 및 세척방법에 따른 제거효과

김장훈¹ · 강동현² · 양승현³ · 최 훈^{1*}¹전북대학교 생물환경화학과, ²(주)대승바이오팜, ³(재)한국화학융합시험연구원

Residual Dissipation Kinetics and Washing Removal Effects for Flubendiamide and Teflubenzuron in Perilla Leaves (*Perilla frutescens*)

Jang-Hun Kim¹, Dong-Hyeon Kang², Seung-Hyun Yang³, and Hoon Choi^{1*}¹Department of Bioenvironmental Chemistry, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea²Daeseungbiofarm Co., Ltd., Daejeon 34127, Korea³Korea Testing & Research Institute, Hwasun 58141, Korea

(Received on December 4, 2025. Revised on December 9, 2025. Accepted on December 9, 2025)

Abstract Our study aimed to investigate the dissipation behavior of the insecticides flubendiamide and teflubenzuron in perilla leaves (*Perilla frutescens*) and to establish their pre-harvest residue limits (PHRLs). We also evaluated the efficiency of five washing methods to remove pesticides and identified effective approaches to reduce pesticide residues in households. Under safe-use standards, flubendiamide and teflubenzuron displayed comparable initial residue levels after the last application. For a duration of 10 days, the dissipation proportion of flubendiamide was 59% to 76% and that of teflubenzuron was 77% to 86%. Teflubenzuron displayed a relatively fast dissipation rate with a biological half-life of 4.0 to 6.2 days, when compared to 4.5 to 7.5 days for flubendiamide. Using the upper 95% confidence limit of the dissipation constant together with crop-specific maximum residue limits, the PHRLs 10 days before harvest were 31.50 mg/kg for flubendiamide and 11.27 mg/kg for teflubenzuron. The average removal efficiencies of five washing methods ranged from 40.1% to 68.3% for flubendiamide and 71.9% to 89.3% for teflubenzuron. Neutral detergent washing exhibited the highest removal efficiency, ranging from 61.4% to 68.3% for flubendiamide and from 84.4% to 89.3% for teflubenzuron. The high rate of removal of teflubenzuron is attributed to its high hydrophobicity and large proportion of surface residues. Our study's findings could be applied to manage PHRL-based residues before shipment, which will ensure consumer safety.

Key words: Flubendiamide, teflubenzuron, perilla leaves (*Perilla frutescens*), pre-harvest residue limit, washing methods

서 론

농산물 중 채소류는 생산량 및 소비량이 높은 주요 식품군으로, 풍부한 식이 섬유, 비타민 및 무기질을 함유하고 있어 소화 기능 개선, 면역력 강화, 체중 조절 등의 건강상 이점을 제공한다(Park et al., 2016). 최근 국내 채소 섭취량은 꾸준히 증가하고 있으며, 이는 건강하고 균형 잡힌 식단에 대한

관심과 신선하고 영양가 높은 농산물 소비에 대한 소비자의 요구에 따른 것이다(Madsen et al., 2023; MAFRA, 2024).

갯잎(*Perilla frutescens*)은 채소류 중 국내에서 널리 소비되는 대표적 엽채류로, 2024년 기준 연간 약 3만 7천톤이 생산되었다(RDA, 2025). 엽채류는 재배과정 중 병해충 발생이 빈번하여 농약 사용 의존도가 높으며, 중량 대비 넓은 표면적을 갖기 때문에 농약 살포 시 초기 부착량이 높게 나타나는 경향이 있다. 특히, 갯잎은 잎 표면에 밀도 높은 모용(trichome)을 가지고 있어 타 엽채류에 비해 살포된 농약이 부착 및 잔류하기 용이하다(Ripley et al., 2003; Park et al.,

*Corresponding author

E-mail: hchoi0314@jbnu.ac.kr

2016; Zhou et al., 2021).

국내 모니터링 결과에 따르면, 갯잎 중 농약 검출율은 약 20~50% 범위에서 보고되고 있으며 이 중 부적합율은 약 2~5% 수준으로 나타났다(Cho et al., 2009; Park et al., 2016; Ryu et al., 2025). 농약의 과다 노출은 두통, 메스꺼움 등의 급성 독성과 더불어 암, 생식 기능 저해, 내분비계 교란 등 만성적 건강영향을 초래할 수 있다(Park et al., 2016). 이에 따라 소비자들은 소비 단계에서 세척을 통한 잔류 농약 저감 방법을 널리 활용하고 있으며, 다양한 세척방법의 제거효과를 과학적으로 평가하는 것은 소비자 건강안전 확보 측면에서 중요하다.

살충제 flubendiamide와 teflubenzuron는 나비목 해충 방제에 일반적으로 사용되는 침투이행성 농약으로 각각 곤충의 ryanodine receptor 기능 저해와 키틴 생합성 저해를 통해 살충효과를 나타낸다(Turner, 2021). 두 약제는 유사한 극성을 가지지만 수용해도, 제형 등 물리화학적 특성이 상이하여 작물내 잔류 소실 속도와 세척에 의한 제거효율이 서로 다르게 나타날 가능성이 있다. 따라서 동일 조건에서 두 약제의 잔류 소실 특성 및 세척 저감 효과를 비교 및 평가하는 것은 재배 현장의 방제 전략 수립뿐 아니라 소비자 건강위해성 저감 전략 마련을 위한 과학적 근거자료로서 가치가 있다.

세척은 소비자가 일상적으로 수행할 수 있는 대표적인 잔류 저감 방법으로, 흐르는 물 세척, 담금 세척, 소금물 및 식초 수 처리 등 다양한 방식이 제안되어(Kim et al., 2022; Hwang et al., 2015; Yang et al., 2022). 그러나, 세척효과는 농약의 물리화학적 특성, 작물 표면 구조, 표면 부착 형태 등에 따라 크게 달라지며, 특히 엽채류는 잔류 저감물의 변동 폭이 큰 것으로 보고된 바 있다(Yang et al., 2022; Yang and Choi, 2024). 기존 연구의 상당수는 농산물을 농약 희석액에 직접 침지 후 세척효과를 평가하였으나, 이러한 접근법은 실제 소비 단계 조건을 충분히 반영하지 못하여 제거효율이 과대 평가될 수 있다(Kim et al., 2022; Yang et al., 2022). 실제 소비되는 농산물은 농약 살포 후 일정 기간이 경과된 상태에서 수확되므로 표면 잔류보다는 조직 내부 잔류 비중이 높아지는 경향이 있으며 특히, 침투이행성 농약일 경우 그 경향이 보다 뚜렷하다. 이에 따라 농약의 농산물 잔류분포 특성을 고려한 조건에서 세척 제거효율을 평가하는 것이 보다

현장성과 소비자 실생활에 부합되는 접근법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 갯잎에 처리된 살충제 flubendiamide와 teflubenzuron의 경시적 잔류농약 소실특성을 구명하고, 수확 전 살포일 기간(Pre-harvest interval, PHI) 경과 후 수확된 농산물을 대상으로 다양한 세척방법의 잔류농약 제거효율을 평가하였다. 아울러, 도출된 잔류농약 감소상수를 기반으로 생산단계 농약 잔류허용기준(Pre-Harvest Residue Limit, PHRL)을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

시약 및 재료

포장시험에 사용한 농약 제품은 시판품으로, flubendiamide 20% 액상수화제(제품명; 애니충)와 teflubenzuron 5% 액상수화제(제품명; 노몰트, (주)경농)를 농약 판매처에서 구매하였다. 표준품 flubendiamide(순도 98.3%)와 teflubenzuron(순도 98.7%)은 Sigma-Aldrich(St. Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 추출 및 정제용 유기용매인 acetone, dichloromethane, n-hexane은 Daejung Chemicals & Metals(Siheung, Korea)에서, acetonitrile은 J.T. Baker (WI, USA)에서 확보하였다. 증류수(18.2 MΩ·cm)는 Milli-Q water purification system (Millipore, Bedford, MA, USA)을 이용하여 조제하였다. 고체시약으로 sodium chloride 및 sodium sulfate(anhydrous)는 Junsei (Tokyo, Japan)에서, Florisil (0.150-0.250 mm)은 Merck (Darmstadt, Germany)에서 구매하였다. 농산물 세척 실험에서는 가정에서 사용 가능한 시판 세척제를 사용하였으며, 중성세제(살림백서 주방세제, (주)에이엔케이코스), 베이킹 소다(한·입 100% 베이킹 소다, LG생활건강), 칼슘과우더(리노베라, Eco Biotech Co., LTD.), 식초(양조식초, (주)오뚜기)를 시중 소매점에서 구입하여 사용하였다.

포장시험

포장시험은 충남 금산군(Field I), 전남 곡성군(Field II) 및 충북 음성군(Field III)의 시설재배지에서 수행하였다. 각 농약별 시험구는 3반복구로 구성하였으며 반복구 면적은 10 m² 이상으로 설정하였다. 시험구 간 교차오염 방지를 위해 구획 간 1 m 이상의 완충지대를 두었다. 시험기간 동안 시설 내 온·습도는 CAS data loggers(EL-21CFR-2-LCD,

Table 1. Safe-use standards for flubendiamide and teflubenzuron in perilla leaves

Pesticide	Formulation	Application			PHI ^{b)} (days)	MRL ^{c)} (mg/kg)
		Dilution	Spray No.	Rate (g a.i./m ²)		
Flubendiamide	SC ^{a)} , 20%	2,000	2	0.060	3	15
Teflubenzuron	SC, 5%	2,000	1	0.015	7	5.0

^{a)}Suspension concentrate, ^{b)}Pre-harvest interval, ^{c)}Maximum residue limit

Lascar Electronics, Erie, PA, USA)를 이용하여 측정하였으며, 각각 12.5–21.3°C, 41.8–92.1% 범위로 유지되었다. 약제 처리는 안전사용기준에 따라 전동식 살포기(MARUYAMA, MSB-1500Li, Tokyo, Japan)를 이용하여 수행하였다(Table 1). 마지막 약제 살포 후 살포액이 충분히 건조된 시점에 0일차 시료를 채취하였으며, 약제별 PHI를 포함하여 10일 동안 총 6회에 걸쳐 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 polyethylene bag에 보관하여 24시간 이내 실험실로 운반하였고, dry ice를 이용해 균질화 후 -20°C 이하에서 저장하였다.

깻잎 세척 과정

세척 실험은 소비자가 실제로 사용하는 세척 형태를 반영하여 물, 중성세제, 베이킹 소다, 칼슘과우더 및 식초를 세척제로 선정하여 수행하였다. 세척용액은 6 L의 물에 1종 중성세제 9 g, 베이킹 소다 60 g, 칼슘과우더 3 g 또는 식초 300 mL를 용해 또는 희석하여 조제하였다. PHI 3일자에 수확된 깻잎을 세척용액 또는 물에 1분간 침지 후, 1 L/10 s의 유량 조건의 흐르는 물에서 30초간 2회 세척하였다(Yang and Choi, 2024). 세척 후 시료는 실온에서 2~3시간 건조시킨 후 dry ice로 균질화하여 -20°C 이하에서 보관하였다. 세척 전·후 잔류량을 비교하여 세척효율을 산출하였으며, 일원분산분석(one-way ANOVA)으로 세척방법 간 유의성을 검정하였다. 사후검정은 Duncan's multiple range test를 사용하여 $p < 0.05$ 수준에서 수행하였다. 통계분석은 SPSS software (ver 18.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하였다.

깻잎 중 잔류농약 분석

균질화된 시료 10 g에 acetone 100 mL를 가하여 고속진탕기(2010 Geno/GrinderR, SPEX® SamplePrep, Metuchen, NJ, USA)를 이용해 1,300 rpm에서 3분간 추출하였다. 감압여과 후 acetone 50 mL로 잔여물을 추가 세척하였다. 추출액에 증류수 450 mL 및 포화식염수 50 mL를 첨가한 뒤, flubendiamide는 dichloromethane 70 mL씩 2회, teflubenzuron은 n-hexane 100 mL 및 50 mL 각 1회 분배하였다. 유기층은 sodium sulfate (anhydrous)를 통과시켜 건조한 후 감압농축하고 acetone/n-hexane(10/90, v/v) 10 mL로 재용해하였다. Glass column에 flubendiamide 5 g 또는 teflubenzuron 10 g의 Florisil을 건식 충전하였다. 재용해액 5 mL 주입한 뒤 flubendiamide는 acetone/n-hexane (15/85, v/v) 50 mL로 세척, acetone/n-hexane (25/75, v/v) 50 mL로 용출하였고, teflubenzuron은 acetone/n-hexane(5/95, v/v) 150 mL 세척 후 acetone/n-hexane(10/90, v/v) 100 mL로 용출하였다. 용출액은 40°C 수욕상에서 감압농축 후 acetonitrile 2.5 mL로 재용해하여 분석용 시료로 사용하였다. 정량분석은 diode array detector (DAD)가 장착된 Waters Alliance HPLC (Waters Corp.,

MA, USA)를 이용하여 수행하였다. 분석칼럼으로 flubendiamide는 Kinetex C18 (250 × 4.6 mm, 3 μm; Phenomenex, Torrance, CA, USA), teflubenzuron은 Unison UK C8(250 × 4.6 mm, 3 μm; Imtakt, Kyoto, Japan)를 사용하였다. 이동상은 물(A)과 acetonitrile(B)을 사용하였으며, flubendiamide는 isocratic(A:B = 35:65, v/v), teflubenzuron은 gradient 조건(0–2 min: 10% B, 2–8 min: 60% B, 8–20 min: 60% B)으로 분석하였다. 유속은 flubendiamide 0.8 mL/min, teflubenzuron 1.0 mL/min이었으며 검출파장은 각각 253 nm 및 258 nm였다. 주입량은 모두 10 μL였다.

분석법 검증

분석법은 European SANTE/11312/2021(EC, 2021) 가이드라인에 따라 검증하였다. 표준용액은 농약 표준물질을 acetonitrile에 용해하여 stock solution으로 조제한 후 단계적 희석으로 0.1–10 mg/L 농도의 working solution을 제조하였다. Working solution을 HPLC에 주입해 얻은 검량선의 결정계수(R^2)는 0.98 이상으로 우수한 직선성을 보였다. 기기 검출한계, 주입량, 시료 채취량 및 희석배수를 고려하여 산출된 분석법 정량한계(Method Limit of Quantitation, MLOQ)는 모든 농약에서 0.05 mg/kg이었다. 회수율 시험은 teflubenzuron은 MLOQ×10, flubendiamide는 MLOQ×50 이외에 각각의 MRL 수준에서 3회 반복으로 수행되었으며, 회수율은 평균 97.9–115.2%로 SANTE 기준(70–120%)를 충족하였다. 상대표준편차(RSD)는 모두 10% 미만이었다. 저장안정성 평가에서 flubendiamide는 137일, teflubenzuron은 198일 저장 후에도 회수율이 평균 98.3–109.3% 범위로 나타나 저장기간 동안 안정성이 확인되었다.

잔류 감소상수 및 생산단계 잔류허용기준 산출

약제 살포 후 경과일수에 따른 잔류농약 감소특성은 단순 1차 감쇠 모델 [$R_t = R_0 \times \exp(-\lambda \times t)$]에 적합하여 감소상수(λ , day⁻¹)와 초기 잔류량(R_0 , mg/kg)을 회귀분석으로 산출하였다. 회귀분석은 SPSS 프로그램을 사용하였으며, F-검정 및 t-검정으로 유의성을 확인하였다(Yang and Choi, 2024). 생물학적 반감기는 식 $DT_{50} = \ln 2 / (-\lambda)$ 로 계산하였다. 생산단계 농약 잔류허용기준(PHRL_i)은 농약별 잔류허용기준(MRL)과 감소상수 95% 신뢰수준 상한값(95% upper confidence limit, λ_{UCL})을 이용하여 수식 $PHRL_i = MRL / \exp(\lambda_{UCL} \times t)$ 에 따라 산출하였다(MFDS, 2025).

결과 및 고찰

깻잎 중 초기 잔류 특성

깻잎에 농약 flubendiamide는 7일 간격 2회, teflubenzuron은 1회 살포하였으며, 0일차 잔류량은 각각 13.8–22.2 mg/kg

Table 2. Residue levels of flubendiamide and teflubenzuron during 10 days after the final application in perilla leaves

Days after treatment	Residue levels (mg/kg) ^{a)}					
	Flubendiamide			Teflubenzuron		
	Field I	Field II	Field III	Field I	Field II	Field III
0	13.8 ± 0.9	16.0 ± 0.6	22.2 ± 0.7	15.8 ± 1.6	12.1 ± 0.3	18.9 ± 0.9
1	13.5 ± 1.1	14.0 ± 0.3	21.7 ± 0.4	13.0 ± 0.8	10.8 ± 0.2	16.4 ± 1.8
2	10.8 ± 1.2	13.0 ± 0.5	20.0 ± 1.0	8.1 ± 1.2	10.1 ± 0.8	14.7 ± 2.2
3	10.7 ± 1.2	12.1 ± 1.5	9.1 ± 0.2	6.4 ± 0.2	8.9 ± 2.3	11.7 ± 1.3
5	9.6 ± 0.7	9.9 ± 0.3	8.1 ± 1.0	5.4 ± 0.3	7.2 ± 0.2	8.9 ± 1.7
7	6.9 ± 0.1	8.1 ± 1.0	7.0 ± 0.1	4.1 ± 0.4	4.9 ± 0.5	4.7 ± 0.8
10	5.6 ± 0.4	5.8 ± 0.3	5.3 ± 0.4	3.7 ± 0.2	2.8 ± 0.2	2.7 ± 0.3
Dissipation constant ^{b)}	-0.1187 ± 0.0231			-0.1650 ± 0.0138		

^{a)}Mean ± standard deviation (n=3), ^{b)}95% confidence interval for dissipation constant calculated from the mean residue per day for the three fields

및 12.1–18.9 mg/kg이었다(Table 2). 농약 살포에 따른 잔류량은 농약 살포액의 농도, 살포 횟수에 따라 결정됨을 고려하면, flubendiamide의 살포액 농도가 teflubenzuron 보다 약 4배 높고 살포횟수 또한 1회 더 살포하였기에 flubendiamide의 잔류량이 높을 것으로 예측됨에도 0일차 잔류량은 유사한 수준으로 확인되었다. 이는 초기 잔류량이 단순히 살포 농도나 살포 횟수에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 약제의 물리화학적 특성과 작물 표면과의 상호작용에 의해 크게 좌우됨을 시사한다. 특히, 포장 I에서 teflubenzuron의 잔류량이 flubendiamide보다 더 높게 나타난 것은 teflubenzuron이 높은 소수성(logP 4.98)과 낮은 물 용해도(<0.01 mg/L)로 인한 낮은 침투성을 가져 잎 표면에 부착되어 잔류할 가능성이 상대적으로 크기 때문으로 판단된다(Turner, 2021). 갯잎은 고밀도 모용(trichome)을 가지고 있어 약제의 부착, 흡수 및 잔류 패턴에 중요한 영향을 미치며, teflubenzuron은 모용과 표면 구조에 쉽게 포집되는 반면, flubendiamide는 비교적 빠르게 조직 내부로 이동 또는 흡수될 수 있다(Zhou et al., 2021). 이러한 차이로 인해 두 약제 간 살포 농도 및 횟수 차이가 있음에도 불구하고 초기 표면 잔류량의 차이가 제한적으로 나타난 것으로 보인다. 요컨대, 초기 잔류량은 살포 조건보다 약제의 표면 부착성 및 흡수성이 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 포장 간 잔류 수준의 차이는 실제 농업 환경에서 나타나는 현장 변동성을 반영하는 결과로 해석된다. 포장 III에서는 flubendiamide 및 teflubenzuron의 초기 잔류량이 다른 포장에 비해 높게 나타났다. 포장 간 기온 차이는 크지 않았으나, 포장 III의 시험은 4월 초부터 4월 말까지 진행됨에 따라 재배시기의 환경 특히, 광량 등의 차이가 생육 발달속도 및 수확 시점의 생육 상태에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 이러한 생육 단계 및 작물체 표면 특성의 차이는 농약 살포액의 부착률에 변화를 유발하여 초기 잔류량 차이로 이어졌을 것으로 판단된다. 다만, 이러한 해석을

보다 명확하게 입증하기 위해서는 약제별 표면 부착성, 조직 흡수 속도, 모용과의 상호작용 등을 정량적으로 비교할 수 있는 추가 연구가 요구된다. 특히, 약제의 소수성, 침투성 및 제형 특성이 실제 잎 표면에서 어떻게 작용하는지 구명하는 실험은 본 연구 결과의 기전을 보다 분명하게 밝히는데 기여할 것이다.

갯잎 중 농약 경시적 소실 특성

본 연구에서 flubendiamide 및 teflubenzuron의 잔류량은 약제 살포 후 10일 동안 각각 초기 잔류량의 약 59–76% 및 77–86%가 소실되는 것으로 나타났다(Table 2). 일반적으로 농약 잔류량은 살포 직후에는 표면부착에 의해 높은 수준을 보이나, 이후에는 주로 생물학적 분해, 광분해 및 작물 증체에 따른 희석효과에 의해 감소한다. 그러나, 갯잎은 뿌리, 줄기 및 과실의 비대성장을 보이는 작물과 달리 증체량이 미미한 엽채류이므로, 잔류농약 감소는 주로 식물체 내 생물학적 분해와 환경 요인에 의한 화학적 분해에 의해 진행된 것으로 판단된다(Yang and Choi, 2024).

경시적 잔류 감소를 1차 감쇠 모델에 적용한 회귀분석 결과, 두 약제 모두에서 R² ≥ 0.9의 높은 결정계수를 보였으며, 이는 소실 과정이 시간 경과에 따라 first-order kinetics을 따르고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 다수의 엽채류 및 과채류에서 보고되는 전형적 1차 감쇠 거동과 일치한다. 산출된 flubendiamide 및 teflubenzuron의 평균 감소상수(λ)는 각각 -0.1566–-0.0927 day⁻¹ 및 -0.1750–-0.1119 day⁻¹ 범위로 나타났다(Fig. 1). 이로부터 계산된 생물학적 반감기 (DT₅₀)는 flubendiamide 4.5–7.5일 및 teflubenzuron 4.0–6.2일로, teflubenzuron이 flubendiamide보다 더 빠른 소실속도를 보였다. 한편, 앞서 언급한 바와 같이 재배 시기의 생육환경(기온, 광량 등)이 포장 III과 다른 포장 간에 차이를 보임에 따라, 포장 III의 갯잎은 상대적으로 빠른 생육발달이 이루

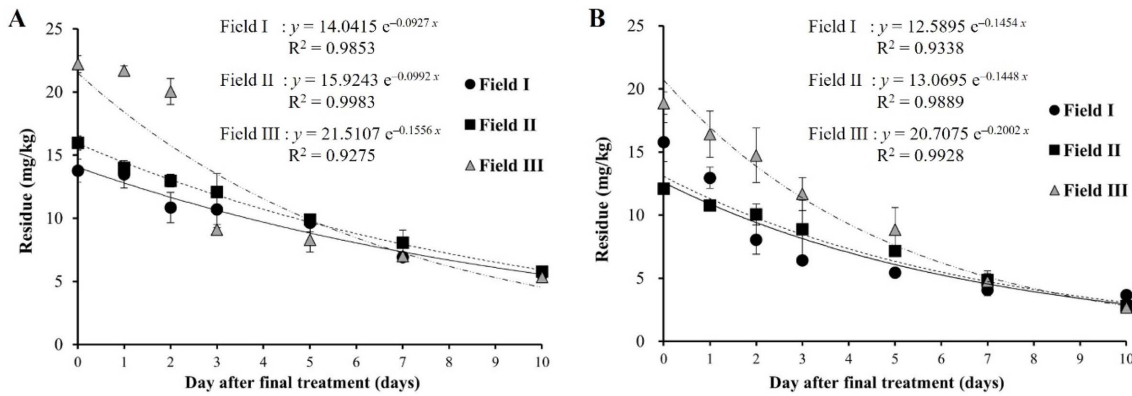


Fig. 1. Dissipation patterns of flubendiamide (A) and teflubenzuron (B) over 10 days in perilla leaves.

어졌을 것으로 추정된다. 이러한 생육 단계의 차이는 농약의 대사 및 분해 뿐 아니라 증체에 따른 희석효과에 영향을 미쳐, 결과적으로 포장 III에서 더 짧은 생물학적 반감기가 나타난 원인 중 하나로 판단된다.

Flubendiamide의 물 용해도는 0.03 mg/L로 낮은 수준이지만, teflubenzuron보다는 약 3배 높은 수준으로 상대적으로 식물체 내로의 흡수 및 이동 가능성이 크고, 이에 따라 조직 내부에서의 생물학적 분해가 더 활발하게 일어날 수 있음을 의미한다(Turner, 2021). 반면, teflubenzuron은 물 용해도가 0.01 mg/L 미만으로 극히 낮아 대부분이 잎 표면에 잔류하며, 그 결과 광분해, 산화, 미량 휘발 등 외부 환경 요인의 영향을 직접적으로 받는 비중이 높다고 볼 수 있다. 이러한 표면 노출 특성은 teflubenzuron의 잔류량이 비교적 빠르게 감소하여 flubendiamide보다 짧은 생물학적 반감기를 나타낸 원인 중 하나로 판단된다.

Flubendiamide의 생물학적 반감기는 배추에서 3.9–4.5 일 (Mohapatra et al., 2010), 케일에서 2.4–2.7 일(Kim et al., 2022), 토마토에서 3.9 일(Mohapatra et al., 2011)로 보고되어, 본 연구의 깻잎보다 빠른 잔류 소실특성을 보였다. 반면, 취나물에서는 6.8–9.9일(Yang and Choi, 2024)로 더 긴 생물학적 반감기가 관찰되어, 작물 특성에 따른 차이가 확인되었다. Teflubenzuron 또한 겨자채에서 7.8일, 쪽파에서 3.6일로 보고되어 생물학적 반감기가 작물에 따라 상이하게 나타났다(Kim et al., 2024; Noh et al., 2012). 이처럼 농약의 생물학적 반감기는 작물의 형태적 및 생리적 특성, 농약의 물리화학적 특성, 환경 조건 및 생분해성 등 다양한 요인의 복합적 영향에 의해 결정되는 것으로 보인다.

생산단계 농약 잔류허용기준 산출

깻잎 중 flubendiamide 및 teflubenzuron의 감소상수 (λ)와 해당 농약의 잔류허용기준(MRL)을 활용하여 생산단계 농약 잔류허용기준(PHRL)을 산출하였다. PHRL 산출에는 감소상수의 95% 신뢰수준 상한값(λ_{UCL} , 95% upper confidence

Table 3. Guidelines for selecting dissipation constant through MRLs and residue levels at PHI for PHRLs

Residue levels at PHI ^{a)}	Dissipation constant (λ_{UCL}) ^{b)}
< 20% of MRL ^{c)}	Lowest
20 to 60% of MRL	λ_{UCL} from all fields
60 to 80% of MRL	Highest
> 80% of MRL	PHRL ^{d)} setting postponed

^{a)}Pre-harvest interval, ^{b)}95% confidence interval for dissipation rate, ^{c)}Maximum residue limit, ^{d)}Pre-harvest residue limit

limit of the dissipation constant)을 적용하였으며, 이는 PHI 시점의 잔류량이 MRL 수준을 초과하지 않도록 설정하기 위한 보수적 접근법에 따른 것이다(Table 3). 본 연구에서는 두 약제 모두에서 포장시험 중 가장 큰 λ_{UCL} 값을 사용하여 PHRL을 산출하였다(MFDS, 2025).

깻잎의 MRL(flubendiamide 15 mg/kg, teflubenzuron 5.0 mg/kg)을 기준으로 산출한 수확 10일 전 PHRL은 각각 31.50 mg/kg(flubendiamide) 및 11.27 mg/kg(teflubenzuron)으로 나타났다(Fig. 2). 즉, 농가에서 수확 10일 전에 잔류량을 검사하여 해당 값이 PHRL 이하로 확인될 경우, 실제 출하 시점의 잔류량이 MRL 이하가 될 것으로 판단할 수 있다. 이와 같이 PHRL 기반 출하 관리체계는 농가가 적정 출하시점을 결정하여 경제적 손실을 예방하는데 도움이 될 뿐 아니라, 소비자에게는 사전 안전관리가 이루어진 농산물을 제공함으로써 건강안전성 확보 및 유통 농산물에 대한 안전 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

세척 방법에 따른 깻잎 중 농약 제거효과

소비자는 농산물 섭취 전 세척 과정을 통해 잔류농약에 대한 우려를 감소시키기 위해 지속적으로 노력하고 있다. 이에 따라 효율적이고 실효성 있는 세척방법을 제공하는 것은 소비자의 건강 보호 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 식품의약품안전처 또한 농산물별 권장 세척방법을 안내

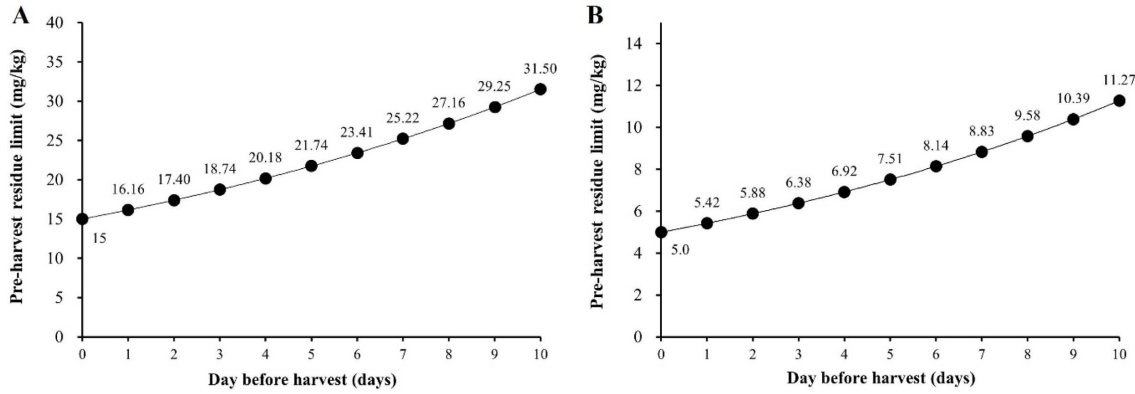


Fig. 2. Pre-harvest residue limits (PHRLs) for flubendiamide (A) and teflubenzuron (B) in perilla leaves.

Table 4. Residue levels and removal efficiencies of flubendiamide and teflubenzuron in perilla leaves after washing treatments

Washing	Residue levels, mg/kg (Removal efficiencies, %) ^{a)}					
	Flubendiamide			Teflubenzuron		
	Field I	Field II	Field III	Field I	Field II	Field III
Before washing	10.7 ± 1.2	12.1 ± 1.5	9.1 ± 0.2	6.4 ± 0.2	8.9 ± 2.3	11.7 ± 1.3
Tap water bath	4.7 ± 0.1 (55.3 ± 5.2)	4.7 ± 0.2 (61.2 ± 3.1)	4.0 ± 0.6 (56.4 ± 6.7)	0.7 ± 0.1 (88.8 ± 0.7)	2.0 ± 0.1 (76.1 ± 6.0)	2.1 ± 0.1 (81.7 ± 2.5)
Neutral detergent	3.5 ± 0.1 (67.4 ± 3.6)	3.8 ± 0.1 (68.3 ± 3.7)	3.5 ± 0.4 (61.4 ± 4.5)	0.7 ± 0.1 (89.3 ± 0.8)	1.3 ± 0.1 (84.4 ± 4.5)	1.8 ± 0.1 (84.4 ± 2.1)
Baking soda	6.4 ± 0.1 (40.1 ± 7.5)	6.4 ± 0.2 (47.0 ± 4.4)	5.3 ± 0.1 (41.3 ± 1.0)	0.9 ± 0.1 (85.2 ± 1.2)	2.4 ± 0.1 (71.9 ± 7.5)	2.6 ± 0.1 (77.6 ± 2.8)
Calcium powder	5.2 ± 0.1 (51.4 ± 5.7)	5.4 ± 0.2 (55.4 ± 4.6)	5.0 ± 0.1 (45.5 ± 2.4)	1.1 ± 0.2 (83.6 ± 3.7)	2.0 ± 0.2 (77.0 ± 4.8)	2.3 ± 0.1 (80.1 ± 2.0)
Vinegar	5.8 ± 0.1 (45.5 ± 6.6)	6.0 ± 0.1 (49.8 ± 6.4)	4.8 ± 0.7 (46.8 ± 8.3)	1.1 ± 0.1 (83.5 ± 0.8)	2.3 ± 0.2 (73.6 ± 4.9)	2.6 ± 0.6 (77.4 ± 7.5)

^{a)}Mean ± standard deviation (n=3)

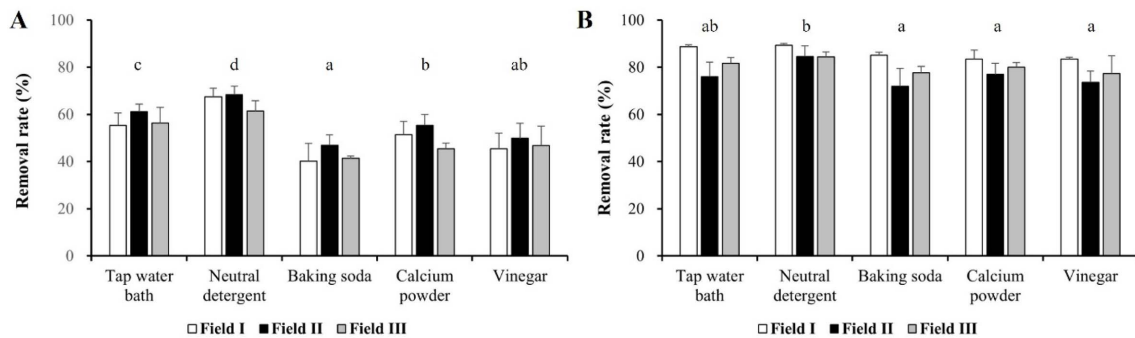


Fig. 3. Removal efficiencies of flubendiamide (A) and teflubenzuron (B) in perilla leaves by various washing methods. Difference letters within figure are significantly different at $p < 0.05$.

하고 있으며, 갯잎과 상추는 물에 5분 동안 담근 후 흐르는 물에 약 30초간 세척할 것을 권고하고 있다(MFDS, 2024).

농산물 세척 연구는 실제 소비자가 수행하는 세척 형태를 반영해야 하며(OECD, 2008), 이를 바탕으로 본 연구에서는 가정에서 일반적으로 사용되는 대표적인 세척방법을 준용하였다. 또한, 농약의 표면잔류 및 내부잔류 특성이 반영될 수

있도록 마지막 약제 살포 후 3일이 경과한 시료를 세척시험에 활용하였다. 세척방법별 평균 제거율(포장시험별 평균)은 flubendiamide 40.1–68.3% 및 teflubenzuron 71.9–89.3%로 나타났으며, teflubenzuron이 flubendiamide보다 높은 제거율을 보였다(Table 4, Fig. 3). 이는 앞서 고찰한 바와 같이 teflubenzuron이 높은 소수성과 낮은 물 용해도 특성을 갖기

때문에 잎 표면에 상대적으로 더 많이 잔류하는 경향을 가지며, 표면잔류 비중이 높은 농약일 수록 물리적 세척에 의해 쉽게 제거될 수 있기 때문이다.

세척방법 간 유의성 검정 결과, flubendiamide는 계면활성제를 함유한 중성세제를 사용할 때 가장 높은 제거효과를 보였으며, 다음으로 담근 물, 칼슘파우더, 식초, 베이킹소다 순이었다. Teflubenzuron 또한 중성세제 처리에서 가장 높은 제거율을 보였으며, 담근 물 세척은 중성세제와 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 기존 연구 또한 유사한 경향이 보고된 바 있다. 취나물에서 flubendiamide 제거율은 중성세제 사용 시 가장 높은 66.2%로 나타났으며(Yang and Choi, 2024), 케일에서는 식초 세척 시 최대 39.8%의 제거율을 보였다(Kim et al. 2022).

이와 같이 세척 제거율은 농약의 물리화학적 특성(물 용해도, 극성도 등), 농약 처리조건, 농산물의 표면 구조 및 생리화학적 특성, 표면잔류 비중, 세척방법의 차이에 따라 상이하게 결정된다(Jankowska et al., 2019). 중성세제는 잎 표면에 부착된 지용성 농약을 유화시켜 표면장력을 감소시키고 세척 효과를 향상시키는 것으로 알려져 있다. 다만, 중성세제를 사용할 경우 반드시 흐르는 물로 충분히 행구는 과정이 필요하며, 이때의 완전한 유수 조건은 잎 표면에 느슨하게 부착된 잔류농약 제거에 기여한다(Hwang et al., 2015; Yang and Choi, 2024). 기존 연구 간 차이는 세척 절차의 세부 방법 차이에서 기인할 수 있으나, 본 연구를 포함한 다수의 연구결과는 물 기반의 세척만으로도 일정 수준 이상의 잔류농약 제거가 가능함을 보여주고 있다. 요컨대, 중성세제는 가장 높은 제거율을 제공할 수 있으나, 세척시간, 노동력, 비용 대비 효용성 등을 고려할 때 소비자 관점에서는 물을 이용한 기본적인 세척이 실용성과 효과성을 동시에 갖춘 가장 적절한 방법으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 식품의약품안전처의 연구개발비(20162MFDS602)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Author Information and Contributions

Jang-Hun Kim, Department of Bioenvironmental Chemistry, Jeonbuk National University, Master student, <https://orcid.org/0009-0002-6668-5869>

Dong-Hyeon Kang, Daeseungbiofarm co., ltd., Researcher, <https://orcid.org/0009-0008-3288-0053>

Seung-Hyun Yang, Korea Testing & Research Institute, Head researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5013-3237>

Hoon Choi, Department of Bioenvironmental Chemistry, Jeonbuk National University, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9115-9636>

Conceptualization, Hoon Choi; consultation, Hoon Choi; software, Hoon Choi; validation, Seung-Hyun Yang; field trials, Dong-Hyeon Kang, Seung-Hyun Yang; formal analysis, Dong-Hyeon Kang, Seung-Hyun Yang; investigation, Dong-Hyeon Kang, Jang-Hun Kim; data curation, Jang-Hun Kim, Hoon Choi; writing-original draft, Jang-Hun Kim, Hoon Choi; writing-review & editing, Jang-Hun Kim, Hoon Choi; visualization, Jang-Hun Kim; supervision, Hoon Choi; project administration, Hoon Choi; funding acquisition, Hoon Choi.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

- Cho TH, Kim BS, Jo SJ, Kang HG, Choi BY, et al., 2009. Pesticide residue monitoring in Korean agricultural products, 2003–05. *Food Addit. Contam. Part B* 2(1):27-37. <https://doi.org/10.1080/02652030902783350>
- European Commission (EC), 2021. Analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed (Document No. SANTE/11312/2021). https://www.eurl-pesticides.eu/userfiles/file/EurlALL/SANTE_11312_2021.pdf (Accessed Dec. 03. 2025).
- Hwang KW, Bang WS, Jo HW, Moon JK, 2015. Dissipation and removal of the etofenprox residue during processing in spring onion. *J. Agri. Food Chem.* 63(30):6675-6680. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02345>
- Jankowska M, Łozowicka B, Kaczyński P, 2019. Comprehensive toxicological study over 160 processing factors of pesticides in selected fruit and vegetables after water, mechanical and thermal processing treatments and their application to human health risk assessment. *Sci. Total Environ.* 652:1156-1167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.324>
- Kim HJ, Hwang KW, Sun JH, Lee TH, Jeong KS, et al., 2022. Residual characteristics of insecticide flubendiamide in kale. *J. Appl. Biol. Chem.* 65(3):173-181. <https://doi.org/10.3839/jabc.2022.023> (In Korean)
- Kim JH, Shin JW, Choi HR, Choi WY, Choi H, 2024. Residual characteristics of the benzoylurea insecticide teflubenzuron in mustard greens. 2024 Annual Meeting on The Korean Society of Pesticide Science, Jeju, Korea. 4-6 Apr. p. 135. (In Korean).
- Madsen H, Sen A, Aune D, 2023. Fruit and vegetable consumption and the risk of hypertension: a systematic review and meta-

- analysis of prospective studies. *Eur. J. Nutr.* 62(5):1941-1955. <https://doi.org/10.1007/s00394-023-03145-5>
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2024. Major statistics on agriculture, livestock, and food, 2024. <https://lib.mafra.go.kr/skyblueimage/2965.pdf> (Accessed Dec. 03. 2025). (In Korean)
- Ministry for Food and Drug Safety (MFDS), 2024. Food safety knowledge: safe consumption of fruits and vegetables through pesticide-reducing washing methods. https://www.foodsafetykorea.go.kr/portal/board/boardDetail.do?menu_no=3120&menu_grp=MENU_NEW01&bbs_no=bbs001&ntctx_no=1100621 (Accessed Dec. 03. 2025). (In Korean)
- Ministry for Food and Drug Safety (MFDS), 2025. Preharvest residue limits of hazardous substance for agricultural products. <https://www.law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000059712#AJAX> (Accessed Dec. 03. 2025). (In Korean)
- Mohapatra S, Ahuja AK, Deepa M, Sharma D, Jagadish GK, et al., 2010. Persistence and dissipation of flubendiamide and des-iodo flubendiamide in cabbage (*Brassica oleracea* Linne) and soil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 85(3):352-356. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0063-4>
- Mohapatra S, Ahuja AK, Deepa M, Jagadish GK, Rashmi N, et al., 2011. Development of an analytical method for analysis of flubendiamide, des-iodo flubendiamide and study of their residue persistence in tomato and soil. *J. Environ. Sci. Health Part B* 46(3):264-271. <https://doi.org/10.1080/03601234.2011.540536>
- Noh HH, Lee JY, Lee KH, Park HK, Jin CW, et al., 2012. Residual characteristics of chlorantraniliprole, teflubenzuron and trifloxystrobin in shallot. 2012 Annual Meeting on The Korean Society of Environmental Agriculture, Muju, Korea. 5-6 Jul. p. 241. (In Korean)
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2008. Test No. 508: Magnitude of the pesticide residues in processed commodities, OECD guidelines for the testing of chemicals, section 5, OECD Publishing, Paris, France. <https://doi.org/10.1787/9789264067622-en>
- Park DW, Kim KG, Choi EA, Kang GR, Kim TS, et al., 2016. Pesticide residues in leafy vegetables, stalk and stem vegetables from South Korea: a long-term study on safety and health risk assessment. *Food Addit. Contam. Part A* 33(1):105-118. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1108524>
- Ripley BD, Ritcey GM, Harris CR, Denomme MA, Lissemore LI, 2003. Comparative persistence of pesticides on selected cultivars of specialty vegetables. *J. Agri. Food Chem.* 51(5): 1328-1335. <https://doi.org/10.1021/jf020139o>
- Rural Development Administration (RDA), 2025. Korean perilla leaves emerging as an export crop: ensuring stable and sustainable production. <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156714510> (Accessed Dec. 03. 2025). (In Korean)
- Ryu K, Ryu M, Park H, Kim A, Lee J, et al., 2025. Risk assessment of pesticide residues in vegetables at local food markets in Gwangju (2022-2024). *Korean J. Pestic. Sci.* 29(1):9-22. <https://doi.org/10.7585/kjps.2025.29.1.9> (In Korean)
- Turner JA, 2021. The pesticide manual (19th ed). British Crop Production Council, Hamsphire, UK. pp. 519-520, 1117-1118.
- Yang SJ, Mun S, Kim HJ, Han SJ, Kim DW, et al., 2022. Effectiveness of different washing strategies on pesticide residue removal: the first comparative study on leafy vegetables. *Foods* 11(18):2916. <https://doi.org/10.3390/foods11182916>
- Yang SH, Choi H, 2024. Insecticides chlorantraniliprole and flubendiamide in *Aster scaber*: dissipation kinetics, processing effects, and risk assessment. *Heliyon* 10(12):e33216. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33216>
- Zhou P, Yin M, Dai S, Bao K, Song C, et al., 2021. Multi-omics analysis of the bioactive constituents biosynthesis of glandular trichome in *Perilla frutescens*. *BMC Plant Biol.* 21(1):277. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03069-4>

갯잎 중 플루벤디아마이드 및 테플루벤주론의 잔류 소실특성 및 세척방법에 따른 제거효과

김장훈¹ · 강동현² · 양승현³ · 최 훈^{1*}

¹전북대학교 생물환경화학과, ²(주)대승바이오팜, ³(재)한국화학융합시험연구원

요 약 본 연구는 갯잎(*Perilla frutescens*)에 처리된 살충제 flubendiamide 및 teflubenzuron의 경시적 잔류 소실특성을 구명하고, 이를 토대로 생산단계 농약 잔류허용기준(Pre-Harvest Residue Limit, PHRL)을 설정하였다. 이와 더불어 소비자가 사용 가능한 다양한 세척방법에 따른 잔류농약 제거효율을 평가하여 실효성 있는 세척방법을 제안하고자 수행되었다. 농약 안전사용기준에 따라 약제를 살포한 후 잔류수준을 평가한 결과, flubendiamide와 teflubenzuron의 초기 잔류량(0일차)은 유사한 수준이었고 10일간 소실률은 각각 59-76% 및 77-86%로 나타났다. 경시적 잔류 감소는 1차 감쇠모델에 적합하였으며, 감소상수로부터 산출된 생물학적 반감기는 flubendiamide 4.5-7.5일 및 teflubenzuron 4.0-6.2일로 나타나 teflubenzuron이 상대적으로 빠른 소실속도를 보였다. 갯잎 중 농약의 감소상수(95% 신뢰수준 상한값)과 잔류허용기준을 적용하여 산출한 수확 10일 전 PHRL은 flubendiamide 31.50 mg/kg, teflubenzuron 11.27 mg/kg이었다. 세척시험 결과, flubendiamide와 teflubenzuron의 평균 제거효율은 각각 40.1-68.3% 및 71.9-89.3%였으며, 두 약제 모두 중성세제 세척에서 가장 높은 61.4-68.3% 및 84.4-89.3%의 제거효과를 보였다. 이는 teflubenzuron의 높은 소수성 및 표면잔류 특성에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 갯잎 중 농약의 잔류 거동 특성과 세척에 의한 저감효과를 과학적으로 제시하였으며, PHRL 기반의 생산단계 잔류관리 전략 수립과 소비자 안전성 확보에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

색인어: Flubendiamide, 갯잎, 생산단계 잔류허용기준, Teflubenzuron, 세척