

전착제를 활용한 무인항공기 농약 살포 시 수도작에서의 농약 비산 양상 비교

은혜란¹, 김소희^{1,2}, 정문주¹, 이예진¹, 김수민¹, 이윤희¹, 민이기³, 노현호², 신용호^{1*}

Comparison of Tricyclazole Drift in Paddy Fields from Unmanned Aerial Vehicle Spraying Using Various Adjuvants

Hye-Ran Eun , So-Hee Kim ^{1,2}, Mun-Ju Jeong , Ye-Jin Lee , Su-Min Kim , Yoon-Hee Lee , Yi-Gi Min , Hyun Ho Noh ² and Yongho Shin ^{1*}

¹동아대학교 응용생명과학과, ²국립농업과학원 잔류화학평가과, ³한국농업무인항공협회

¹Department of Applied Bioscience, Dong-A University, Busan 49315, Korea, ²Residual Agrochemical Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, ³Korea Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Association, Suwon 16432, Korea

* Correspondence: yong6103@dau.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.17>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 174-187

Received: September 19, 2024

Revised: September 23, 2024

Accepted: October 7, 2024

Published: October 25, 2024

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for
updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



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.

Abstract: The effectiveness of adjuvants was evaluated in enhancing deposition within target spray area and reducing off-target pesticide drift during UAV-based pesticide applications. Tricyclazole, a widely used fungicide formulation in rice cultivation, was selected to measure deposition behavior using a Cellulose Deposition Sampler (CDS). The results demonstrated that the inclusion of paraffin and lecithin type adjuvants increased average depositions in CDS and rice plant samples (panicle and green leaf blade). Drift patterns were influenced by wind direction, and higher wind speeds were associated with increased drift rates. Compared to the untreated control, the relative drift reduction ratio ranged from -1.3 to 34.6% for the paraffin adjuvant and from 33.8 to 65.9% for the lecithin adjuvant, with greater drift reduction observed at higher wind speeds. Pesticide residue levels in harvested brown rice remained below the maximum residue limit (MRL) across all treatments, ensuring food safety of adjuvants. These findings indicate that the use of adjuvants in UAV-based applications can effectively reduce drift, improve application efficiency, and promote environmental sustainability in agricultural practices.

Keywords: Deposition, Off-target drift, Paddy field, Rice, Tricyclazole, Unmanned aerial vehicle

서 론

최근 농업인구의 감소와 고령화로 인해 기존의 관행적인 살포 방식에서 무인항공기(unmanned aerial vehicle; UAV)를 활용한 농약 살포법으로의 전환이 증가하고 있는 추세이다[1]. UAV를 활용한 농약 살포는 기존의 관행적인 살포 방식에

비해 정밀한 살포가 가능하여 농약 사용량을 절감시킨다. 이는 불필요한 농약 낭비를 최소화시키고 고농도 희석 기술을 적용하여 적은 양의 물로도 효과적인 방제가 가능해 전체적인 농약 사용량을 더욱 줄일 수 있다[2-4]. 이는 환경에 미치는 영향을 최소화하고, 지속 가능한 농업 실현에 기여할 수 있다. 특히 수도작에서 UAV의 활용은 노동력 절감, 살포 정확도 향상, 담수된 논에서의 살포장비의 접근성 개선 등의 다양한 이점을 제공한다[5].

그러나 UAV의 로터(rotor)에서 발생하는 하향풍(downwash)이나 외부 바람의 요인으로 인해 농약의 비의도적인 비산이 발생될 가능성이 관행살포 대비 증가할 수 있다. 하향풍은 UAV가 정지 비행하거나 이동할 때 로터에 의해 생성되는 난류로, 농약이 목표 외 지역으로 비산하게 만드는 주요 요인 중 하나이다[6]. 포장에서 실시간으로 발생하는 바람 또한 비산을 악화시킨다. 풍속이 강할수록 비산될 가능성이 증가하고, 풍향은 비산의 방향에 영향을 미친다[7,8].

항공살포 시 농약 액적의 분포 양상에 대한 평가는 비산 정도를 파악하여 농약 살포의 효율성에 대한 개선 방안을 모색하며, 비산으로 유발될 수 있는 환경 및 인체에 대한 부작용을 최소화하는 데 기여할 수 있다[9,10]. 또한 다양한 살포 기술 및 전착제의 비산 저감효과를 평가할 수 있는 수단을 확보함으로써 UAV를 이용한 농약 살포 방법을 최적화할 수 있다[11,12]. 이는 효과적인 작물보호에 기여할 뿐만 아니라, 환경으로 배출되는 화학물질의 양을 감소시키는 원동력으로 작용하여 지속 가능한 농업을 촉진할 수 있다.

대표적인 비산 측정법으로 Mylar card나 감수지와 같은 수집 보조 도구를 사용하여 농약 액적의 부착률을 평가하는 방법이 있다[13,14]. 그러나 두 방법 모두 시료 내 농약의 정확한 잔류량을 측정할 수 없다는 것이 한계점이며, 특히 감수지는 습기가 많은 담수 논에서의 사용이 어렵다. 대안으로 예상 비산 범위에 분포하고 있는 작물 시료를 수거한 후 잔류농약을 분석하거나, 살포액에 첨가한 염료의 농도를 분광광도계(Spectrophotometer) 등으로 측정하는 방법이 있다[15,16]. 그러나 이러한 방법은 작물 시료를 수집하는 과정이 노동집약적이며, 상당한 시간을 소요하는 작업을 요구한다는 것이 단점이다. 특히 시료가 밀집된 수도작에서는 대표 시료를 선정하는 것이 어렵고 작물체의 도복이 발생될 우려가 있다.

이러한 비산 측정법의 한계점들을 모두 해결할 수 있는 대안으로 cellulose paper를 활용한 액적 수집법이 있다. Cellulose paper는 습기에 영향을 받지 않아 수도작을 포함한 다양한 환경 조건에서 범용으로 활용할 수 있다. 또한 cellulose 소재의 특성상 액적이 바로 흡수되어 Mylar card 등에서 발생할 수 있는 액적 리바운드(rebound) 현상을 막을 수 있다. 부착된 농약은 methanol과 같은 용매로 쉽게 추출 가능하므로, 크로마토그래피-질량분석기 등을 활용하여 농약 잔류물을 정량 측정할 수 있다[17]. 실제로 Cellulose Deposition Sampler (CDS)가 쪽과 재배지에서 농약 비산을 평가하는데 사용된 바 있다[18].

전착제는 농약의 살포 효과를 극대화하고 비산 저감을 위해 농약 살포액에 첨가되는 보조제이다. 전착제는 농약의 표면 장력을 낮추어 표면에 더 균일하게 분포되도록 돕고, 농약이 표면에 장기간 부착되도록 함으로써 농약의 흘러내림을 방지하고 비산을 줄여 살포 효율을 향상시킨다[19]. 또한 전착제는 농약의 흡수 및 침투를 촉진하여 약효 지속성을 높여, 농약 사용량을 줄이면서도 동일한 방제 효과를 얻을 수 있게 한다[20].

Tricyclazole (5-methyl-1,2,4-triazolo[3,4-b][1,3]benzothiazole)은 triazole계 살균제로 벼의 도열병과 같은 병해 방제를 위해 주로 사용된다. 이 살균제는 병원균의 펙틴 생성을 억제하여 발병을 차단하는 역할을 하며[21], 다습한 환경에서도 효과를 발휘하기 때문에 수도작에서 주로 사용되고 있는 유효성분 중 하나이다[22,23]. 그러나 tricyclazole과 같은 살균제는 최근 UAV의 급속한 도입으로 최적화되지 못한 살포 조건에서 다량 비산되어 목표 지역 이외로 확산될 수 있으며, 이는 주변 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 항공살포 중 tricyclazole의 비산 양상과 작물 잔류량을 평가한 후 개선된 방제 전략을 수립하는 것이 환경오염 및 인체 노출을 최소화하기 위한 필수적 단계이다.

본 연구는 UAV를 활용한 수도작에서의 농약 비산을 CDS를 활용하여 평가하고, 전착제 사용 유무에 따른 tricyclazole의 잔류 양상을 비교하는 데 목적이 있다. 무인 항공살포 후 목표 살포 범위 안팎에 배치된 CDS로 포집된 잔류농약을 정량 분석함으로써, 전착제가 농약 비산 저감에 미치는 효과를 평가하고자 하였다. 본 연구 결과는 농업 현장에서 UAV를 이용한 효율적인 농약 살포 기술 개발에 중요한 자료로 활용될 수 있으며, 향후 농약 사용의 안전성 및 환경 보호를 고려한 기술적 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

시약 및 재료

Tricyclazole (순도 99.4%)은 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하였으며, LC-MS급 water는 Merck (Darmstadt, Germany)에서 구입하였다. LC-MS급 methanol과 formic acid (>99%)는 Thermo Fisher Scientific (Waltham, MA, USA)에서 구입하였다. HPLC급 acetonitrile은 Samchun Chemical (Seoul, Korea)에서 구입하였으며, HPLC급 ethyl acetate 및 methanol은 Duksan Pure Chemical (Seoul, Korea)에서 구입하였다. Magnesium sulfate (MgSO_4 , 4 g)와 sodium chloride (NaCl , 1 g)를 포함한 QuEChERS Original 추출용 키트 및 primary secondary amine (PSA, 25 mg), octadecyl (C_{18} , 25 mg), MgSO_4 (150 mg)를 포함한 dispersive solid phase extraction (dSPE)는 Agilent Technologies (Santa Clara, CA, USA)에서 구입하였다. CDS는 cellulose thin-layer chromatography (TLC) paper (17CHR, 두께 1 mm, Whatman International Ltd., Maidstone, UK)에 알루미늄 포켓(10 cm × 10 cm)을 씌워 원형 노출 면적이 50 cm²이 되도록 제작하였다. 농약 제품은 논사랑 8% tricyclazole 및 15% ferimzone 액상수화제(SC, Kyungnong, Daegu, Korea)였다. 천연 왁스(paraffin, 24%)를 포함한 전착제 Cares는 Dongbangagro (Seoul, Korea)에서 구입하였으며, soy lecithin (48.8% w/v)을 포함한 전착제 Gondor는 De Sangosse (Agen, France)에서 구입하였다.

비산 시험 설계

시험 포장지는 전라북도 부안군 하서면과 군산시 대야면 수도작으로 선정하였으며, 두 지역 모두 신동진벼를 재배 품종으로 사용하였다. CDS는 목표 살포 범위와 비산구역 주변에 각각 약 130 cm 높이의 폴대에 설치하였다(Fig. 1). 살포 반경(2 m) 주변 총 3개의 CDS를 설치하였으며, 살포 반경 좌우 1, 3, 5, 7, 10 m 간격으로 CDS를 추가 설치하여 1줄(Row)을 완성하였다. 이러한 Row는 8 m 간격으로 총 다섯 줄(R1-5) 배치되었다. 처리구 G1~G3에는 농약 제품을 8배 동일하게 희석하여 살포하였으며, 세부적으로 G1에는 전착제를 넣지 않았고, G2에는 Cares를 2% 함량이 되도록 추가하였으며, G3에는 Gondor를 1% 함량이

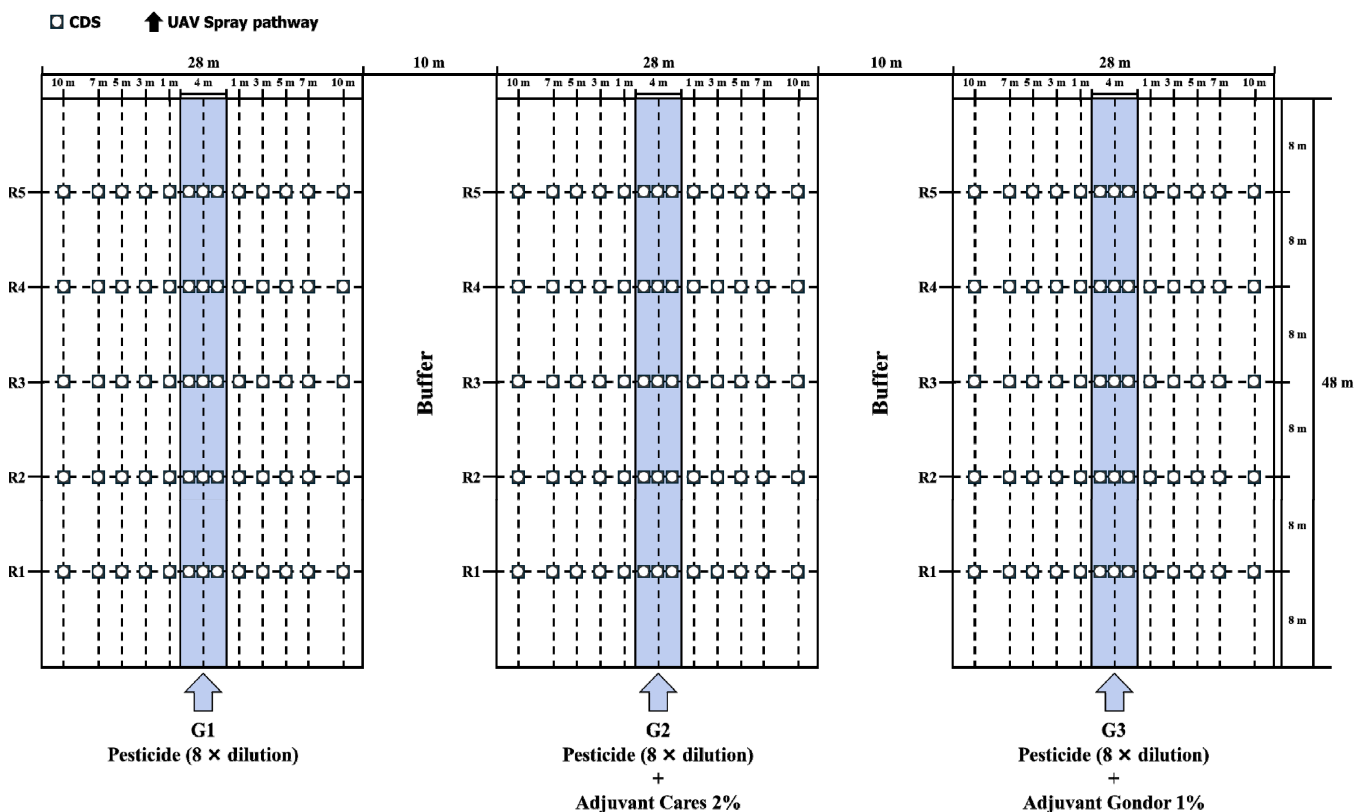


Fig. 1. Arrangement of Cellulose Deposition Samplers (CDS) for measuring pesticide deposition in target spraying area and off-target drift in paddy field.

되도록 추가하였다. 이때 전착제의 함량은 선행연구를 통해 전착제를 농도별로 첨가하여 액적 크기를 조사한 후 액적 크기가 가장 크게 관찰된 농도를 선정하여 적용하였다. 교차오염을 방지하기 위해 각 처리구 사이 10 m의 완충 구역을 설정하였으며, 처리구 옆에 농약을 처리하지 않은 대조구역(G4)을 설정하여 외부 요인으로 인한 오염이나 의도치 않은 잔류물이 없도록 하였다.

UAV 농약 살포 및 시료 수거

농약 살포는 멀티콥터인 YMR-08 (Yamaha Motor, Iwata, Japan) 모델을 사용하여 수행하였다. 살포 조건은 고도 3 m, 비행 속도 11 km/h로 설정하였고, 노즐은 XR-11001 (Spraying Systems Co., Glendale Heights, IL, USA)로 압력 40 psi에서 작동하였으며 방출 속도는 13 m/s로 설정하였다. 살포는 풍속 2 m/s 이하인 조건에서 오전 7시부터 10시 사이에 수행되었다. 농약은 수도작에서의 안전사용기준에 따라 2022년 7월 22일, 8월 12일, 9월 21일에 각각 1회씩 총 3회 처리하였다. 살포 기간 중 부안에서는 8월과 9월 두 차례, 군산에서는 9월에 한 차례 비산 평가가 수행되었다. 온도, 풍속, 습도 등 외부 요인의 영향을 완화하기 위해 세 처리구에서 멀티콥터를 동시에 띄워 살포하였다. CDS는 살포 직후 수거하여 교차 오염을 방지하기 위해 종이봉투에 넣어 아이스박스에 보관하였다. 시료는 즉시 연구실로 운반하여 분석 전까지 -20°C에서 보관하였다. UAV 적용 시 작물의 초기 부착량을 평가하기 위해 최종(3차) 농약 살포 2시간이 지나 약제가 마른 후 미성숙 벼 이삭과 작물체(줄기 및 잎새)를 총 5반복 수확하였다. 수확 기간 중 성숙 벼 이삭은 건조 후 탈곡한 다음 현미 수준으로 도정하였다. 작물 시료는 아이스박스에 넣어 연구실 도착 직후 믹서기를 사용하여 드라이아이스와 함께 분쇄 및 균질화하였으며, 분석 전까지 -20°C에서 보관하였다.

표준용액 제조 및 시료 전처리

Tricyclazole 표준품은 acetonitrile로 희석하여 1,000 mg/L 표준원액이 되도록 제조하였다. 표준용액은 0.0025, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 5, 10 및 100 mg/L 농도로 단계별 희석하였으며, 추가로 매질 보정(matrix-matched) 표준용액을 제조하기 위해 개별 표준용액과 농약이 첨가되지 않은 시료 추출액을 1:1 (v/v) 비율로 혼합하여 0.00125, 0.0025, 0.005, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.125 및 0.25 mg/L가 되도록 하였다. 모든 표준용액은 분석 전까지 -20°C에서 냉동보관하였다.

CDS 내 tricyclazole을 추출하기 위해 외부 알루미늄 포켓을 제거한 후 cellulose TLC paper를 50-mL 원심분리 튜브에 넣고 methanol (40 mL)을 추가한 후, Geno/Grinder (1600 Mini-G, SPEX SamplePrep, Metuchen, NJ, USA)를 사용하여 1,300 rpm에서 2분간 진탕하였다. 추출물은 0.22 µm PTFE membrane filter를 통해 여과하였고, 여과 추출물 300 µL와 acetonitrile 300 µL를 혼합하여 매질 보정한 후 그중 1 µL를 LC-MS/MS에 넣어 분석하였다. 상세 기기 조건은 Table 1에 나타내었다.

분석법의 유효성은 분석법상 정량한계(Method Limit of quantification; MLOQ), 검량선의 직선성, 회수율 및 matrix effect (매질효과)를 통해 검증하였다. MLOQ는 신호 대 잡음 비율(Signal-to-noise ratio; S/N)이 10 이상인 최소 농도로 설정하였고, cellulose TLC paper의 단위 면적(50 cm²)당 잔류량 (µg)으로 표현하였다. 검량선의 직선성은 회귀방정식의 결정계수(r^2)를 계산하여 평가하였다. 회수율 측정을 위해 농약을 MLOQ, 10MLOQ, 100MLOQ 농도가 되도록 cellulose TLC paper에 1, 10, 100 mg/L의 표준용액(100 µL)을 각각 첨가한 다음 전처리하여 LC-MS/MS로 분석 후 목표 농도 대비 측정 농도의 비율을 퍼센트(%) 비율로 나타내었다. Matrix effect 비율(% ME)은 매질보정표준용액과 용매표준용액의 검량선의 기울기를 비교하여 계산하였으며, 수식 (1)은 아래와 같다.

$$ME(\%) = \left(\frac{(\text{매질보정표준용액의 검량선의 기울기})}{(\text{용매표준용액의 검량선의 기울기})} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

이삭, 작물체, 현미 시료에서 잔류농약은 개선된 QuEChERS 방법을 사용하여 추출하였다[5,24]. 현미와 이삭의 경우, 5 g의 균질화된 시료를 7 mL의 물로 15분 동안 습윤화한 다음, 0.1% formic acid가 첨가된 acetonitrile 및 ethyl acetate (1:1, v/v) 혼합용매 10 mL를 추가하여 1,300 rpm에서 1분간 진탕하였다. 추출물에 QuEChERS original 염(MgSO₄ 4 g, NaCl 1 g)을 추가하고 1,300 rpm에서 1분 동안 진탕한 다음 원심분리기(1248, Labogene, Lillerød, Denmark)를 사용하여 3,500 rpm에서 5분 동안 원심분리하여 acetonitrile 층과 수용액 층을 분리하였다. 유기용매층 1 mL를 dSPE 튜브에 옮긴 후 1분 동안 혼합한 다음, 마이크로원심분리기(M15R, Hanil Scientific, Gimpo, Korea)를 사용하여 13,000 rpm에서 5분 동안 원심분리하였다. 상등액 300 µL를 acetonitrile 300 µL와 혼합하여 매질보정하였다. 작물체의 경우, 시료 3 g에 12 mL의 물을 첨가한 후, 12 mL의 acetonitrile/ethyl acetate

Table 1. LC-MS/MS conditions and multiple reaction monitoring (MRM) conditions for tricyclazole analysis

Instrument		LCMS-8040 QqQ with Nexera UHPLC (Shimadzu, Kyoto, Japan)			
UHPLC	Column	Cadenza CD-C18 (3 μm, 150 × 2 mm; Imtakt Corp., Kyoto, Japan)			
	Oven temp.	40°C			
	Injection volume	1 μL			
	Mobile phase	A: 0.1% formic acid in water			
		B: 0.1% formic acid in methanol			
	Time (min)	% A	% B	Flow (mL/min)	
	Initial	20	80	0.2	
	0.2	20	80	0.2	
	3.5	8	92	0.2	
	3.6	2	98	0.2	
6.0	2	98	0.2		
6.1	20	80	0.2		
9.5	20	80	0.2		
MS	Electrospray Ionization (ESI)		Positive		
	Analysis mod		Multiple reaction monitoring (MRM)		
	DL temp.		250°C		
	Heat block temp.		400°C		
	Nebulizing gas		3 L/min		
	Drying gas		15 L/min		
	CID gas		Argon (≥99.999%)		
Data processing		Shimadzu LabSolutions (version 5.60 SP2)			
Pesticide	tR	Monoisotopic mass	Ionization type	MRM transition	
				Precursor ion > Product ion (CE, V)	
				Qualifier	Qualifier
Tricyclazole	2.01	189.0	[M+H] ⁺	190.1 > 163.1 (21)	190.1 > 136.1 (27)

(1:1, v/v) 혼합용액으로 추출한 후 상기의 전처리법으로 분배 및 정제하였다. 최종 추출물 중 1 μ L를 취하여 LC-MS/MS로 분석하였다.

통계 분석

처리구별 농약 잔류량 평균의 유의도를 평가하기 위해 통계 분석이 수행되었다. 통계 분석은 R 소프트웨어(version 4.3.2)를 활용하여 수행하였다. 처리구 간 분산의 불균일성을 고려하여 Welch의 ANOVA를 사용하여 유의도를 확인하였으며[25], 이후 Games-Howell을 이용한 사후 검정을 수행하였다. 통계적 유의성을 나타내기 위해 평균값 옆에 알파벳으로 표기하여 구분하였으며, 서로 다른 문자는 처리구 사이의 유의미한 차이를 나타낸다.

결과 및 고찰

LC-MS/MS를 이용한 CDS 및 작물 시료 중 분석법의 유효성 확인

Tricyclazole의 분자식은 C₉H₇N₃S이며, 분자량은 189.24 g/mol이다. LC-MS/MS 분석은 electrospray ionization (ESI) 양이온화 모드를 사용하여 진행하였으며, tricyclazole은 양성자(H⁺)가 첨가된 [M+H]⁺ 이온으로 이온화되었다(Table 1). 분석은 Cadenza CD-18 컬럼과 LC-MS/MS의 다중반응모니터링(Multiple Reaction Monitoring; MRM) 모드를 이용하여 시료 내에서 tricyclazole을 검출하였다.

CDS 한 장의 잔류농약 부착 면적은 50 cm^2 이며, 분석물의 MLOQ는 $0.05\text{ }\mu\text{g/CDS}$ ($\mu\text{g}/50\text{ cm}^2$)로 설정된다. 이는 cm^2 당 1 ng 수준으로 tricyclazole을 검출할 수 있을 정도로 매우 감도가 우수하여, 비산된 농약의 잔류량을 극미량 수준으로 측정하는데 매우 적합하다. 검량 범위는 $0.05\sim 10\text{ }\mu\text{g/CDS}$ 이며, r^2 값은 0.999로 우수한 직선성을 나타내었다. Tricyclazole의 회수율은 MLOQ, 10MLOQ 및 100MLOQ 수준에서 $81.2\sim 97.2\%$ 이며, 상대표준편차(RSD)는 $0.2\sim 9.7\%$ 로 확인되었다. 본 분석법은 낮은 RSD와 함께 우수한 회수율을 보였으며, 다양한 농도 수준에서 높은 정밀성과 신뢰성을 나타내었다. Matrix effect (% ME)는 -1.8% 로 시료의 matrix가 분석물의 정량화에 미치는 간섭이 미미함을 의미한다. 이는 tricyclazole 분석 과정에서 매질에 의한 정량 왜곡이 최소화되었음을 보여주며, CDS 시료에서 안정적인 정량 분석이 가능함을 의미한다[26].

Acetonitrile/ethyl acetate (1:1, v/v) 혼합용액을 추출용매로 하는 개선된 QuEChERS 방법을 적용하여 미성숙 벼 이삭, 작물체, 현미 시료에서 잔류농약을 분석하였다[24]. Quality control (QC) 시료를 이용한 분석법 유효성 확인 결과, MLOQ는 0.01 mg/kg , r^2 값은 0.999 이상으로 나타났다. 회수율은 미성숙 벼 이삭, 작물체, 현미에서 $70\sim 120\%$ ($\text{RSD}\leq 10\%$)로 나타났으며, 이는 SANTE 가이드라인에서 제시하는 허용 범위(회수율 $70\sim 120\%$, RSD 20% 이하) 이내였다. Matrix effect 값은 soft effect 범위($\pm 20\%$) 내에 있었으며, 이는 작물 매질이 신호에 미치는 영향이 미미함을 시사한다[27,28].

멀티콥터의 목표 살포 범위 내에서의 농약 잔류량 비교

멀티콥터는 관행적인 농약 살포 대비 바람 등 외부 환경의 영향을 많이 받는다[29]. 다양한 지역 및 환경에서 무인 항공살포 시 목표 살포 범위(4 m 너비) 내에서의 잔류 양상을 비교하기 위해, 시험을 세 차례 수행하였다. 멀티콥터를 이용한 농약 살포 시 환경 조건은 Table 2와 같다. UAV는 기존 살포 방식에 비해 살포 노즐에서 작물 사이와의 거리가 더 멀기 때문에, 풍향 및 풍속 등 외부 요인에 따라 잔류 양상이 달라지는 경향을 보인다[30,31]. 본 연구에서도 대부분의 처리구에서 풍향에 따라 특정 방향에 잔류량이 집중되는 경향을 보였다(Fig. 2). 8월 부안에서는 서풍의 영향을 받아 목표 살포 범위 내 잔류량이 좌측으로 치우쳐 CDS 1, 2번에 다량 잔류한 반면, 동일 지역 9월에는 동풍이 불어 살포 범위 내 잔류량이 우측(CDS 2, 3번)으로 치우쳤다. 같은 날 군산에서는 북동풍이 불었으며, 부안과 유사하게 우측으로 치우치는 잔류 경향을 보였다.

Table 2. Environmental conditions by date in Buan and Gunsan

Area	Date	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Humidity (%)	Wind Direction	Wind Speed (m/s)
Buan	Aug. 12	27.8	65.0	West (W)	0.7
Buan	Sep. 21	21.3	60.0	East (E)	1.1
Gunsan	Sep. 21	18.2	75.6	Northeast (NE)	0.9

풍속과 목표 살포 범위 내 잔류량과의 관계는 Fig. 3에 제시하였다. G1은 풍속 $0.7\sim 1.1\text{ m/s}$ 범위에서 상대적으로 일정한 잔류 수준을 나타낸 반면, G2와 G3는 풍속 증가함에 따라 잔류량이 유의미하게 감소하는 경향을 보였으며, 이는 선형 회귀모델로 설명되었다($r^2=0.886\sim 0.993$, Fig. 3). 이러한 결과는 전착제를 첨가한 살포액이 풍속 변화에 더 민감하게 변화함을 나타내며, 이는 전착제가 액적 크기 분포에 미치는 영향으로 설명될 수 있다. 일반적으로 전착제는 액적의 평균 크기를 증가시키지만, 동시에 액적 크기의 편차도 증가시켜 작은 액적의 비율도 함께 증가하게 된다[32]. 작은 액적은 무게가 적어 바람에 의해 비산되기 쉬운데[13], 전착제를 첨가한 살포액은 이러한 영향을 받는 액적의 비율이 전착제 미처리구 대비 상대적으로 크게 증가하여 풍속에 따른 잔류량 변화가 큰 것으로 보인다. Henry et al. (2015)은 기류에 따른 전착제의 효과를 연구한 바 있는데[33], 저속 기류(193 km/h)에서는 전착제가 처리된 구역에서 액적 크기가 미처리구보다 유의미하게 더 크게 나타났으나, 고속 기류(257 km/h)에서는 액적 크기가 감소하여 처리구와 미처리구 간 유의미한 차이가 없었다. 이는 Fig. 3의 결과를 뒷받침하며, 전착제는 일반적으로 액적 크기를 증가시킬 수 있으나, 풍속이 높은 경우 그 효과가 감소할 수 있음을 시사한다. 한편 온도 및 습도와 같은 다른 환경 요인은 목표 살포 범위 내 농약 잔류량에 유의미한 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

처리구별 목표 살포 범위 내에서의 잔류량 비교 결과, 8월 부안에서 G3 처리구의 평균 잔류량은 $36.8\text{ }\mu\text{g/CDS}$ 로 가장 높았고, G2 $36.0\text{ }\mu\text{g/CDS}$, G1 $14.5\text{ }\mu\text{g/CD}$ 순으로 감소하였다(Fig. 2a). G3와 G2의 잔류량은 G1에 비해 유의미하게 높았으며($p<0.05$),

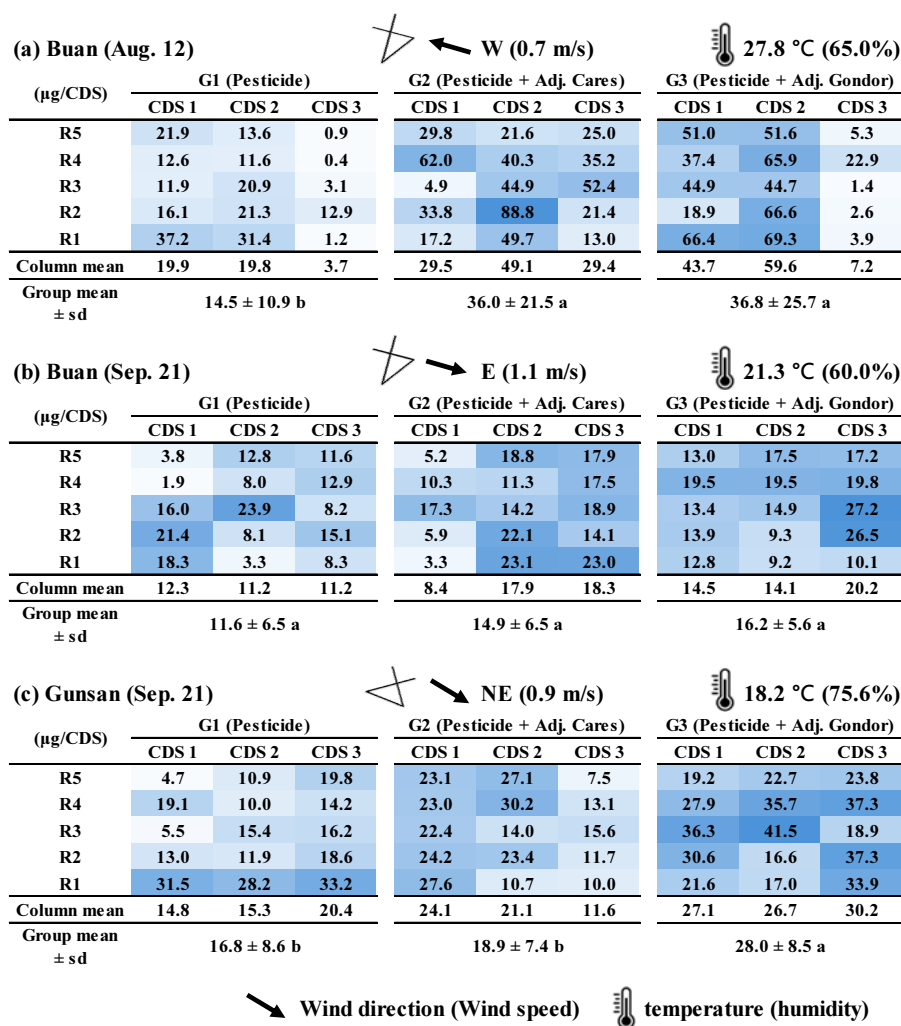


Fig. 2. Distribution of tricyclazole deposition from UAV spraying in paddy fields at (a) Buan (Aug. 12), (b) Buan (Sep. 21), and (c) Gunsan (Sep. 21). The deposited pesticides were collected by cellulose deposition samplers (CDSs). Statistically significant differences ($p < 0.05$) are indicated by different letters (a, b).

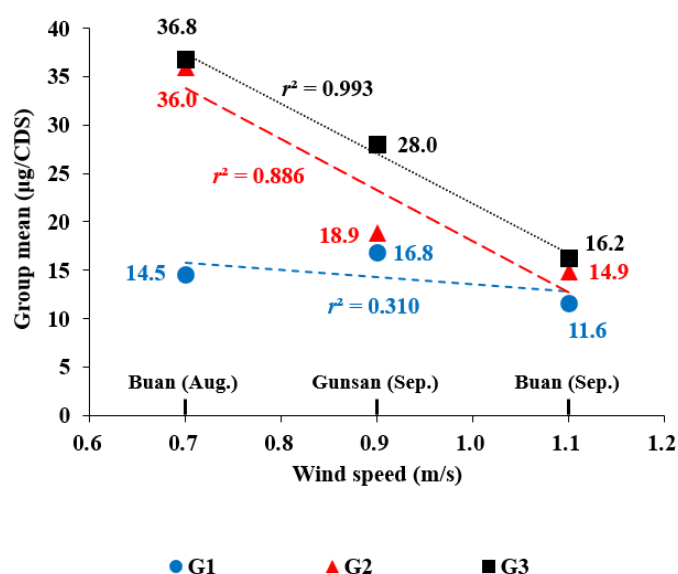


Fig. 3. Relationship between wind speed and group mean deposition across different treatments and locations in the UAV spray pathway.

이는 전착제가 농약 잔류량을 증가시키는 데 기여했음을 시사한다. 9월 부안에서는 G3 16.2 µg/CDS, G2 14.9 µg/CDS, G1 11.6 µg/CDS로 8월과 동일한 경향을 나타내었으나(Fig. 2b), Welch의 ANOVA 분석 결과 처리구 간 유의미한 차이는 확인되지 않았다. 반면 같은 날 군산에서는 G3의 평균 잔류량이 28.0 µg/CDS, G2 18.9 µg/CDS, G1 16.8 µg/CDS로 나타났으며(Fig. 2c), G1과 G3, G2와 G3 간에 통계적으로 유의미한 차이($p<0.05$)가 확인되었다. 전반적으로 전착제가 첨가된 처리구에서 목표 살포 범위 내 tricyclazole의 평균 잔류량이 증가하는 경향을 보였으며, 풍속이 작은 환경일수록 유의미한 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 G3에 처리한 전착제 Gondor는 다양한 날씨와 장소에서 일관되게 가장 높은 잔류량을 보였는데, 이는 Gondor에 포함된 주성분인 soy lecithin에 의한 것으로 판단된다. Campos et al. (2020)은 lecithin과 propionic acid가 포함된 전착제가 관행의 유입식 봄 분무기로 살포되었을 때 식물의 잔류농약을 증가시키는 효과가 있다고 보았다[34]. 이는 전착제가 식물 표면의 표면 장력을 감소시켜 액적의 확산 및 부착성을 향상시키기 때문으로 판단된다[35,36].

목표 살포 범위에서의 수도작 내 잔류농약 양상 비교

CDS에서 확인한 잔류 양상이 실제 작물에서의 잔류 결과를 반영하는지 확인하기 위해, 최종 살포 후 목표 살포 범위 내 벼 이삭과 작물체(줄기 및 잎새)를 수확하여 tricyclazole의 초기 부착량을 측정하였다(Table 3). 벼 이삭에서의 평균 잔류량은 부안에서 0.25~1.15 mg/kg, 군산에서 0.24~1.35 mg/kg으로 나타났다. 두 포장 모두에서 잔류량은 G1 (0.24~0.25 mg/kg), G2 (0.61~0.71 mg/kg), G3 (1.15~1.35 mg/kg) 순으로 유의미한 증가가 확인되었다. 작물체에서는 부안에서 0.82~2.75 mg/kg, 군산에서 0.18~2.34 mg/kg으로 검출되었으며, 이삭과 마찬가지로 G1 (0.18~0.82 mg/kg), G2 (0.76~1.26 mg/kg), G3 (2.34~2.75 mg/kg) 순으로 잔류량이 유의미하게 증가하여 전착제가 무인 항공살포 조건에서도 작물 초기잔류량을 증가시킴을 확인하였다. Xu et al. (2019)의 연구에서도 농약 살포액에 전착제를 첨가한 경우 살포액이 바나나 잎에 더 잘 부착되었으며 전착제 미처리구 대비 초기 잔류량이 1.22~2.13배 증가했다고 보고한 바 있다[37]. 또한 G2와 G3 간에도 잔류량 차이가 관찰되었는데, 이는 각 전착제의 물리적, 화학적 특성 차이나 살포 조건이나 작물의 표면 상태 등과 같은 다양한 환경적 요인에 기인하여 전착제 효과에 차이를 나타내었을 것으로 판단된다[38]. 본 연구에서의 작물 중 농약 잔류 양상은 또한 Fig. 2에 제시된 CDS 잔류 양상과 유사하며, 이는 CDS가 tricyclazole의 전반적인 잔류 양상을 효과적으로 모사하고 있음을 시사한다. CDS를 통한 농약 잔류 측정의 효과는 쪽파 재배지에서도 확인되어[18], 다양한 농업 조건에서 농약 잔류량을 측정하는 방법으로 그 유용성이 확인되었다.

Table 3. Pesticide residues in rice panicle and green leaf blades in Buan and Gunsan fields

Sample	Field	Group	Residue range (mg/kg)	Mean±SD ^{a)} (mg/kg)
Rice panicle	Buan	G1	0.16-0.30	0.25 ± 0.06 c ^{b)}
		G2	0.49-0.71	0.61 ± 0.09 b*
		G3	0.78-1.42	1.15 ± 0.28 a*
	Gunsan	G1	0.06-0.43	0.24 ± 0.17 c**
		G2	0.52-0.96	0.71 ± 0.18 b**
		G3	0.87-2.01	1.35 ± 0.43 a**
Green leaf blade	Buan	G1	0.61-1.05	0.82 ± 0.19 c*
		G2	0.91-1.53	1.26 ± 0.23 b*
		G3	2.21-3.16	2.75 ± 0.49 a*
	Gunsan	G1	0.12-0.24	0.18 ± 0.05 c*
		G2	0.63-0.93	0.76 ± 0.11 b*
		G3	1.96-2.91	2.34 ± 0.43 a*

a) Standard deviation

b) Statistically significant differences are indicated by different letters (a, b, c). Asterisks indicate levels of significance

* $p<0.05$ and ** $p<0.01$.

전착제가 비산 저감에 미치는 영향

CDS를 활용한 측정법은 항공살포 시 낙하하는 농약의 비산량을 높은 신뢰도로 정량평가할 수 있다는 것이 장점이다[18]. 이를 통해 작물 수확과 같은 번거로운 작업을 거치지 않고 수도작과 같은 대면적 포장에서의 비산 양상을 확인할 수 있다. 비산 측정을 위해 CDS를 살포 범위의 좌우 끝에서 1~10 m 떨어진 지점까지 설치하였고(Fig. 1), 항공 살포 후 이를 수거하여 tricyclazole의 잔류량을 측정하였다. 측정된 잔류량은 포장 면적을 기준으로 환산하여 mg 단위로 나타냈으며, 검출량이 MLOQ 이하인 경우 잔류량은 0 mg으로 평가하였다. Table 4에 나타난 바와 같이, 모든 처리구에서 UAV 살포 범위 내의 잔류량이 가장 높았으며, 거리가 멀어질수록 잔류량이 감소하는 경향을 보였다. 또한 비산 양상은 풍향에 따라 차이를 보였다. 8월 부안에서는 서풍으로 인해 주로 좌측으로 비산이 발생하였고, 9월에는 동풍으로 인해 우측에 더 많은 잔류가 나타났다. 같은 날 군산에서는 북동풍의 영향으로 9월 부안과 유사하게 우측에 더 많은 비산이 발생하였다.

살포 범위로부터 1~10 m 거리에서의 비산율을 평가하기 위해, 개별 처리구에서의 살포 범위 내 총 잔류량을 100으로 하여 좌우측 잔류량을 상대적인 비율로 나타내었다(Table 4). 좌우 비산율의 합은 8월 부안에서 5.5~8.6%, 9월 부안에서 51.1~77.1%, 9월 군산에서 17.3~50.8%로 나타났으며, 이는 풍속의 영향을 받은 것으로 판단된다. Fig. 4a에 나타난 바와 같이, 풍속이 증가할수록 모든 처리구에서 총 비산율이 함께 증가하는 경향을 보였다($r^2=0.929\sim1.000$). 또한 거리별 비산율 역시 풍속의 증가와 함께 상승하는 경향을 보였는데(Figs. 4b~4f), 1~7 m 구간에서는 풍속이 낮을 때 처리구 간 비산율의 차이가 거의 없었으나, 풍속 증가에 따라 처리구별 비산율의 차이가 점차 두드러졌다. 특히 G1의 비산율이 G2, G3에 비해 더 크게 증가하면서 G1의 선형 회귀선 기울기가 다른 처리구보다 더 크게 나타났다. 다만 10 m 거리에는 세 처리구 모두 비슷한 비산율을 보였다. 이는 전착제가 UAV 항공살포 시 특정 범위 내에서의 비산 저감효과가 크다는 것을 나타내며, 특히 풍속이 강할수록 전착제의 비산 저감효과가 더욱 확연해짐을 의미한다.

Table 4. Drift amounts and rates by UAV-based tricyclazole SC applications at different wind speeds

Group	UAV Pathway (mg)	Left side (mg)	Right side (mg)	Drift amount (mg)	Pathway rate ^{a)} (%)	Left rate ^{a)} (%)	Right rate ^{a)} (%)	Total drift rate ^{b)} (%)	Relative drift reduction ratio ^{c)} (%)
<i>(a) Buan (Aug. 12, 2022), wind speed: 0.7 m/s</i>									
G1	441.6	31.9	5.5	37.4	100	7.2	1.2	8.5	-
G2	1099.7	59.9	34.4	94.4	100	5.5	3.1	8.6	-1.3
G3	1088.0	47.7	12.3	60.0	100	4.4	1.1	5.5	34.9
<i>(b) Buan (Sep. 21, 2022), wind speed: 1.1 m/s</i>									
G1	372.1	0.0	286.8	286.8	100	0.0	77.1	77.1	-
G2	463.4	18.0	251.8	269.8	100	3.9	54.3	58.2	24.5
G3	528.6	18.1	251.8	269.9	100	3.4	47.6	51.1	33.8
<i>(c) Gunsan (Aug. 12, 2022), wind speed: 0.9 m/s</i>									
G1	544.0	39.1	237.3	276.4	100	7.2	43.6	50.8	-
G2	596.7	24.6	173.8	198.4	100	4.1	29.1	33.3	34.6
G3	901.8	20.9	135.5	156.5	100	2.3	15.0	17.3	65.9

$$^a) (\text{drift rate, \%}) = \frac{(\text{residue amounts} \in \text{each site})}{(\text{residue amounts} \in \text{UAV pathway})} \times 100$$

$$^b) (\text{Total drift rate, \%}) = (\text{Left side rate}) + (\text{Right side rate})$$

$$^c) (\text{Relative drift reduction ratio, \%}) = \frac{(\text{Total drift ratio for G1}) - (\text{Total drift ratio for G2 or G3})}{(\text{Total drift ratio for G2 or G3})} \times 100$$

전착제의 종류에 따른 비산 저감효과도 차이를 보였다. Cares는 주로 미네랄 오일의 구성 성분인 paraffin을 함유하고 있으며, 액적 크기를 증가시켜 비산을 줄이는 효과가 있는 것으로 보고되었다[33,37]. Baseeth et al. (2010)는 Gondor의 주요 구성 물질인 lecithin을 첨가하여 살포할 경우 점도 및 액적의 크기를 조절하여 비산 저감효과가 나타난다고 보고하였다[19]. 이는 액적 크기가

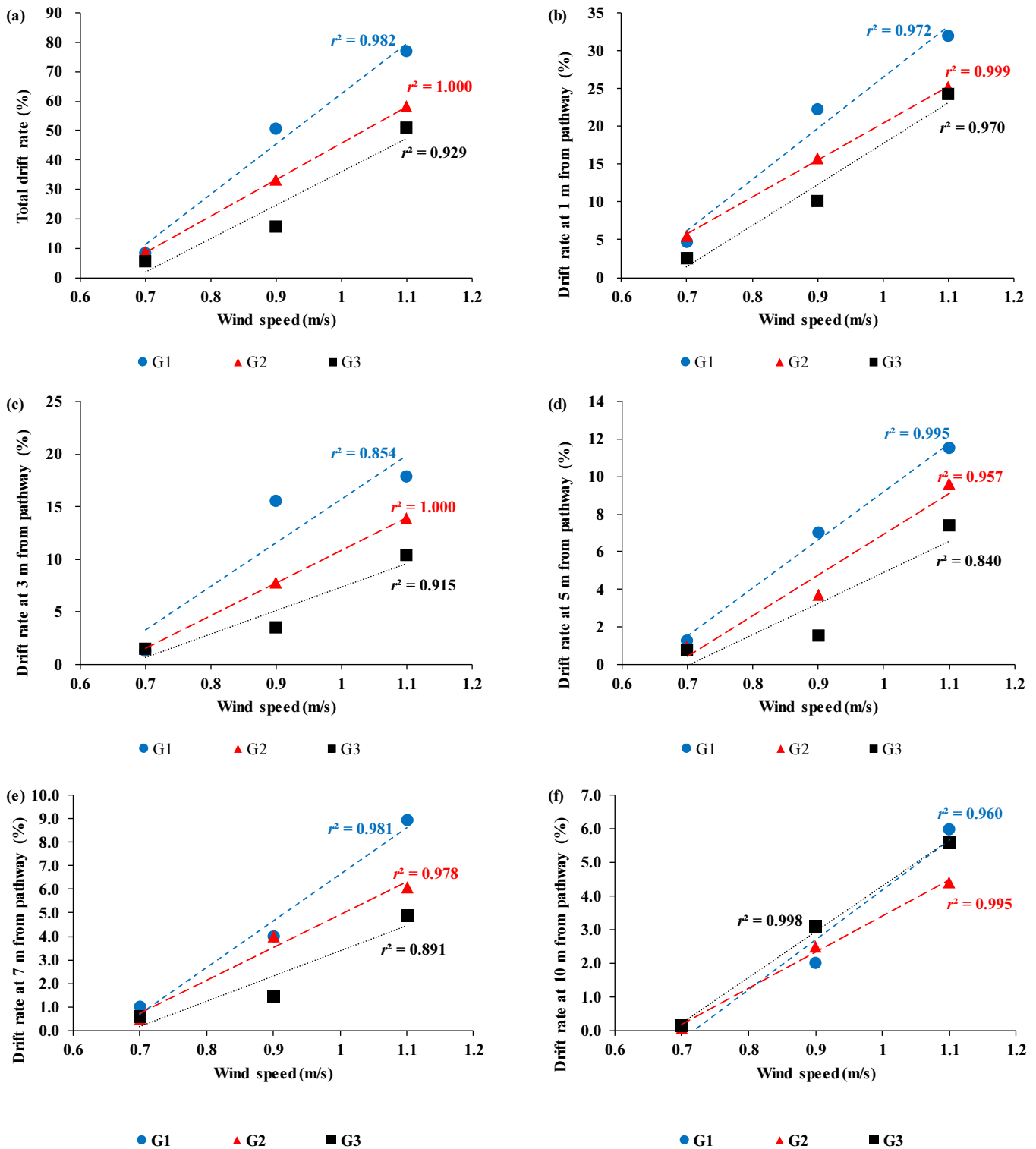


Fig. 4. Relationship between wind speed and drift rates (sum of left and right side rates) at various distances from the UAV pathway. (a) Total drift rate, drift rate at (b) 1 m, (c) 3 m, (d) 5 m, (e) 7 m, and (f) 10 m from the pathway.

커지면 무게가 증가하고 그로 인해 하강 속도가 증가하여 비산에 영향을 덜 받는다는 일반적인 원리와 일치한다. 이를 통해 UAV 살포 범위 내에서 전착제 첨가가 비산을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

수도작 포장 및 처리구별 비산 양상 결과를 요약한 내용은 Table 4에 제시하였다. 비산량으로 평가하였을 경우, 강한 풍속 조건(b, c)에서 전착제를 첨가한 처리구(G2 및 G3, 156.5~269.9 mg)의 총 비산량이 전착제 미처리구(G1, 276.4~286.8 mg)의

총 비산량 대비 더 낮았다. 반면 풍속이 약한 조건(a)에서는 G1이 비산량 37.4 mg으로 가장 작았다. 한편 G1 대비 전착제 처리구의 상대적 비산 저감율은 풍속이 강한 조건(b, c)에서는 G2 24.5~34.6%, G3 33.8~65.9%로 모두 전착제에 의한 비산 저감효과가 확실히 나타났다. 그러나 풍속이 낮은 조건(a)에서는 G2의 상대적 비산 저감율은 -1.3%로 G1과 비교하였을 때 비산 저감효과가 없었고, G3의 비산 저감율은 34.9%로 비산 저감효과가 유의미하게 나타났다. 따라서 강한 풍속 조건에서는 두 종류의 전착제가 농약 비산 저감에 효과적이었으며, 약한 풍속 조건에서는 soy lecithin을 함유한 전착제가 비산 저감에 유리하였다. 이는 수도작 내 UAV 살포 시 실시간으로 바뀔 수 있는 바람의 특성에 따라 적절한 전착제를 사용하는 것이 농약 비산 저감에 필수적임을 시사한다.

수확기 현미 내 잔류농약 평가

살포액에 전착제를 첨가한 결과, 살포 범위 내 이삭 및 작물체의 농약 잔류량이 증가하는 경향을 보였으므로(Table 3), 이는 수확 시 잔류량이 농약잔류허용기준(Maximum Residue Limit; MRL)을 초과할 가능성을 시사한다. 따라서 수확 시점에서의 벼의 주요 생산물인 현미의 농약 잔류량을 모니터링하는 것이 필수적이다. 분석 결과, 평균 잔류량은 부안과 군산 모두 0.03~0.07 mg/kg 수준으로 나타났다(Table 5). 처리구 간 잔류량 차이는 부안에서 G1 및 G3은 G2와 유의미한 차이가 있었으며, G1과 G3 사이에는 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났으며, 군산에서는 처리구 간에 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 모든 처리구에서 잔류량은 국내 쌀에 대한 MRL인 0.7 mg/kg보다 10~23배 낮았으며, 대부분의 잔류농약은 벼 껍질에 남아 있어, 도정 과정에서 상당량이 제거되어 잔류량이 크게 감소하는 것으로 나타났다[39,40]. 이는 전착제를 사용하더라도 수확 시 현미의 잔류농약이 안전한 수준에 있음을 의미한다.

Table 5. Tricyclazole residue levels in brown rice from different paddy fields (Buan and Gunsan)

Field	Group	Residue range (mg/kg)	Mean±SD ^{a)} (mg/kg)	MRL ^{b)} in rice (mg/kg)
Buan	G1	0.04-0.10	0.06 ± 0.02 a ^{c)}	0.7
	G2	0.02-0.03	0.03 ± 0.00 b	
	G3	0.06-0.09	0.07 ± 0.01 a	
Gunsan	G1	0.02-0.11	0.07 ± 0.05 a	
	G2	0.01-0.04	0.03 ± 0.01 a	
	G3	0.02-0.09	0.06 ± 0.03 a	

a) Standard deviation

b) Maximum residue limit in South Korea

c) Statistically significant differences ($p < 0.05$) are indicated by different letters (a, b)

결론

본 연구에서는 UAV를 이용한 수도작에서의 tricyclazole 살포 후 잔류농약과 비산 구역 내 농약 잔류 양상을 조사하였다. 분석법상 정량한계는 0.05 µg/CDS (1 ng/cm²)로 설정되었으며, CDS에서 tricyclazole을 검출하기 위해 분석법 유효성을 검증한 결과, 높은 정확도와 정밀성을 확인할 수 있었다. 살포 폭(4 m) 내에서 잔류된 농약의 총 양은 G1 (372.1~544.0 mg), G2 (463.4~1099.7 mg), G3 (528.6~1088.0 mg) 순으로 증가하였으며, 이는 전착제 사용으로 인해 액적 크기가 커지고 표면 장력이 감소하여 살포액의 부착력이 향상된 것으로 판단된다. 목표 살포 범위 내 잔류 양상과 살포 범위 외 1~10 m까지의 비산 양상은 풍향 및 풍속의 영향을 받았다. 특히 풍속이 증가함에 따라 전착제 미처리구인 G1의 비산율이 전착제 처리구인 G2와 G3에 비해 더욱 크게 증가하는 경향을 보였다. 전착제를 사용한 처리구의 상대적 비산 저감율은 강한 풍속 조건에서 24.5~65.9%로 나타났으며, 낮은 풍속 조건에서는 G2는 -1.3%, G3는 34.9%로 전착제의 종류에 따라 다른 저감율을 보였다. 수확 시 도정된 현미의 잔류농약은 모든 처리구에서 MRL 미만으로 검출되어, 이는 전착제를 첨가한 살포액이 수확된 작물의 안전성에 부정적인 영향을 미치지 않음을 시사한다. 이러한 결과는 전착제를 첨가한 살포액이 목표 살포 범위 내 농약의 부착력 향상 및 비산 저감에 기여할

수 있음을 시사하며, UAV 기반 농약 살포 기술의 효율성과 환경적 안전성을 증대시킬 수 있는 유용한 방법임을 보여준다.

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

Author Contributions: Conceptualization, Y.S. and H.H.N.; methodology, Y.S., H.H.N. and Y.-G.M.; validation, H.-R.E. and S.-H.K.; formal analysis, Y.-H.L.; investigation, H.-R.E. and S.-H.K.; resources, Y.-J.L.; data curation, M.-J.J.; writing—original draft preparation, H.-R.E.; writing—review and editing, Y.S.; visualization, S.-M.K.; supervision, Y.S.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ017000)”, Rural Development Administration, Republic of Korea

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.17>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Yongho Shin.

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. Seong DG, Bea SM, Kim YG, Cho YC, Lee SD, Shim SI (2014) Efficacy of foliar herbicide treatment by unmanned helicopter under water-seeded rice cultivation. *The Korean Society of Weed Science & The Turfgrass Society of Korea Archive*, 3(4), 323-328. <https://doi.org/10.5660/WTS.2014.3.4.323>.
2. Biswas S, Pandey R, Barua E, Lawrence ID (2023) Advancements in precision agriculture: pesticide spraying drones. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5(9), 1-19.
3. Hanif AS, Han X, Yu SH (2022) Independent control spraying system for UAV-based precise variable sprayer: A review. *Drones*, 6(12), 383. <https://doi.org/10.3390/drones6120383>.
4. Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, Moscholios I (2020) A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>.
5. Lee YJ, Kim SH, Eun HR, Kim SM, Jeong MJ, Baek JW, Lee YH, Noh HH, Shin Y (2024) Enhancement of tricyclazole analysis efficiency in rice samples using an improved QuEChERS and its application in residue: A study from unmanned aerial spraying. *Applied Sciences*, 14(13), 5607. <https://doi.org/10.3390/app14135607>.
6. Coombes M, Newton S, Knowles J, Garmory A (2022) The influence of rotor downwash on spray distribution under a quadrotor unmanned aerial system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106807. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106807>.
7. Desmarteau DA, Ritter AM, Hendley P, Guevara MW (2020) Impact of wind speed and direction and key meteorological parameters on potential pesticide drift mass loadings from sequential aerial applications. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(2), 197-210. <https://doi.org/10.1002/ieam.4221>.
8. Grant S, Perine J, Abi-Akar F, Lane T, Kent B, Mohler C, Scott C, Ritter A (2022) A wind-tunnel assessment of parameters that may impact spray drift during UAV pesticide application. *Drones*, 6(8), 204. <https://doi.org/10.3390/drones6080204>.
9. Kim CJ, Yuan X, Kim M, Kyung KS, Noh HH (2023) Monitoring and risk analysis of residual pesticides drifted by unmanned aerial spraying. *Scientific Reports*, 13(1), 10834. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36822-w>.
10. Munjanja BK, Naudé Y, Forbes PBC (2020) A review of sampling approaches to off-target pesticide deposition. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 25, e00075. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00075>.
11. Hewitt AJ (2024) Adjuvant use for the management of pesticide drift, leaching and runoff. *Pest Management Science*, <https://doi.org/10.1002/ps.8255>.
12. Xue S, Han J, Xi X, Lan Z, Wen R, Ma X (2024) Coordination of distinctive pesticide adjuvants and atomization nozzles on droplet spectrum evolution for spatial drift reduction. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 66, 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.10.001>.

13. Chen S, Lan Y, Zhou Z, Ouyang F, Wang G, Huang X, Deng X, Cheng S (2020) Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, 10(2), 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>.
14. Guo S, Li J, Yao W, Zhan Y, Li Y, Shi Y (2019) Distribution characteristics on droplet deposition of wind field vortex formed by multi-rotor UAV. *PLoS One*, 14(7), e0220024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220024>.
15. Briand O, Bertrand F, Seux R, Millet M (2002) Comparison of different sampling techniques for the evaluation of pesticide spray drift in apple orchards. *Science of The Total Environment*, 288(3), 199-213. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00961-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00961-5).
16. Gao S, Wang G, Zhou Y, Wang M, Yang D, Yuan H, Yan X (2019) Water-soluble food dye of Allura Red as a tracer to determine the spray deposition of pesticide on target crops. *Pest Management Science*, 75(10), 2592-2597. <https://doi.org/10.1002/ps.5430>.
17. Choi H, Moon J-K, Kim J-H (2013) Assessment of the exposure of workers to the insecticide imidacloprid during application on various field crops by a hand-held power sprayer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(45), 10642-10648. <https://doi.org/10.1021/jf403169t>.
18. Noh HH, Kim CJ, Moon B-c, Ro J-h, Kim D, Oh M-s, Kwon H, Kim HT, Kyung KS (2020) Measurement of drift amount of ametoctradin+dimethomorph 47(27+20)% suspension concentrate for unmanned aerial spraying caused by wind direction and speed. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 24(1), 43-50. <https://doi.org/10.7585/kjps.2020.24.1.43>.
19. Baseeth SS, Sebree BR (2010) Renewable surfactants in spray adjuvants. *Lipid Technology*, 22(4), 79-82. <https://doi.org/10.1002/lite.201000012>.
20. Castro MJ, Ojeda C, Cirelli AF (2014) Advances in surfactants for agrochemicals. *Environmental Chemistry Letters*, 12, 85-95. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0432-4>.
21. Kunova A, Pizzatti C, Cortesi P (2013) Impact of tricyclazole and azoxystrobin on growth, sporulation and secondary infection of the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae*. *Pest Management Science*, 69(2), 278-284. <https://doi.org/10.1002/ps.3386>.
22. Froyd JD, Guse LR, Kushiro Y (1978) Methods of applying tricyclazole for control. *Phytopathology*, 68, 818-822.
23. Padovani L, Capri E, Padovani C, Puglisi E, Trevisan M (2006) Monitoring tricyclazole residues in rice paddy watersheds. *Chemosphere*, 62(2), 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.025>.
24. Jeong MJ, Kim SH, Eun HR, Lee YJ, Kim SM, Baek JW, Lee YH, Shin Y (2023) Column comparison for the separation of ferimzone Z and E stereoisomers and development of trace residue analysis method in brown rice using HPLC-MS/MS. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 42(3), 203-210. <https://doi.org/10.5338/kjea.2023.42.3.24>.
25. Todorov H, Searle-White E, Gerber SJPO (2020) Applying univariate vs. multivariate statistics to investigate therapeutic efficacy in (pre) clinical trials: A Monte Carlo simulation study on the example of a controlled preclinical neurotrauma trial. *PLoS One*, 15(3), e0230798. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230798>.
26. Niessen WMA, Manini P, Andreoli R (2006) Matrix effects in quantitative pesticide analysis using liquid chromatography-mass spectrometry. *Mass Spectrometry Reviews*, 25(6), 881-899. <https://doi.org/10.1002/mas.20097>.
27. Shin Y, Kim CJ, Baek S, Kim L, Son KA, Lee HD, Kim D, Kim JH, Noh HH (2020) Liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the simultaneous analysis of 353 pesticides in the edible insect *Tenebrio molitor* Larvae (Mealworms). *Molecules*, 25(24), 5866. <https://doi.org/10.3390/molecules25245866>.
28. Kim SH, Lee YH, Jeong MJ, Gwon DY, Lee JH, Shin Y, Choi H (2023) LC-MS/MS method minimizing matrix effect for the analysis of bifenthrin and butachlor in Chinese chives and its application for residual study. *Foods*, 12(8), 1683. <https://doi.org/10.3390/foods12081683>.
29. Kang KJ, Chang SM, Ra IH, Kim SW, Kim HT (2019) Nozzle flow characteristics and simulation of pesticide spraying drone. *Smart Media Journal*, 8(4), 38-45. <https://doi.org/10.30693/smj.2019.8.4.38>.
30. Jiao Y, Xue X, Ding S, Zhou Q, Kong W, Tian Y, Liu X (2022) Experimental study of the droplet deposition characteristics on an unmanned aerial vehicle platform under wind tunnel conditions. *Agronomy*, 12(12), 3066. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123066>.
31. Ling W, Du C, Ze Y, xindong N, Shumao W (2018) Research on the prediction model and its influencing factors of droplet deposition area in the wind tunnel environment based on UAV spraying. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.174>.
32. Milanowski M, Subr A, Combrzyński M, Róžańska-Boczula M, Parafiniuk S (2022) Effect of adjuvant, concentration and water type on the droplet size characteristics in agricultural nozzles. *Applied Sciences*, 12(12), 5821. <https://doi.org/10.3390/app12125821>.
33. Henry RS, Fritz BK, Hoffmann WC, Kruger GR (2015) An evaluation of three drift reduction adjuvants for aerial application of pesticides. *GSTF Journal on Agricultural Engineering*, 2, 1-10. https://doi.org/10.5176/2345-7848_2.1.15.
34. Campos SFB, Cunha JPAR, Assunção HHT, Alves TC, Zandonadi CHS, Lemes EM (2020) Efficacy of glyphosate applied using an electrostatic sprayer as affected by adjuvant and carrier volumes. *Planta Daninha*, 38, e020228417. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582020380100092>.
35. Stevens PJG, Kimberley MO, Murphy DS, Policello GA (1993) Adhesion of spray droplets to foliage: the role of dynamic surface tension and advantages of organosilicone surfactants. *Pesticide Science*, 38(2-3), 237-245. <https://doi.org/10.1002/ps.2780380219>.
36. Xu L, Zhu H, Ozkan HE, Bagley WE, Krause CR (2011) Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants. *Pest Management Science*, 67(7), 842-851. <https://doi.org/10.1002/ps.2122>.

37. Xu J, Long X, Ge S, Li M, Chen L, Hu D, Zhang Y (2019) Deposition amount and dissipation kinetics of difenoconazole and propiconazole applied on banana with two commercial spray adjuvants. *RSC Advances*, 9(34), 19780-19790. <https://doi.org/10.1039/c9ra02874a>.
38. Song Y, Huang Q, Huang G, Liu M, Cao L, Li F, Zhao P, Cao CJA (2022) The effects of adjuvants on the wetting and deposition of insecticide solutions on hydrophobic wheat leaves. *Agronomy*, 12(9), 2148. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092148>.
39. Lee H, Cho M, Park M, Kim M, Seo JA, Kim DH, Bae S, Kim MS, Kim JA et al. (2024) Effect of rice milling, washing, and cooking on reducing pesticide residues. *Food Science and Biotechnology*, 33(3), 557-567. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01345-7>.
40. Cho M, Im MH (2022) Residual characteristics of buprofezin during rice processing. *Food Science and Preservation*, 29(3), 428-439. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2022.29.3.428>.