



# 눈개승마 증 살충제 Flonicamid 및 Sulfoxaflor의 잔류특성 및 위해성 평가

이정훈 · 송민호 · 유지우 · 안희연 · 이지호\*

건국대학교 상허생명과학대학 식량자원과학과

## Residual Characteristics and Risk Assessment of Insecticides Flonicamid and Sulfoxaflor in Dwarf Goat's Beard

Jung-Hoon Lee, Min-Ho Song, Ji-Woo Yu, Hui-Yeon Ahn, Ji-Ho Lee\*

Department of Crop Science, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Korea

(Received Jun. 19, 2024. Revised Jul. 9, 2024. Accepted Jul. 10, 2024)

**Abstract** Consumer health can be impacted, due to pesticide residues in crops, by increased pesticide use in agricultural production. Consequently, various countries have established Maximum Residue Limits (MRLs) for pesticides. This study evaluated residue characteristics and risk assessment of flonicamid and sulfoxaflor in Dwarf Goat's Beard *Aruncus dioicus* var. *aethusifolius*. These two pesticides had residue levels ranging from 0.05 to 4.08 mg/kg and 0.04 to 10.90 mg/kg, with half-lives of 3.40 days and 2.46 days, respectively. Based on the highest exposure scenario (99th percentile), the risk assessments indicated Hazard Index (HI) values of 0.63 and 0.82, suggesting low risk (HI <1). After pesticide application, a risk assessment was conducted for treated plots at 7, 14, and 21 days with consideration given to actual intake scenarios within the agricultural environment. When compared to harvest day (flonicamid, sulfoxaflor HI = 0.052, 0.009), results showed that pesticide exposure risk decreased to below 0.1 at 7 and 14 days after treatment.

**Keywords:** *Aruncus dioicus* var. *aethusifolius*, Flonicamid, Sulfoxaflor, Residual characteristics, Risk assessment

## 서 론

생산량 증가를 위해 농약사용이 증가됨에 따라 농산물에 잔류된 농약은 소비자의 건강에 영향을 미칠 수 있다(Damalas and Eleftherohorinos, 2011). 세계 각국의 식품 안전 규제 기관들은 농약 잔류물 관리를 위해 농약잔류허용기준(Maximum Residue Limit, MRL)을 설정하여 소비자가 섭취해도 안전한 잔류 농약의 양을 관리하고 있다(Crépet et al., 2021). 국내에서는 2019년부터 잔류허용기준이 설정되지 않은 작물에 대해 일률적인 0.01 mg/kg 기준을 적용하는 농약허용물질목록관리제도(Positive List System, PLS)를 도입해 소비자의 먹거리 안전을 확보하고 있다. MRL이 설정되지 않은 미등록 농약을 사용하였을 경우, 일률기준 0.01 mg/kg을 적용하여 부적합 농산물은 산지 폐기, 출하 연기, 용도 전환 등행정처분 대상이 된다(Ahn et al., 2020). 이에 따른 생산자의 피해를 방지하기 위해 상대적으로 설정된

잔류허용기준 수가 적은 소면적 재배 농산물의 잔류허용기준 추가 설정은 필수적이다(Kim et al., 2021).

소면적 재배작물인 눈개승마(*Aruncus dioicus* var. *aethusifolius*)는 장미목 장미과의 다년생 초본식물로 고산지대에서 재배되며 주로 어린순이 나물로 소비된다(Youn et al., 2012). 눈개승마에는 성인병에 효과가 있다고 밝혀진 사포닌과 항산화 기능을 가진 폴리페놀의 함량이 높아 기능성 작물로 재배되고 있다(Kim et al., 2011). 그러나 눈개승마에 등록된 농약은 glufosinate ammonium (MRL: 0.05 mg/kg) 1종이며, 재배와 관련한 표준화된 방법이 확립되지 않아 작물 보호에 대한 농약사용정보가 부족하다(Jeon et al., 2015; Ministry of Food and Drug safety, 2023). 때문에 눈개승마의 잔류 농약에 관한 연구가 필요하다.

최근 농약의 환경 영향에 대한 인식이 높아짐에 따라 인축 및 환경독성이 낮은 농약이 관심받고 있다(Chakrabarti et al., 2020). 현재 꿀벌 개체수의 감소와 관련하여 neonicotinoid 계열 농약의 꿀벌 독성에 대한 우려가 높아지고 있으며, 이 농약들이 꿀벌 봉군 붕괴 현상(colony collapse disorder)을 일으킬 수 있다는 연구결과가 발표되고 있다(Blacquièr et al.,

\*Corresponding author

E-mail: micail@naver.com

2012; VanEngelsdorp et al., 2009). Fonicamid는 매미목 곤충의 섭식을 방해하여 neonicotinoid 계열의 약제 저항성 진딧물을 효과적으로 제어하고, sulfoxaflor는 neonicotinoid 계열과 유사한 구조를 가지며 이 구조를 통해 곤충의 중추신경계 이온채널(nicotinic acetylcholine receptor, nAChR)의 아세틸콜린 활성을 저해한다(Maienfisch, 2019; Sparks et al., 2013). Fonicamid 및 sulfoxaflor의 꿀벌과 접촉 시 반수치사량(Acute contact LD<sub>50</sub> (Lethal Dose 50%)은 각각 100 µg/bee 이상과 0.130 µg/bee로 꿀벌 독성으로 대두된 neonicotinoid 계열 농약인 imidacloprid (0.043 µg/bee)보다 높은 수치이다. 이는 fonicamid가 꿀벌에 독성이 없으며, sulfoxaflor는 급성독성을 가지지만 꿀과 꽃가루에 대한 짧은 반감기로 인해 꿀벌 군집에 장기적인 영향을 주지 않아 neonicotinoid 계열 농약의 대안으로 사용될 수 있음을 의미한다(EPA, 2019; Meikle and Weiss, 2022).

농약잔류허용기준 설정 시, 농약의 모화합물 뿐 아니라 그에 상응한 독성이 있는 경우에 한해 대사물의 잔류량도 함께 합산하여 평가하고 있다(Lushchak et al., 2018). 농약은 환경 및 작물 내에 대사과정을 통해 다양한 형태의 물질(대사물)로 전환될 수 있으며, 이러한 대사물이 모화합물 대비 더 높은 생물 및 환경독성을 나타낼 수 있기 때문이다. Fonicamid의 잔류분은 TFNA 및 TFNG와 모화합물의 합을 fonicamid로, sulfoxaflor의 잔류분은 X11719474 및 X11721061와 모화합물의 합을 sulfoxaflor로 정의하고 있다(NAS, 2018). 본 연구에서는 노지재배 중인 눈개승마에 살충제 fonicamid 및 sulfoxaflor를 경엽처리 후 작물 내 농약의 잔류 특성 및 위해성 평가를 실시하여 눈개승마 중의 농약잔류허용기준 및 안전사용기준 설정을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 시험약제 및 시약

포장 시험을 위해 fonicamid 10% 입상수화제(강충탄, 태평에이지), sulfoxaflor 7% 액상수화제(트랜스폼, 팜한농)를 선정하여 살포하였다. 검량선 표준용액 조제 및 회수율 실험에는 fonicamid (98.7%, Sigma Aldrich, USA), TFNA (99.9%, Sigma Aldrich, USA), TFNG (99.9%, Sigma Aldrich, USA), sulfoxaflor (99.9%, HPC, Germany), X11721061 (82.0%, Aladdin, USA), X11719474 (99.7%, Toronto Research Chemical, USA)를 사용하였다. 전처리시 유기용매는 acetonitrile (HPLC grade, J.T.Baker, USA)를 사용하였고, 시약은 formic acid (LC grade, Honeywell, USA) 및 QuEChERS Extraction Kit (EN15662, CTK corporation, Korea)를 사용하였으며 필터는 DIAMOND Florentine syringe filter (0.22 µm, 13 mm, CTK corporation, Korea)를 사용하였다.

### 포장시험

시험포장은 노지재배로 강원도 영월군 눈개승마(재래종) 재배 포장을 선정하였다. 무처리 및 약제살포 시험구(반복당 16 m<sup>2</sup>)를 배치하고 반복간 교차오염을 방지하기 위해 1 m의 완충지대를 두었다. 시험구는 살포일 간격이 잔류량에 미치는 영향을 조사하고자 4개 처리구(수확 30-21, 21-14, 14-7, 7-0일 전)로 구성하였으며, fonicamid 10% 입상수화제 및 sulfoxaflor 7% 액상수화제를 2000배로 희석(10 g/20 L, 10 mL/20 L)하여 조제한 후 처리구 별 7일 간격 2회 살포(10 a당 120 L)하였다.

시료 채취는 2022년 4월 18일에 0일차 최종 살포 후 모든 처리구에 대하여 반복구당 0.5 kg 이상 채취하였다. 처리구별 시료가 섞이지 않도록 Polyethylene (PE) film bag에 넣어 당일 실험실로 이동하였다.

### 시료 조제

실험실로 운반된 시료는 눈개승마 한 포기의 무게를 측정하고(fonicamid: 98.5 g±6.7, sulfoxaflor: 97.6 g±8.5), 0.5 kg의 시료를 드라이아이스를 추가하여 homogenizer로 균질화하였다. 이후 10 g을 칭량하여 분석에 사용하였고 남은 시료는 -20°C 이하의 온도로 냉동보관하였다. 저장안정성 평가를 위해 fonicamid와 sulfoxaflor 및 각 대사물(TFNA, TFNG, X11721061, X11719474) working solution을 0.1 mg/kg 농도가 되도록 무처리 시료 10 g에 처리한 후, 분석시료와 동일하게 냉동보관하였다.

### 분석법 상 정량한계 및 직선성

기기 정량한계(Instrumental Limit of Quantitation, ILOQ)는 chromatogram 상 분석물질 peak의 signal to noise ratio (S/N)가 10 이상인 농도를 설정하였다. 기기 정량한계에 주입량을 곱하여 최소 검출량(Minimum detectable amount, MDA)을 산출한 후 시료무게(g), 기기 주입량(µL), 분석용액의 최종부피(mL) 및 희석배수를 적용하여 아래 식을 통해 분석법 정량한계(Method Limit of Quantitation, MLOQ)를 산출하였다.

$$\begin{aligned} \text{MLOQ (mg/kg)} \\ &= \frac{\text{MDA (ng)} \times \text{최종 부피 (mL)} \times \text{희석배수}}{\text{기기 주입량 (}\mu\text{L)} \times \text{시료 무게 (g)}} \end{aligned}$$

검량선 작성을 위한 working solution 조제를 위해 fonicamid 표준품(98.7%) 5.06 mg, TFNA 및 TFNG 표준품을 각각 5 mg 칭량한 후 10 mL volumetric flask에 10 mL의 acetonitrile로 용해하여 최종 용액의 농도가 500 µg/mL이 되도록 primary stock solution을 조제하였다. 이와 동일하게, sulfoxaflor, X11719474을 각각 5 mg이 되도록 칭량한 후 10 mL volumetric flask에 10 mL의 acetonitrile로 용해하여 최종 용액의 농도가 500 µg/

**Table 1.** Analytical condition of HPLC-MS/MS for quantitative analysis

(A) Flonicamid, TFNA and TFNG

Pesticides	Flonicamid	TFNA	TFNG
<b>Instrument</b>	Shimadzu LC-MS TQ8050 NX with UHPLC Nexera X2		
<b>Column</b>	Acquity UPLC® BEH Shield RP18 1.7µm (2.1×100 mm)		
<b>Ionization mode &amp; type</b>	Electrospray ionization (ESI), Negative (-)		
	A: 0.1% formic acid in water B: 0.1% formic acid in acetonitrile		
	Time(min)	A(%)	B(%)
<b>Mobile phase</b>	0.0	95	5
	1.0	95	5
	1.5	45	55
	6.0	40	60
	6.5	0	100
	7.5	0	100
	8.5	95	5
	11	95	5
<b>Retention time</b>	4.65 min	4.75 min	4.50 min
<b>Injection volume</b>	2 µL		
<b>Quantifier (CE<sup>a)</sup>)</b>	228.20/81.05 (9)	189.80/146.15 (12)	247.10/146.10 (19)
<b>Qualifier (CE<sup>a)</sup>)</b>	228.20/146.15 (24)	189.80/101.95 (14)	247.10/183.20 (16)

<sup>a)</sup> CE : Collision energy

(B) Sulfoxaflor, X11721061 and X11719474

Pesticides	Sulfoxaflor	X11721061	X11719474
<b>Instrument</b>	AB Sciex Exion LC with API 3200		
<b>Column</b>	Acquity UPLC® BEH Shield RP18 1.7 µm (2.1×100 mm)		
<b>Ionization mode &amp; type</b>	Electrospray ionization (ESI), Positive (+)		
	A: 0.1% formic acid in water B: 0.1% formic acid in acetonitrile		
	Time(min)	A(%)	B(%)
<b>Mobile phase</b>	0.0	95	5
	2.0	95	5
	4.0	0	100
	6.0	0	100
	8.0	95	5
	10.0	95	5
	<b>Retention time</b>	5.30 min	5.25 min
<b>Injection volume</b>	2 µL		
<b>Quantifier (CE<sup>a)</sup>)</b>	278.00/174.10 (-11)	296.20/174.10 (-12)	192.20/130.15 (-19)
<b>Qualifier (CE<sup>a)</sup>)</b>	278.00/154.00 (-26)	296.20/154.10 (-31)	192.20/110.15 (-20)

<sup>a)</sup> CE : Collision energy

mL이 되도록 primary stock solution을 조제하였다. X11721061 표준품(82.0%)을 24.39 mg 칭량한 후 100 mL volumetric flask에 100 mL의 acetonitrile로 용해하여 최종 용액의 농도가 200 µg/mL이 되도록 primary stock solution을 조제하였다. 조제한 primary stock solution을 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 µg/

mL 농도로 희석한 후, 무처리시료의 acetonitrile 추출물을 1:1 (v/v)로 혼합하여 0.0025, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25 µg/mL 농도의 Matrix matched working solution을 조제하였다. 이후 LC-MS/MS에 2 µL를 주입하여 분석하였으며, chromatogram 상의 peak area를 토대로 표준 검량선을 작성하였다. 표준 검량선의

직선성은 회귀식에 의한 결정계수( $r^2$ ) 값으로 확인하였다.

### 눈개승마 중 flonicamid, sulfoxaflor 및 대사물의 회수율 시험

회수율 시험은 두 수준으로 무처리 눈개승마 시료 10 g에 각각 0.1, 1  $\mu\text{g/mL}$ 의 working solution을 0.1 mL씩 주입하여 최종농도 0.01 및 0.1 mg/kg이 되도록 처리하여 5반복 실험을 수행하였다. 저장안정성 시험은 최종농도 0.1 mg/kg 수준으로 flonicamid, TFNA 및 TFNG를 처리한 시료를 206일 동안 냉동보관( $-20^\circ\text{C}$ )한 후 회수율 시험과 동일한 방법으로 추출하여 시료 보관 조건에서의 시험 농약의 안정성을 확인하였다. 이와 같은 방법으로, 162일 동안 냉동보관한 sulfoxaflor, X11721061 및 X11719474 처리시료의 저장안정성을 확인하였다.

### 눈개승마 중 flonicamid, sulfoxaflor 및 대사물의 잔류분석

샘플의 flonicamid와 sulfoxaflor 및 각각에 대한 대사물의 추출은 QuEChERS EN 15662 방법을 이용하였다. 균질화시킨 시료 10 g ( $\pm 0.01$  g)을 칭량하여 50 mL centrifuge tube에 넣고, 10 mL acetonitrile을 첨가 후 1분간 shaker로 강하게 진탕 추출하였다. 진탕 추출한 시료에  $\text{MgSO}_4$  4 g, NaCl 1 g, sodium citrate 1 g과 disodium citrate sesquihydrate 0.5 g을 첨가하여 3분간 진탕 후, 4,000 rpm에서 10분간 원심 분리하였다. 상정액을 1 mL 취하여 DIAMOND Florentine syringe filter (0.22  $\mu\text{m}$ , 13 mm)에 통과시킨 후 얻은 0.5 mL를 acetonitrile 0.5 mL과 섞어 이 용액 2  $\mu\text{L}$ 를 LC-MS/MS에 주입하여 분석하였다. Flonicamid와 sulfoxaflor 및 대사물의 기기 분석조건은 (Table 1)와 같다. 농약의 잔류농도는 matrix matched 검량선을 이용하여 계산하였다. 대사물을 포함하는 flonicamid와 sulfoxaflor의 총 잔류량은 각각 flonicamid의 대사물 TFNA와 TFNG, sulfoxaflor의 대사물 X11721061와 X11719474의 잔류량에 환산계수를 곱한 값을 더해 산출하였다(NAS, 2018) (1,2).

$$(1) \text{모화합물의 총 잔류량(mg/kg)} \\ = \text{모화합물의 총 잔류량(mg/kg)} + \{ \text{대사물의 잔류량(mg/kg)} \times \text{대사물의 환산계수} \}$$

$$(2) \text{대사물의 환산계수} \\ = \frac{\text{모화합물의 분자량}}{\text{대사물의 분자량}}$$

### 반감기 산출

잔류농약의 소실 특성은 first-order kinetics equation을 바탕으로 하여 (2)의 지수함수로 표현할 수 있으며 (2)에서 도출한 반감기 식은 다음과 같다(Beulke and Brown, 2001; Song

et al., 2023)(3,4).

$$(3) \text{농약 살포 후 잔류 농약의 추정농도}(C_0) \\ = ae^{-kt} \quad (a = \text{초기 농도(mg/kg)}, b = \text{분해 속도 상수}, t = \text{시간})$$

$$(4) \text{농약의 반감기}(t_{1/2}) \\ = \frac{\ln 2}{b} \quad (b = \text{분해 속도 상수})$$

잔류량을 바탕으로 산출한 두 농약의 소실 곡선은 (Table 3, Fig. 1)과 같다.

### 위해성 평가

Flonicamid 및 sulfoxaflor의 농산물 잔류에 의한 잠재적인 건강 위험을 평가하기 위해 위해성 평가를 실시하였다. 국내 눈개승마 섭취량 통계가 부족하여, 한국보건산업진흥원의 “2021년 국민영양통계”를 참고하여 눈개승마와 비슷한 형태적 특성을 가진 두릅의 섭취량 데이터를 이용하였다. 위해성 평가는 지역별 체중 kg당 섭취량 데이터를 이용하였으며 일일 섭취 허용량(Acceptable Daily Intake, ADI)은 농촌진흥청 고시 제2024-5호 “농약의 일일섭취허용량(2023. 10)”을 참고하였다(RDA, 2024). 일일 섭취 추정량(Estimated Daily Intake, EDI) 및 위해성 평가 지표(Hazard Index, HI)는 아래의 식을 이용하여 산출하였다(5, 6).

$$(5) \text{EDI (mg/kgbw} \cdot \text{day)} \\ = \text{체중 kg 당 일일 두릅 섭취량(g/kgbw} \cdot \text{day)} \times \text{농약의 잔류량(mg/kg)} \div 100$$

$$(6) \text{HI} \\ = \frac{\text{EDI (mg/kgbw} \cdot \text{day)}}{\text{ADI (mg/kgbw} \cdot \text{day)}}$$

## 결과 및 고찰

### 분석법 검증

농도 별 flonicamid와 sulfoxaflor 및 각각의 대사물을 분석한 matrix matched 검량선의 결정계수( $r^2$ )는 Table 2와 같이 0.0025  $\mu\text{g/mL}$ 에서 0.25  $\mu\text{g/mL}$ 범위에서 0.99 이상으로 직선성을 확인하였다. Flonicamid와 TFNA 및 TFNG의 눈개승마 중 회수율은 0.01 mg/kg 및 0.1 mg/kg 수준에서 73.9~113.2%를 나타냈으며, sulfoxaflor, X11721061 및 X11719474의 회수율은 0.01 mg/kg 및 0.1 mg/kg 수준에서 85.2~113.1%를 나타냈다. 저장안정성 시험 결과, 모든 물질의 회수율이 77.9~113.4% 범위로 저장 중 안정한 것으로 확인되었다. 회수율의 변이계수는 모두 20% 이내였으며, 농촌진흥청고시 제2024-5호 ‘잔류성 시험의 기준 및 방법’의 분석법 검증기준에

**Table 2.** Method validation of the pesticides in *Aruncus dioicus* var. *aethusifolius* (linearity of calibration curves, recovery, storage stability)

Pesticide	Calibration equation ( $y^a = ax^b + b$ )	r <sup>2</sup>	Fortification level (mg/Kg)	Recovery (%)			CV <sup>c</sup> (%)
				1	2	3	
Flonicamid	$y = 275,035.7711x + 2,031.2632$	0.9921	0.01	75.0	76.6	81.5	4.4
			0.1	76.0	76.7	80.5	3.1
TFNA	$y = 14,478,956.7304x - 43,573.7438$	0.9973	0.01	111.6	109.2	104.4	3.4
			0.1	84.6	73.9	81.5	6.9
TFNG	$y = 1,051,878.4558x + 223.0095$	0.9914	0.01	107.0	91.9	100.4	7.6
			0.1	113.2	99.4	92.3	10.5
Sulfoxaflor	$y = 2,228,598.6659x - 4,132.8313$	0.9994	0.01	109.7	108	105.2	2.1
			0.1	106.9	107	97	5.5
X11721061	$y = 963,369.5317x + 2,794.7092$	0.9988	0.01	93.9	86.0	87.2	4.8
			0.1	112.7	113.1	106.5	3.3
X11719474	$y = 6,429,089.0915x + 1,500.3791$	0.9985	0.01	100.1	86.1	85.2	9.2
			0.1	103.6	107.8	82.3	14.0

<sup>a)</sup> Peak area

<sup>b)</sup> Residual amount (ng)

<sup>c)</sup> Coefficient of variation

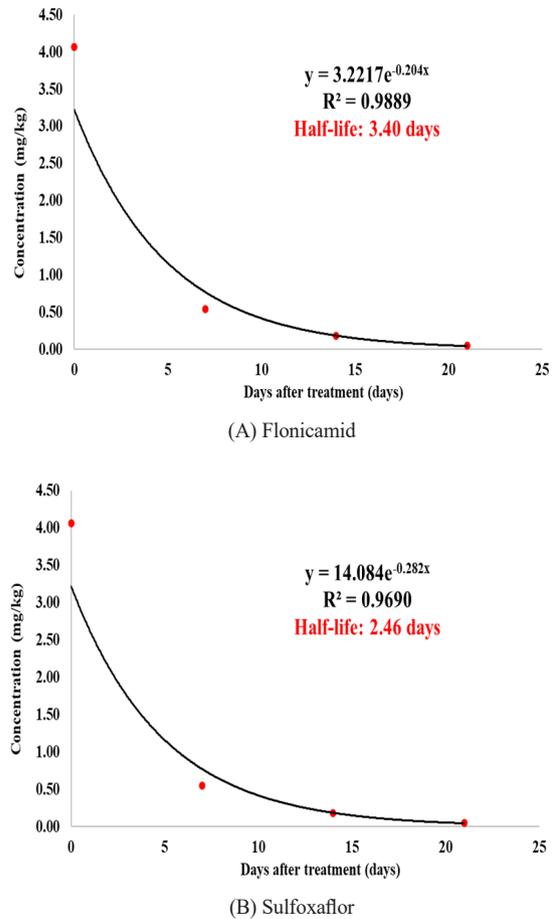
부합하였다(RDA, 2024)(Table 2).

**눈개승마 중 flonicamid 및 sulfoxaflor의 잔류 특성**

눈개승마 중 flonicamid와 sulfoxaflor의 국내 잔류허용 기준(MRL)은 설정되어있지 않으며, 싹가에서 flonicamid의 잔류허용기준 10 mg/kg, 아스파라거스에서 sulfoxaflor의 잔류허용기준 0.3 mg/kg 등으로 고시되어 있다(MFDS, 2023).

Flonicamid의 총 잔류량은 최종 약제살포 당일 및 21일 후 처리구에서 평균 4.08 mg/kg 및 0.05 mg/kg, sulfoxaflor의 경우 10.90 mg/kg 및 0.04 mg/kg으로 함량이 더 낮은 sulfoxaflor (7%)의 잔류량이 flonicamid (10%)보다 높은 잔류량 결과를 보였다(Table 4). 두 화합물의 log P 차이로 인해 (flonicamid: 0.7, sulfoxaflor: 2.2) log P가 상대적으로 높은 sulfoxaflor가 눈개승마의 겹표면의 cuticle 층에 효율적으로 흡착되어 flonicamid에 비해 높은 잔류량을 보이는 것으로 판단된다(Fernández et al., 2017). 또한, 재배시기 중 비가 오는 날이 총 9일 있어, 작물체내로 흡수되지 못한 농약이 강우에 의해 환경 중으로 씻겨 내려갈 가능성이 있다(Fig. 2) (Tiryaki and Temur, 2010).

시험 농약의 타 작물에서 생물학적 반감기를 비교한 결과, 노지재배 양배추 2.97일, 시설재배 피망 47.90일이었고, sulfoxaflor의 경우, 노지재배 브로콜리 3.30일, 시설재배 브로콜리 10.70일로 본 시험에서 눈개승마 중 flonicamid 및 sulfoxaflor의 반감기인 3.40일 및 2.46일과 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다(Table 3, Fig. 1). Flonicamid의 경우, 노지재배



**Fig. 1** Dissipation pattern of flonicamid (A), sulfoxaflor (B) sprayed onto *Aruncus dioicus* var. *aethusifolius*.

**Table 3.** Half-life of the pesticides in *Aruncus dioicus* var. *aethusifolius* and linearity of dissipation equation

Pesticide	Dissipation equation ( $y^a = ae^{-bx}$ , $x = \text{half-life}$ )	$r^2$	Half-life (day)
Flonicamid	$y = 3.2217e^{-0.204x}$	0.9889	3.40
Sulfoxaflor	$y = 14.084e^{-0.282x}$	0.9690	2.46

<sup>a)</sup> Residual concentration of pesticide at time

**Table 4.** Residual characteristics of pesticides

## (A) Flonicamid, TFNA and TFNG

Pesticides	Flonicamid (mg/kg)				
	1	2	3	Mean	CV <sup>a)</sup> (%)
Replicate					
30 - 21	0.01	0.01	0.01	0.01	7.3
21 - 14	0.13	0.14	0.13	0.13	2.1
14 - 7	0.43	0.47	0.44	0.45	4.87
7 - 0	4.31	3.86	3.64	3.94	8.7
Pesticides	TFNA (mg/kg)				
	1	2	3	Mean	CV <sup>a)</sup> (%)
Replicate					
30 - 21	0.02	0.02	0.03	0.02	5.9
21 - 14	0.01	0.01	0.01	0.01	2.7
14 - 7	0.03	0.03	0.03	0.03	5.3
7 - 0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.5
Pesticides	TFNG (mg/kg)				
	1	2	3	Mean	CV <sup>a)</sup> (%)
Replicate					
30 - 21	0.01	0.02	0.01	0.01	7.6
21 - 14	0.04	0.04	0.04	0.04	2.7
14 - 7	0.07	0.07	0.07	0.07	2.6
7 - 0	0.11	0.09	0.10	0.10	7.3

<sup>a)</sup> Coefficient of variation

## (B) Sulfoxaflor, X11721061 and X11719474

Pesticides	Sulfoxaflor (mg/kg)				
	1	2	3	Mean	CV <sup>a)</sup> (%)
Replicate					
30 - 21	0.01	0.01	0.01	0.01	1.2
21 - 14	0.18	0.18	0.18	0.18	2.2
14 - 7	3.37	3.17	3.26	3.27	3.1
7 - 0	10.74	10.56	11.13	10.81	2.7
Pesticides	X11721061 (mg/kg)				
	1	2	3	Mean	CV <sup>a)</sup> (%)
Replicate					
30 - 21	N/D	N/D	N/D	-	-
21 - 14	N/D	N/D	N/D	-	-
14 - 7	0.06	0.05	0.05	0.05	3.8
7 - 0	0.03	0.04	0.03	0.03	8.7
Pesticides	X11719474 (mg/kg)				
	1	2	3	Mean	CV <sup>a)</sup> (%)
Replicate					
30 - 21	0.04	0.04	0.04	0.04	0.6
21 - 14	0.01	0.01	0.01	0.01	5.7
14 - 7	0.04	0.04	0.04	0.04	3.1
7 - 0	0.04	0.04	0.04	0.04	2.2

<sup>a)</sup> Coefficient of variation

양배추의 반감기와 눈개승마의 반감기가 비슷하였고, 반면에 시설재배 피망과는 큰 차이가 있어 이는 작물의 특성(표면 구성성분에 따른 농약의 흡·탈착 및 작물체내 흡수율)과 환경적 요인(온습도 및 시설/노지재배 유무)이 영향을 미친 것으로 판단된다(Chen et al., 2022; Jung et al., 2016; Wang et al., 2018). Sulfoxaflor의 경우 노지재배 브로콜리 반감기와 비슷하였으며, 시설재배 브로콜리의 반감기가 노지재배에 비해 약 3배 이상 긴 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 노지재배 특성상 본 시험수행 시 약제살포 기간(3/19일-4/18일)동안 9차례의 강우로 인해 표면의 농약 잔류량이 감소량이 감소된 것으로 파악된다(Fig. 2). 이 같은 결과를 통해 작물의 잔류량은 시설/노지재배 여부, 강수량 등 환경적 요인이 크게 작용하는 것을 확인할 수 있었다(Tiryaki et al., 2010). 시설재배시 강우 영향 외에 광분해와 관련하여 시설재배시 광차단을 적게 할수록 fonicamid의 반감기가 짧아지는 것을 확인하였다(무차광 47.9일 < 광차단 35%, 63.7일 < 광차단 75%, 66.0일). 이를 통해 빛이 농약의 분해에 영향을 주고, 시설재배시 노지재배에 비해 빛의 직접적인 노출을 줄여 농약 반감기가 길어지는 것으로 판단된다(Jung et al., 2016).

**위해성 평가**

Fonicamid와 sulfoxaflor의 일일섭취허용량은 각각 0.025 mg/kg·b.w./day, 0.05 mg/kg·b.w./day로 설정되어 있다(MFDS, 2023). Fonicamid와 sulfoxaflor의 최대잔류량은 약제살포 후 당일 수확한 처리구에서 4.47 mg/kg 및 11.21 mg/kg이었다(Table

5). 국내 전체 두릅 섭취자의 99퍼센타일의 섭취량 및 전체 섭취량에 대한 평균으로 각각의 HI를 산출한 결과, fonicamid는 0.40, 0.12, sulfoxaflor는 0.53, 0.16로(Table 6), HI가 1이하이기 때문에 위해성이 낮다고 판단할 수 있다(Environmental Protection Agency, 2005). 해당 결과는 약제살포 당일 수확 처리구의 위해성 평가 결과이며, 실제 농업환경 내 섭취 시나리오(약제살포 후 7, 14, 21일 경과)를 추가적으로 고려해야 한다. 가장 위해성이 높은 시나리오인 전체 두릅 섭취자의 99퍼센타일을 대상으로 다른 처리구의 HI를 계산한 결과, 살포 후 7일 및 14일 처리구에서 fonicamid의 경우 0.052 및 0.017, sulfoxaflor의 경우 0.158 및 0.009이었으며, 살포 후 당일 수확 시나리오에 비해 위해성이 낮았다(Table 7). Fonicamid의 경우 살포 후 7일 이후, sulfoxaflor의 경우 살포 후 14일 이후 처리구에서 HI가 0.1이하로 눈개승마 섭취 시 농약 노출 위해성이 매우 낮은 것을 확인할 수 있었으며 이를 통해 눈개승마에 대한 fonicamid 및 sulfoxaflor의 안전사용기준은 수확 7일 전 2회처리와 수확 14일 전 2회처리를 제안한다. 본 연구 결과는 눈개승마 재배 시 안전한 농약 사용을 위한 안전사용기준 및 잔류허용기준 설정의 기초자료로 활용될 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 농촌진흥청 연구과제(과제번호: RS-2024-0039693)의 지원에 의해 수행되었습니다.

**Table 5.** Total residual characteristics of fonicamid and sulfoxaflor

Pesticides		Fonicamid <sup>a)</sup> (mg/kg)				
Replicate		1	2	3	Mean	CV <sup>c)</sup> (%)
30 - 21		0.05	0.05	0.05	0.05	3.1
21 - 14		0.19	0.20	0.19	0.19	2.2
14 - 7		0.53	0.58	0.55	0.56	3.9
7 - 0		4.47	4.00	3.78	4.08	8.6
Pesticides		Sulfoxaflor <sup>b)</sup> (mg/kg)				
Replicate		1	2	3	Mean	CV <sup>c)</sup> (%)
30 - 21		0.04	0.04	0.04	0.04	0.5
21 - 14		0.19	0.19	0.19	0.19	2.3
14 - 7		3.49	3.28	3.37	3.38	3.1
7 - 0		10.82	10.65	11.21	10.90	2.7

<sup>a)</sup>Total amount of fonicamid = amount of fonicamid + (TFNA×1.20<sup>b)</sup>) + (TFNG×0.92<sup>b)</sup>)  
<sup>b)</sup>Total amount of sulfoxaflor = amount of sulfoxaflor + (X11721061×1.45<sup>b)</sup>) + (X11719474×0.93<sup>b)</sup>)  
<sup>c)</sup>Coefficient of variation  
<sup>d)</sup>Molecular weight of fonicamid (229.2)/molecular weight of TFNA (191.1)  
<sup>e)</sup>Molecular weight of fonicamid (229.2)/molecular weight of TFNG (248.2)  
<sup>f)</sup>Molecular weight of sulfoxaflor (277.3)/molecular weight of X11721061 (191.1)  
<sup>g)</sup>Molecular weight of sulfoxaflor (277.3)/molecular weight of X11719474 (295.3)

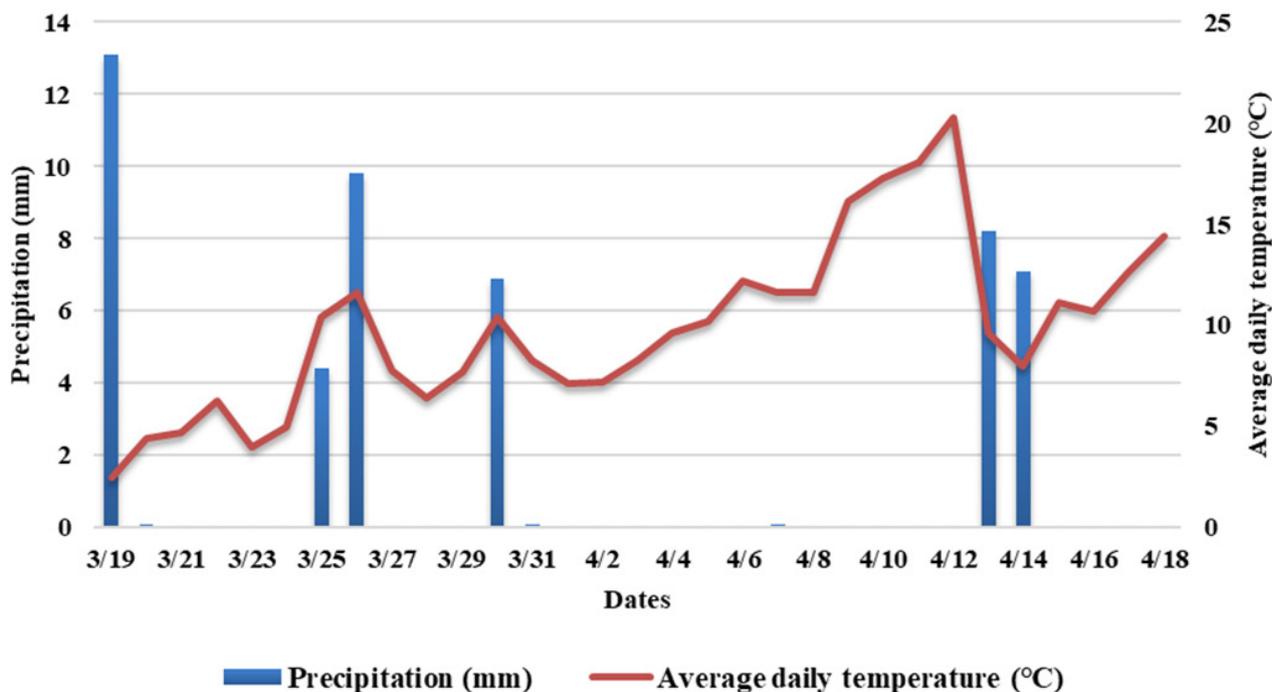


Fig. 2 Average daily temperature and precipitation during the pesticide application (Yeongwol-gun Gangwon-do, 2022.3.19-2022.4.18).

Table 6. Hazard index of treatment group 7-0

Pesticide	Hazard index (Exposure Scenarios)	
	p99 <sup>a)</sup>	Average
Flonicamid	0.40	0.12
Sulfoxaflor	0.53	0.16

<sup>a)</sup>99th percentile of the distribution of intake amounts

Table 7. Hazard index of pesticides for different treatment groups

Pesticide	Treatment			
	30-21	21-14	14-7	7-0
Flonicamid	0.005	0.017	0.052	0.404
Sulfoxaflor	0.002	0.009	0.158	0.527

## Author Information and Contributions

Jung-Hoon Lee, Department of Crop Science, Konkuk University, Master student, <https://orcid.org/0009-0005-9256-9505>

Min-Ho Song, Department of Crop Science, Konkuk University, Ph.D. student, <https://orcid.org/0000-0003-1362-7008>

Ji-Woo Yu, Department of Crop Science, Konkuk University, Ph.D. student

Hui-Yeon Ahn, Department of Crop Science, Konkuk University, Master student

Ji-Ho Lee, Department of Crop Science, Konkuk University, Research Professor, <http://orcid.org/0000-0001-5745-3543>

Conceptualization, consultation, Ji-Ho Lee; field trials, Jung-Hoon Lee, Min-Ho Song, Ji-Woo Yu, Hui-Yeon Ahn; formal analysis, Jung-Hoon Lee; writing-original draft, Ji-Ho Lee, Jung-Hoon Lee; writing-oreview&editing, Ji-Ho Lee; resources, Jung-

Hoon Lee, Min-Ho Song, Ji-Woo Yu, Hui-Yeon Ahn

## 이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

## Literature cited

- Ahn I, Lee IA, Jung MK, Choi JH, Joo JH. 2020. Awareness and pesticide use patterns of farmers after Positive List System (PLS) implementation. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, 32(3), 425-435. (In Korean)
- Beulke S, Brown C. 2001. Evaluation of methods to derive pesticide degradation parameters for regulatory modelling. *Biology and fertility of soils*, 33, 558-564.
- Blacquièrre T, Smaghe G, Van Gestel C, Mommaerts V. 2012. Neonicotinoids in bees: a review on concentrations, side-effects and risk assessment. *Ecotoxicology*, 21, 973-992.
- Chakrabarti P, Carlson E, Lucas H, Melathopoulos A, Sagili R. 2020. Field rates of Sivanto™(flupyradifurone) and Transform®(sulfoxaflor) increase oxidative stress and induce apoptosis in honey bees (*Apis mellifera* L.). *Plos one*, 15(5), e0233033.
- Chen G, Liu F, Zhang X, Zhang R, Cheng A, et al. 2022. Dissipation rates, residue distribution, degradation products, and degradation pathway of sulfoxaflor in broccoli. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59592-59605.
- Crépet A, Luong M, Baines J, Boon P, Ennis J, et al. 2021. An international probabilistic risk assessment of acute dietary exposure to pesticide residues in relation to codex maximum residue limits for pesticides in food. *Food Control*, 121, 107563.
- Damalas C, Eleftherohorinos I. 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International journal of environmental research and public health*, 8(5), 1402-1419.
- Environmental Protection Agency, 2005. Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities, EPA. <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/tsd/td/web/html/risk.html>. (Accessed June. 26. 2024).
- EPA, 2019. Decision Memorandum Supporting the Registration Decision for New Uses of the Active Ingredient Sulfoxaflor on Alfalfa, Cacao, Citrus, Corn, Cotton, Cucurbits, Grains, Pineapple, Sorghum, Soybeans, Strawberries and Tree Plantations and Amendments to the Labels, EPA-HQ-OPP-2010-0889-0570. WASHINGTON, DC 20460. Pp.21-22.
- Fernández V, Bahamonde H, Javier Peguero-Pina J, Gil-Pelegrín E, Sancho-Knapik D, et al. 2017. Physico-chemical properties of plant cuticles and their functional and ecological significance. *Journal of Experimental Botany*, 68(19), 5293-5306.
- Jeon SO, Hwang JI, Kim TH, Kwon CH, Son YU, et al. 2015. Residual Patterns of Insecticides Bifenthrin and Chlorfenapyr in Perilla Leaf as a Minor Crop. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 34(3), 223-229. (In Korean)
- Jung DI, Farha Waziha, Abd El-Aty AM, SW Kim, Rahman Md Musfiqur, et al. 2016. Effects of light shading and climatic conditions on the metabolic behavior of flonicamid in red bell pepper. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-9.
- Kim CK, Lee JK, Oh SA, Kim YE, Kwon EY, et al. 2021. Monitoring of pesticide residues in agricultural products in gangseo, seoul, by introduction of the positive list system. *Journal of Food Hygiene and Safety*, 36(2), 163-171. (In Korean)
- Kim MS, Kim KH, Jo JE, Choi JJ, Kim YJ, et al. 2011. Antioxidative and antimicrobial activities of *Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus* Hara extracts. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 40(1), 47-55. (In Korean)
- Lushchak V, Matviishyn T, Husak V, Storey J, Storey K. 2018. Pesticide toxicity: a mechanistic approach. *EXCLI journal*, 17, 1101.
- Maienfisch P. 2019. Selective feeding blockers: pymetrozine, flonicamid, and pyrifluquinazon. *Modern Crop Protection Compounds*, 3, 1501-1526.
- Meikle W, Weiss M. 2022. Field and Cage Studies Show No Effects of Exposure to Flonicamid on Honey Bees at Field-Relevant Concentrations. *Insects*, 13(9), 845.
- MFDS, 2023. Pesticide MRLs in Food, Ministry of Food and Drug Safety. [https://mfds.go.kr/brd/m\\_218/list.do](https://mfds.go.kr/brd/m_218/list.do). (Accessed June. 24. 2024). (In Korean)
- Ministry of Food and Drug safety, 2023. Food Code, <https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/>. (Accessed June. 24. 2024). (In Korean)
- NAS. 2018. Pesticide residue definitions for agricultural products. (In Korean)
- RDA, 2024. Registration standards for pesticides and raw materials, Jeonju, Korea. (In Korean)
- 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.
- Sparks T, Watson G, Loso M, Geng C, Babcock J, et al. 2013. Sulfoxaflor and the sulfoximine insecticides: Chemistry, mode of action and basis for efficacy on resistant insects. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107(1), 1-7.
- Tiryaki O, Temur C. 2010. The fate of pesticide in the environment. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 4(10).
- VanEngelsdorp D, Evans J, Saegerman C, Mullin C, Haubruge E, et al. 2009. Colony collapse disorder: a descriptive study. *Plos one*, 4(8), e6481.
- Wang S, Jin F, Cao X, Shao Y, Wang J, et al. 2018. Residue behaviors and risk assessment of flonicamid and its metabolites in the cabbage field ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 420-429.
- Youn JS, Shin SY, Wu Y, Hwang JY, Cho JH, et al. 2012. Antioxidant and anti-wrinkling effects of *Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus* extract. *Korean Journal of Food Preservation*, 19(3), 393-399. (In Korean)

## 눈개승마 중 살충제 Flonicamid 및 Sulfoxaflor의 잔류특성 및 위해성 평가

이정훈, 송민호, 유지우, 안희연, 이지호\*  
건국대학교 상허생명과학대학 식량자원과학과

**요약** 농약 사용 증가로 인한 농산물 잔류 농약은 소비자 건강에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따라 각국은 농약잔류허용기준(MRL)을 설정하고 있다. 눈개승마에 flonicamid와 sulfoxaflor를 처리한 후 잔류 특성과 반감기 비교 및 위해성 평가를 실시하였다. 두 농약의 잔류량은 각각 0.05~4.08 mg/kg, 0.04~10.90 mg/kg으로 확인되었으며, 반감기는 3.40일 및 2.46일로 확인되었다. 위해성이 가장 높은 시나리오(99퍼센타일)로 평가한 결과, Hazard index (HI) 값은 각각 0.40, 0.53로 위해성이 낮았다(HI < 1). 실제 농업환경 내 섭취시나리오를 고려하여 약제 살포 후 7, 14, 21일 이후 처리구를 대상으로 위해성 평가한 결과, 7, 14일 이후 처리구에서 수확 당일에 비해 농약 노출 위해성이 0.1이하로 낮아진 것을 확인하였다(flonicamid, sulfoxaflor HI = 0.052, 0.009).

**색인어** 눈개승마, flonicamid, sulfoxaflor, 잔류특성, 위해성 평가