



ORIGINAL ARTICLES

농약의 미꾸리 노출 시나리오 및 위해성 평가법 개선 연구

오진아^{1*} · 함성남² · 박연기¹ · 이 슬¹ · 전경미¹ · 윤창영¹ · 박흥현¹

¹농촌진흥청 국립농업과학원 독성위해평가과, ²국립낙동강생물자원관 다양성연구팀

Improvements of Pesticide Exposure Scenario and Risk Assessment Method for Mudfish

Jina Oh^{1*}, Seong-Nam Ham², Yeon-Ki Park¹, Seul Lee¹, Kyongmi Chon¹,
Chang-Young Yoon¹, Hong-Hyun Park¹

¹Toxicity and Risk Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences,
Rural Development Administration, Wanju, Korea

²Crop Biodiversity Research Team, Nokdonggang National Institute of Biological Resources, Sangju, Korea

(Received on November 30, 2021. Revised on December 10, 2021. Accepted on December 13, 2021)

Abstract Mudfish is the main food for birds and also a major species of rice paddy ecosystem. So it is essential for registration evaluation of pesticides for rice. The risk assessment of pesticides for mudfish is evaluated by tiered system. First, the toxicity exposure ratio (TER) is calculated with acute toxicity and predicted exposure concentration (PEC), and the risk is determined according to the criteria. If the risk is unacceptable, result of a field test is evaluated as a higher tier. The PEC is simply calculated as the amount of pesticide per volume of rice paddy water. But there is a problem that the realistic exposure situation is not sufficiently reflected such as the method of application and multiple application of pesticides. Therefore, in this study, the pesticide exposure scenario and method of PEC calculation were improved, and the applicability to pesticide registration evaluation was reviewed. As a result of simulating the risk assessment of pesticides with improved method, the difference in PEC according to the application methods, and the change in concentration according to the chemical properties for multiple application were sufficiently reflected. For the PECs, 29 percent of pesticides were calculated lower than the current risk assessment method, and the proportion of pesticides evaluated to be unacceptable risk was also lower. If this improved risk assessment method is applied to pesticide registration evaluation, it is judged that unnecessary field tests are expected to be reduced because more realistic PEC can be calculated.

Key words Exposure Scenario, Mudfish, Pesticide, Risk assessment

서론

논은 우리나라의 농경지 면적의 55.72% (689,929 ha)를 차지하고 있으며(Statistics Korea, 2016), 습지 생태계로서의 생물 다양성 보전에 있어도 그 가치가 매우 중요하다. 논은 경작이 시작되는 봄에 물을 대기 시작하여 여름까지 담수 환경을 유지하기 때문에(RDA, 2019) 어류를 비롯한 다양한 수생생물의 서식처 및 산란장소로써 이용되고 있다.

그러나 벼 생산량 증대를 위해 논에 살포되는 농약으로 인해 논에 서식하는 수생생물의 개체 수가 급감하거나 논 생태계가 파괴될 우려가 있다(NAS, 2013). 논에 사용하는 농약은 살포 후 유효성분이 논물을 통해 배수되어 하천이나 호수에 유입되는 경우 수생태계에 악영향을 미칠 우려가 있으므로 우리나라와 같이 벼 재배용 농약의 사용량이 많은 국가의 경우에는 수생생물에 대한 농약의 위해성 평가는 필수적이다(Park et al., 2017).

논 생태계에 서식하는 많은 수생생물 중에 미꾸리는 논을 이용하는 다른 어류에 비해 오랜 기간 논에서 머물며 먹이 활동과 생식 활동 등 대부분의 생활사가 논에서 이루어진다.

*Corresponding author
E-mail: oja5074@korea.kr

이러한 이유로 미꾸리는 농약의 남용 등에 의한 논 생태계의 환경변화에 더욱 크게 영향을 받을 수 있고, 미꾸리 개체수의 급감으로 인해 백로나 왜가리 등 습지에서 먹이활동을 하는 조류에도 큰 위협이 되고 있다(Han et al., 2013). 논은 벼 재배를 위해 인위적으로 조성한 생태계이지만 논을 이용하는 조류의 주요 먹이인 미꾸리를 보호하기 위해 농림부에서는 농약 등록평가 시 미꾸리를 평가하도록 권고하고 있다(Park et al., 2003).

따라서 현재 국내 농약 등록평가 시 벼 재배용 농약의 경우 잉어, 송사리 등 국제 표준종인 담수어종 이외에 미꾸리(*Misgurnus anguricaudatus*) 위해성을 추가적으로 평가한다(PCA, 2020). 농약의 미꾸리 위해성은 환경추정농도(Predicted exposure concentration, PEC)와 독성영향을 비교하여 등록기준에 따라 평가하는데, 급성독성시험(1단계) 및 야외포장시험(2단계)을 단계적으로 검토한다. 1단계 평가는 농약 품목의 미꾸리 급성독성(48시간 반수치사농도, LC₅₀)과 논물 중 농약 농도(PEC)로 독성노출비(Toxicity exposure ratio, TER)를 구하고 평가기준(TER ≤ 2 : 위해성 있음)에 따라 위해성을 판단한다. 1단계 평가 결과 위해성이 있는 경우 2단계로 실제 농약 사용방법에 따른 미꾸리 야외포장시험 결과를 검토하고, 7일차 누적치사율이 30% 이상인 경우 미꾸리 위해성 우려 품목으로 판단하여 농약 등록을 보류할 수 있다(PCA, 2020).

그러나 현재 미꾸리 1단계 위해성 평가 시 노출량은 논물(10a, 수심 5 cm)에 1회 살포 직후 농약 살포량 전량이 노출된다는 시나리오를 적용하여 PEC를 산출하므로, 농약의 경엽살포제, 수면처리제 등 살포방법에 따른 노출량 차이와 안전사용기준에 따른 반복살포의 영향을 반영하지 못하는 등의 문제점이 있다. 특히 국내 등록 농약의 적용대상 중 88% (40,354/46,070 건)가 2회 이상 반복살포(RDA, 2021)하는 경우이므로 기존의 1회 살포에 대한 PEC 산출은 실제 위해성을 과소평가 할 우려가 있다. 그러나 반복살포 시 살포량과 살포횟수를 단순히 곱한 전체 사용량을 현행 평가법에 적용할 경우 시간에 따른 농약의 소실량이 반영되지 않으므로 실제보다 과대평가 될 우려도 있다.

따라서 농약의 다양한 살포환경과 이화학적 특성에 따른 PEC를 산출할 수 있도록 기존 평가법을 개선할 필요가 있

다. 본 연구에서는 농약 등록 시 미꾸리 위해성 평가법을 개선하기 위해 선행 연구에서 설정한 노출 시나리오(Oh et al., 2021) 개선안을 적용하여 국내 등록된 전체 농약의 위해성 평가 시뮬레이션을 수행하였고 실제 등록평가로의 적용 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

미꾸리 노출 시나리오

벼 재배기간 동안 논물 중 서식하는 미꾸리를 노출 시나리오의 보호대상으로 선정하였다. 미꾸리의 습성상 보조적인 장호흡 또는 먹이활동 중에도 농약에 노출될 수 있지만 그보다 아가미 호흡으로 인한 수중 농약성분의 노출 비중이 높다고 판단하여 농약 살포 후 논물 중 최대 농도(PEC_{peak})에 노출된다는 가정으로 시나리오를 설정하였다(Oh et al., 2021).

논 서식 미꾸리에 대한 농약 노출 경로는 경엽살포, 수면처리 등 살포방법에 따른 직접적인 논물 노출로 가정하였으므로 배수, 비산과 같은 유출 경로는 고려대상에서 제외하였다. 미꾸리가 노출되는 벼 재배기간 동안 논물 중 농약 농도의 주요 영향요인은 논물 부피이며, 일정 면적의 논 경지의 물 부피는 논물 수위가 결정짓는다. 모내기부터 벼 수확 전까지 두 차례의 물떼기(중간낙수, 완전낙수)를 제외하면 관개용수량을 벼의 생장단계와 강수량에 따라 인위적으로 조절하여 최소 2 cm에서 최대 7 cm까지 논물의 깊이를 유지하기 때문에(RDA, 2019) 특정 시공간적 환경 요인을 고려하지 않고 논물 유지 범위의 평균이자 현행 농약 등록평가 시나리오에 사용하는 5 cm를 기본 수위로 시나리오에 적용하였다.

또한 경엽살포제인 경우 전체 살포량 중 작물 표면과 논물에 낙하하는 농약량이 다르므로 벼 생장단계에 따른 작물 차단계수(Crop interception, CI)를 추가로 고려(ter Horst, 2014)하였다(Table 1).

2회 이상 반복살포하는 농약의 경우 유효성분의 이화학적 특성에 따른 수중 분해량과 휘발량을 반영하여 일정 살포간격의 연속된 살포 후 논물중 최대 농도(PEC_{peak})에 미꾸리가 노출된다고 가정하여 시나리오를 설정하였다.

Table 1. Crop interception rate for paddy rice in Korea

Growth stage	Nusing	Transplanting & Recovering	Tillering	Stem elongation	Flowering	Senescence to ripening
BBCH	0~9	10~19	20~29	30~39	40~89	90~99
Period ^{a)}	1/1~4/28	5/1~6/10	6/11~7/10	7/11~8/10	8/11~8/19	8/20~10/10
CI ^{b)}	0	0.25	0.5	0.7	0.9	0.9

^{a)}Month/day, ^{b)}Crop interception rate(fraction of applied dose)

환경추정농도 산출모델 개발

미꾸리 노출 시나리오를 적용한 PEC 산출에는 PRIMET (Peeters et al., 2008) software tool에 포함된 meta-model을 사용하였다. 농약 1회 살포 시 PEC(PEC₁)는 농약 살포량과 CI를 적용한 산출식을 만들었다(Eq. 1). 이때 CI는 논 수면 처리나 육묘상처리제 등으로 사용되는 입제 제형 농약은 제외하고(CI=0) 경엽처리제에 한하여 적용하였다.

$$PEC_1 = \frac{0.1 \cdot (1 - CI) \cdot M}{d} \tag{1}$$

- PEC₁: Predicted exposure concentration for a single application (ug/L)
- CI: Crop interception fraction at the time of application
- M: Application rate (g a.i./ha)
- 0.1: Correction factor to convert g/ha to mg/m²
- d: Depth of the paddy water (m)

2회 이상 반복 살포하는 농약은 수중 분해량과 휘발량에 대한 dissipation rate k* (Peeters et al., 2008)를 적용하여 연속 살포 후 최대 노출 농도(PEC_n) 산출식을 개발하였다(Eq. 2).

$$PEC_n = PEC_1 \frac{1 - \exp(-n \cdot k^* \cdot \Delta t)}{1 - \exp(-k^* \cdot \Delta t)} \tag{2}$$

- PEC_n: Predicted exposure concentration for multiple applications (ug/L)
- PEC₁: Predicted exposure concentration for a single application (ug/L)
- n: Number of applications
- k*: The overall dissipation rate coefficient accounting for degradation and volatilization (1/d)
- Δt: Time interval between the applications (d)

위해성평가 시뮬레이션

본 연구에서 개발한 미꾸리 노출 시나리오와 PEC 산출 모델의 실제 농약 등록평가 적용 가능성을 연구하기 위해 국내 기등록된 모든 농약에 대한 위해성평가 시뮬레이션을 수행하였다. 농약 성분의 이화학적 특성이 PEC 산출 결과에 반영되는지를 비교 분석하기 위해 비 재배용으로 등록된 농약 483 품목 중 합제를 제외한 단계 82 품목을 평가대상으로 하고 유효성분 함량, 제형, 사용량, 살포시기 및 방법, 살포횟수, 살포간격 정보를 수집하였다(RDA, 2021).

모델 구동을 위한 농약 유효성분의 이화학적 특성은 유럽 식품안전청(European food safety authority, EFSA)의 농약 평가보고서와(EFSA, 2019), pesticides properties database (PPDB, 2019), pesticide manual (BCPC, 2012)로부터 분자

량(g/mol), 증기압(mPa), 수용해도(mg/L), 수증반감기(day)를 수집하여 PEC 산출에 활용하였다. 위해성평가를 위한 농약품목 82개의 미꾸리 급성독성(48시간 반수치사농도)은 국립농업과학원 독성위해평가과 환경독성평가연구실의 농약안전성전문위원회 심의결과 데이터베이스를 활용하였다.

대상 농약의 미꾸리 위해성 평가는 독성노출비(toxicity exposure ratio, TER) 개념을 활용하여 미꾸리 급성독성을 PEC로 나누어 계산하였다(Eq. 3).

$$TER = \frac{LC_{50}}{PEC_{peak}} \tag{3}$$

- TER: Toxicity exposure ratio
- LC₅₀: Lethal concentration 50% (ug/L)
- PEC_{peak}: The maximum predicted environmental concentration (ug/L)

현행 농약 등록 검토기준(PCA, 2020)에 따라 TER이 2 이하인 경우 위해성이 있는 것으로, 2 초과인 경우는 위해성이 낮은 것으로 판단하였다.

결과 및 고찰

개선한 노출 시나리오를 적용한 PEC 산출 결과

국내에 등록된 비 재배용 농약 82 품목의 PEC를 본 연구에서 개선한 미꾸리 노출 시나리오(PEC_{new})와 현행 농약 등록평가의 노출시나리오(PEC_{current})에 따라 각각 산출하여 비교해보았다(Table 2).

현행에 비해 본 연구에서 개발한 노출 시나리오의 개선점은 농약의 살포방법과 살포시기에 따른 작물차단량을 반영한 것과 반복살포 시 농약의 이화학적 특성에 따른 농도변화를 적용하여 최대 노출농도를 산출한 것이다. 따라서 1회 살포하는 수면살포제, 종자처리제, 육묘상처리제 등은 두 시나리오간 PEC 산출결과에 차이가 없었고 경엽처리제의 경우 살포시기에 따른 작물차단량이 PEC에 반영이 되었음을 알 수 있었다(Fig. 1). 경엽살포제 29 품목 중 tricyclazole WP와 SC를 제외한 27품목의 PEC는 현행에 비해 최대 30% 수준(30~100%)으로 낮거나 같았고 해당 농약의 이화학적 특성과 살포횟수에 따라 정도의 차이가 있었다.

농약의 이화학적 특성과 반복살포에 의한 PEC 차이를 분석하기 위해 82 품목 중 tiadinil 30% SC, fenburacarb 2% DP, tricyclazole 75% WP, fenobucarb 50% EC의 시간에 따른 PEC 변화를 그래프로 나타냈다(Fig. 2). Tiadinil 30% SC (Fig. 2a)와 fenobucarb 2% DP (Fig. 2b)는 모두 1회 살포하는 수면처리제이지만 tiadinil 30% SC는 살포 직후 PEC_{peak}가 1,200 µg/L이고 60일 경과 후에도 1,150.38 µg/L로 수중 농약 농도가 유지되는 반면 fenobucarb 2% DP는 PEC_{peak}가

Table 2. PECs and TERs of pesticides for mudfish by using the current and new exposure scenarios

Pesticide	Application rate (g a.i./ha)	Application (application frequency)	Acute toxicity (LC _{50s} µg/L)	PEC _{current} (µg/L)	PEC _{new} (µg/L)	TER _{current}	TER _{new}
2,4-D 40% SL	280	Foliar spray(1)	10000.0	560.0	280.0	17.9	35.7
Benzobicyclon 3.5% SC	200	Water surface(1)	29000.0	400.0	400.0	72.5	72.5
Carbofuran 3% GR	1200	Water surface(1)	10000.0	2400.0	2400.0	4.2	4.2
Carbosulfan 12% EW	1200	Water surface(1)	11870.0	2400.0	2400.0	4.9	4.9
Carboxin 20% WS	132	Seed treatment(1)	8678.0	264.0	264.0	32.9	32.9
Chlorantraniliprole 2.7% SC	20.25	Foliar spray(3)	10000.0	40.5	35.8	246.9	279.3
Chlorantraniliprole 0.4% EC	20.25	Seedling box(1)	10000.0	40.5	40.5	246.9	246.9
Chlorpyrifos-methyl 20% SC	1000	Water surface(1)	2083.0	2000.0	2000.0	1.0	1.0
Clothianidin 21% WS	15	Seed treatment(1)	10000.0	30.0	30.0	333.3	333.3
Clothianidin 0.5% GR	15	Seedling box(1)	100000.0	30.0	30.0	3333.3	3333.3
Clothianidin 20% SL	15	Foliar spray(3)	10000.0	30.0	24.5	333.3	408.2
Clothianidin 1.5% UG	15	Water surface(1)	10000.0	30.0	30.0	333.3	333.3
Cyhalofop-butyl 5% EC	250	Foliar spray(1)	745.0	500.0	250.0	1.5	3.0
Dimethametryn 0.3% GR	90	Water surface(1)	9130.0	180.0	180.0	50.7	50.7
Dinotefuran 70% WS	138.6	Seed treatment(1)	10000.0	277.2	277.2	36.1	36.1
Dithiopyr 0.3% GR	90	Water surface(1)	3150.0	180.0	180.0	17.5	17.5
Etofenprox 0.5% GR	150	Water surface(1)	6590.0	300.0	300.0	22.0	22.0
Etofenprox 4% SO	150	Water surface(1)	10000.0	300.0	300.0	33.3	33.3
Fenobucarb 50% EC	750	Foliar spray(3)	10000.0	1500.0	1125.4	6.7	8.9
Fenobucarb 2% DP	750	Water surface(1)	10000.0	1500.0	1500.0	6.7	6.7
Fenoxanil 4% GR	1600	Water surface(1)	10000.0	3200.0	3200.0	3.1	3.1
Fenoxanil 20% SC	1600	Foliar spray(2)	9180.0	3200.0	1913.8	2.9	4.8
Fentrazamide 1.9% EC	300	Water surface(1)	4580.0	600.0	600.0	7.6	7.6
Ferimzone 40% SC	300	Foliar spray(2)	10339.0	600.0	347.2	17.2	29.8
Florpyrauxifen-benzyl 0.33% GR	99	Water surface(1)	1210.0	198.0	198.0	6.1	6.1
Florpyrauxifen-benzyl 3.75% EC	99	Foliar spray(1)	1292.0	198.0	99.0	6.5	13.1
Flubendiamide 2% EC	30	Foliar spray(3)	4620.0	60.0	31.7	77.0	145.7
Flucetosulfuron 0.07% GR	15	Water surface(1)	810.0	30.0	30.0	27.0	27.0
Flucetosulfuron 10% WG	15	Foliar spray(1)	100000.0	30.0	15.0	3333.3	6666.7
Flucetosulfuron 15% WP	15	Foliar spray(1)	9995.0	30.0	15.0	333.2	666.3
Flucetosulfuron 0.5% DT	15	Water surface(1)	4712.0	30.0	30.0	157.1	157.1

Table 2. continued

Pesticide	Application rate (g a.i./ha)	Application (application frequency)	Acute toxicity (LC ₅₀ , µg/L)	PEC _{current} (µg/L)	PEC _{new} (µg/L)	TER _{current}	TER _{new}
Halosulfuron-methyl 0.2% GR	54	Water surface(1)	10000.0	108.0	108.0	92.6	92.6
Hexaconazole 10% EC	150	Foliar spray(3)	5760.0	300.0	254.3	19.2	22.7
Hymexazol 30% SL	2250	Soil treatment(1)	10000.0	4500.0	4500.0	2.2	2.2
Hymexazol 4% DP	2250	Soil treatment(1)	10000.0	4500.0	4500.0	2.2	2.2
Hymexazol 4% GR	2250	Seedling box(1)	10000.0	4500.0	4500.0	2.2	2.2
Hymexazol 30% SG	2250	Soil treatment(1)	10000.0	4500.0	4500.0	2.2	2.2
Imidacloprid 4% SL	30	Foliar spray(3)	10000.0	60.0	50.4	166.7	198.4
Ipconazole 8% FS	13.2	Seed treatment(1)	5800.0	26.4	26.4	219.7	219.7
Iprobenfos 48% EC	720	Foliar spray(4)	10000.0	1440.0	474.6	6.9	21.1
Iprobenfos 17% GR	6800	Water surface(1)	19951.0	13600.0	13600.0	1.5	1.5
Isoprothiolane 40% EC	600	Foliar spray(3)	3000.0	1200.0	369.3	2.5	8.1
Isotianil 18% SC	150	Foliar spray(2)	10000.0	300.0	172.3	33.3	58.0
Metamifop 9% ME	201	Foliar spray(1)	1600.0	402.0	201.0	4.0	8.0
Metamifop 3.3% EC	201	Foliar spray(1)	410.0	402.0	201.0	1.0	2.0
Metazosulfuron 2% DT	100	Water surface(1)	10000.0	200.0	200.0	50.0	50.0
Metazosulfuron 10% WP	100	Foliar spray(1)	10930.0	200.0	100.0	54.7	109.3
Metazosulfuron 33.33% WG	100	Water surface(1)	10000.0	200.0	200.0	50.0	50.0
Metazosulfuron 4% DT	100	Water surface(1)	8050.0	200.0	200.0	40.3	40.3
Metazosulfuron 2% SC	100	Water surface(1)	8220.0	200.0	200.0	41.1	41.1
Metazosulfuron 0.33% GR	100	Water surface(1)	23800.0	200.0	200.0	119.0	119.0
Oryastrobin 12% SC	525	Foliar spray(3)	2375.0	1050.0	928.5	2.3	2.6
Oxadiazon 12% EC	480	Water surface(1)	2860.0	960.0	960.0	3.0	3.0
Oxadiazon 12% EC	480	Water surface(1)	2860.0	960.0	960.0	3.0	3.0
Oxadiazon 12% EC	480	Water surface(1)	2860.0	960.0	960.0	3.0	3.0
Oxadiargyl 1.7% EC	48	Water surface(1)	990.0	96.0	96.0	10.3	10.3
Oxadiargyl 1.7% EC	48	Water surface(1)	990.0	96.0	96.0	10.3	10.3
Oxadiargyl 1.7% EC	48	Water surface(1)	990.0	96.0	96.0	10.3	10.3
Pencycuron 25% WP	187.5	Foliar spray(3)	10000.0	375.0	335.3	26.7	29.8
Pencycuron 20% SC	187.5	Foliar spray(2)	10000.0	375.0	224.3	26.7	44.6
Penoxsulam 0.12% GR	25	Water surface(1)	100000.0	50.0	50.0	2000.0	2000.0
Penoxsulam 3% SC	25	Foliar spray(1)	74000.0	50.0	50.0	1480.0	1480.0
Penoxsulam 0.08% GR	25	Water surface(1)	10000.0	50.0	50.0	200.0	200.0
Penoxsulam 0.6% SC	25	Water surface(1)	3240.0	50.0	50.0	64.8	64.8
Pentoxazone 6% EC	120	Water surface(1)	739.0	240.0	240.0	3.1	3.1
Pentoxazone 0.8% GR	120	Water surface(1)	10000.0	240.0	240.0	41.7	41.7
Pentoxazone 5% SC	120	Water surface(1)	10000.0	240.0	240.0	41.7	41.7

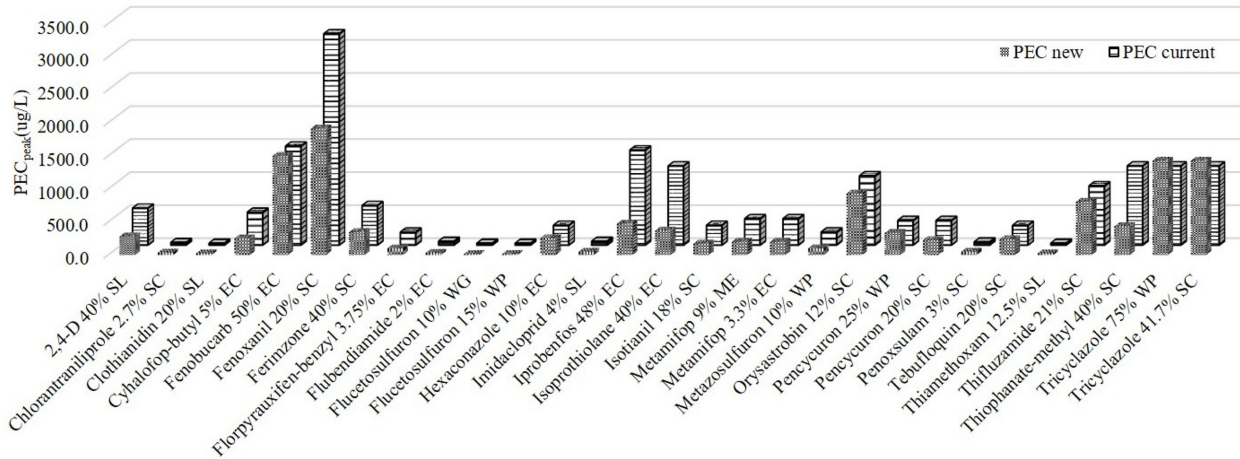


Fig. 1. Comparison of PECs of foliar-sprayed pesticides by using the current and new exposure scenarios.

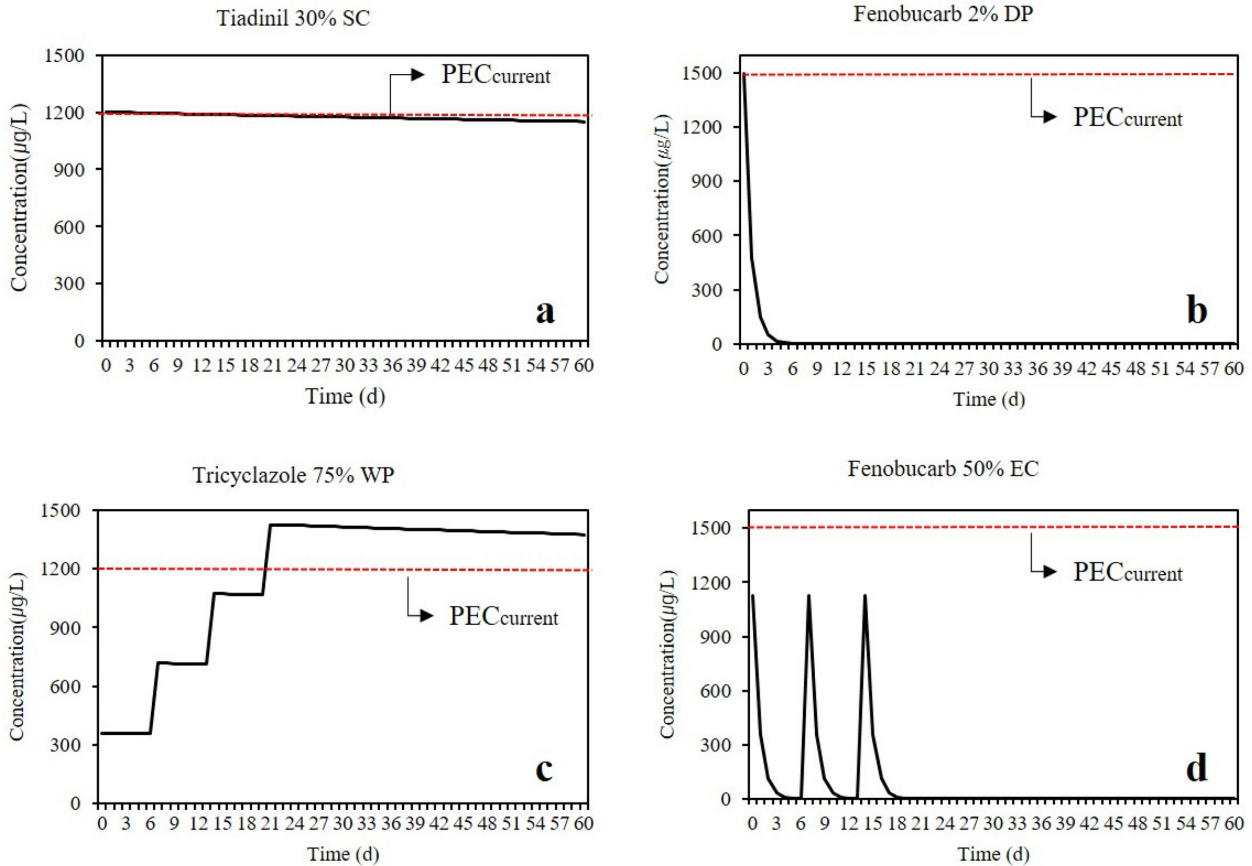


Fig. 2. Concentration as a function of time calculated by new exposure scenario; (a) tiadinil 30% SC, (b) fenobucarb 2% DP, (c) tricyclazole 75% WP and (d) fenobucarb 50% EC.

1,500 $\mu\text{g/L}$ 이지만 살포 1일 후 수중 농도가 474 $\mu\text{g/L}$, 1주일 후 약 0.47 $\mu\text{g/L}$ 로 빠르게 낮아졌다. 이는 tiadinil (증기압 : 0.00103 mPa, 수중 반감기 : 866 day)이 fenobucarb (증기압 : 48 mPa, 수중 반감기 : 28 day)에 비해 수중 분해률과 휘발률이 낮기 때문에 이화학적 성질의 차이에 의한 시간

따른 수중 농도 변화는 다르지만 수중 최대 농도인 PEC_{peak} 값은 현행 시나리오와 같았다.

반면 tricyclazole 75% WP (Fig. 2c)와 fenobucarb 50% EC (Fig. 2d)는 4회, 3회 반복살포하는 경엽살포제로 이화학적 성질에 의한 PEC_{peak} 값의 차이를 보였다. 두 농약 모두 경

엽살포 시 작물차단물이 적용되어 1회 살포 PEC는 현행보다 낮지만 tricyclazole (증기압 : 0.00059 mPa, 수증 반감기 : 1000 day)은 수증 소실률이 낮아 fenobucarb와는 달리 반복 살포 시 수증 농도가 증가하는 경향을 보였고 마지막 4회 살포 직후 PEC_{peak} 값은 현행 PEC보다 높게 산출되었다. 이 결과에 의하면 기존의 PEC 산출법은 농약의 이화학적 특성과 반복적 살포시의 농도 영향을 반영하지 못하므로 tricyclazole 과 같이 수증 잔류기간이 길고 살포횟수도 많은 농약의 경우 실제보다 위해성이 과소평가 될 우려가 있다고 판단했다.

유럽식품안전청의 tricyclazole 평가보고서(EFSA, 2015)에 의하면 물-저니토 시험에서 tricyclazole의 농도는 매우 오래 유지되고(반감기 : 201~453 일), 논물 중 농도(PEC_{paddy water})를 MED-RICE 모델로 산출한 결과 농약 살포 50일 후에도 초기 농도의 8%, 100일 후 15%가 감소하여 본 연구의 모델 구동 결과와 매우 유사했다. 또한 국립농업과학원의 농약안전성평가시스템(NAS, 2021)의 데이터베이스에서 확인한 fenobucarb의 논 수증잔류성 시험 결과, 농약 처리 직후 최대 농도에서 처리 3일 후 수증 농도의 95% 이상이 감소(반감기 : 1일)하여 역시 이번 연구 결과와 실제 시험의 농도 변화 양상이 일치함을 알 수 있었다.

미꾸리 위해성 평가 결과

기존 평가방법과 개선한 평가 모델로 각각 산출한 PEC와 미꾸리 급성독성으로 농약 82 품목의 TER를 구하여(Table 2) 평가기준(TER ≤ 2 : 위해성 있음)에 따라 위해성을 평가하였다(Fig. 3). 그 결과 기존 평가법 사용 시 1단계 평가에서 위해성이 있는 농약이 6 품목(7%)인데 비해 개선한 평가법 적용 시 4 품목(5%)으로 2단계 평가가 필요한 농약 건수가 줄어들었다. 두 노출 시나리오의 위해성 평가 결과가 다른 품목은 cyhalofop-buthyl 5% EC와 metamifop 3.3% EC이며 두 품목 모두 경엽처리제이므로 개선한 노출 시나리오에서는 작물차단물이 적용되어 현행 방법보다 PEC가 낮게 산출되었기 때문이다.

Park et al. (2003)의 연구에서 농약 3 품목(diazinon 3% GR, butachlor 5% GR, iprobenfos 17% GR)의 미꾸리 야외 포장시험 결과 7일간 논물중 농약 잔류농도는 현행 PEC의 10, 13, 20% 미만 수준으로 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 본 연구 결과 개선한 노출 시나리오 적용 시 반복살포를 반영했음에도 24품목(29%)의 PEC_{peak}가 현행 PEC의 30~89% 수준으로 낮게 산출되었고, 이는 보다 현실적인 노출량 산출로 인해 불필요한 야외포장시험(2단계) 수행이 더 줄어들 수 있음을 시사했다.

본 연구에서는 농약의 실제 노출 환경을 반영하지 못하는 현행 미꾸리 위해성 평가법을 개선하기 위해 농약의 사용방법 및 살포횟수에 따른 노출 시나리오를 재설정하고 성분별 이화학적 특성을 적용해 최대 노출 농도를 추정할 수 있는

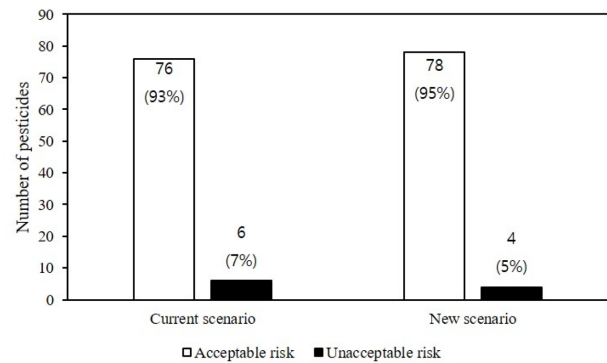


Fig. 3. Proportion of pesticides resulting in acceptable or unacceptable risk using the current and new exposure scenarios.

모델을 개발하였다. 또한 등록평가로의 활용 가능성을 검토하기 위해 국내 등록된 농약을 대상으로 개선 모델을 사용한 위해성 평가를 수행하였다. 그 결과 경엽처리제, 수면처리제 등 농약의 사용방법과 살포시기에 따른 노출량 차이 및 반복살포 시 이화학적 특성에 따른 농도 변화를 충분히 반영하고 있음을 확인했다. 또한 개선한 미꾸리 평가모델을 농약 등록평가에 활용한다면, 기존에 과대평가되었던 일부 경엽처리제 품목들의 2단계 평가 요구가 줄어들 수 있으므로 등록시험에 드는 시간과 비용, 불필요한 실험동물의 희생 감소에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 ‘수서생태계의 농약 노출 평가 개선 연구’(PJ01346601)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Author Information and Contributions

Jina Oh, Toxicity and Risk Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1166-4377>. Conceptualization, Methodology, Writing-original draft preparation, Project administration.

Seong-Nam Ham, Crop Biodiversity Research Team, Nokdonggang National Institute of Biological Resources, Researcher, Data curation, Investigation, Writing-original draft preparation.

Yeon-Ki Park, Toxicity and Risk Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher, Conceptualization, Writing-review.

Seul Lee, Toxicity and Risk Assessment Division, National

Institute of Agricultural Sciences, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9777-0703>, Investigation, Data curation.

Kyongmi Chon, Toxicity and Risk Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2143-2614>, Investigation, Writing-review.

Chang-Young Yoon, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Researcher, Investigation, <https://orcid.org/0000-0001-7220-5425>, Investigation, Writing-review.

Hong-Hyun Park, Department of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Doctor of Philosophy, Supervision, <https://orcid.org/0000-0003-1213-0665>, Writing-review.

저자 이해상충관계

저자 모두는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature cited

- BCPC, British Crop Protection Council, 2012. The Pesticide Manual. Sixteenth edition. Hampshire, UK.
- EFSA, European Food Safety Authority, 2015. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance tricyclazole. *EFSA Journal*, 13(2):4032. p. 46
- EFSA, European Food Safety Authority, 2019. Conclusion on pesticide peer review. www.efsa.europa.eu. (Accessed May. 15. 2020).
- Han MS, Cho KJ, Nam HK, Kang KK, Na YE, et al., 2013. Variation in population size of mudfish by agricultural practices in paddy fields. *Korean J. Environ Agric.* 32(1): 24-34. (In Korean)
- NAS, National Institute of Agricultural Sciences, 2013. Development of technologies for the management and restoration of paddy ecosystem to improve biodiversity in agro-ecosystem. Suwon, Korea. p. 11. (In Korean)
- NAS, National Institute of Agricultural Sciences, 2021. Pesticide safety evaluation system. <http://10.30.100.37:19997/pesticide>. (Accessed Oct. 8. 2021).
- Oh JA, Beltman WHJ, Ter Horst MMS, Ham SN, Park YK, et al., 2021. Development of surface water exposure scenarios for risk assessment of pesticides in Korea. *Sci. Total Environ.* 771:144790. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.144790
- Park YK, Park KH, Joo JB, Kyung KS, Kim BS, et al., 2003. Toxicological effects of pesticides on loach in rice paddy. *Korean J. Pestic. Sci.* 7(2):131-138. (In Korean)
- Park YK, Oh JA, You AS, Park SJ, Cho YM, et al., 2017. Acute toxicity of pesticides to Carp(*Cyprinus carpio*) and changes of toxicity to the exposure time. *Korean J. Pestic. Sci.* 21(4), 453-492. (In Korean)
- PCA, Pesticide Control Act, 2020. Korean law information center. <https://www.law.go.kr>. (Accessed Feb. 5. 2021).
- Peeters FM, Van den Brink PJ, Vlaming J, Groenwold JG, Beltman WHJ, et al., 2008. PRIMET version 2.0, Technical description and manual, Alterra-report 1648, Alterra, Wageningen, The Netherlands.
- PPDB, Pesticide Properties DataBase, 2019. The University of Hertfordshire. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/> (Accessed on Sep. 1. 2020).
- RDA, Rural Development Administration, 2019. Rice quality enhancement technology. Farming skill guide 157. Jeonju, Korea. (In Korean)
- RDA, Rural Development Administration, 2021. Pesticide safety information system. <http://psis.rda.go.kr>. (Accessed Jun. 10. 2021).
- Statistics Korea, 2016. Agriculture, forestry & fishery census report 2015. Agriculture 4(4). Daejeon, Korea. (In Korean)
- ter Horst M.M.S., Wipfler E.L., Adriaanse P.I., Boesten J.J.T.I., Fait G, et al., 2014. Chinese scenarios for groundwater leaching and aquatic exposure; Development of scenarios for environmental risk assessment procedures of pesticides in China, Alterra report 2559, Wageningen, the Netherlands.

농약의 미꾸리 노출 시나리오 및 위해성 평가법 개선 연구

오진아^{1*} · 함성남² · 박연기¹ · 이 슬¹ · 전경미¹ · 윤창영¹ · 박흥현¹

¹농촌진흥청 국립농업과학원 독성위해평가과, ²국립낙동강생물자원관 다양성연구팀

요 약 미꾸리는 논 이용 조류의 주요 먹이이며 논 생태계의 주요종으로 벼재배용 농약의 등록 시 필수 평가 대상이다. 농약의 미꾸리 위해성 평가는 단계적으로 이루어지는데, 급성독성값과 환경추정농도(Predicted exposure concentration, PEC)로 구한 독성노출비(Toxicity exposure ratio, TER)로 평가기준에 따라 위해성 여부를 판단하고 위해성이 있는 경우에는 상위단계로 미꾸리 야외포장시험을 실시하여 그 영향을 평가한다. 이 때 PEC는 논물 부피당 농약 사용량으로 산출하는데 농약의 사용방법, 반복살포 등이 적용되지 않아 실제 노출 환경을 충분히 반영하지 못하는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 농약의 미꾸리 노출 시나리오와 PEC 산출법을 보다 현실적으로 개선하고 농약 등록평가 시 적용 가능성을 검토하였다. 개선한 평가법으로 국내 등록된 벼 재배용 농약의 위해성 평가 시물레이션 결과, 경엽처리, 수면처리 등 농약의 사용방법과 살포시기에 따른 노출량 차이 및 반복살포 시 이화학성에 따른 농도 변화가 충분히 반영되어 29%의 농약이 기존 평가법보다 PEC가 낮게 산출되었고 위해성이 있는 것으로 평가된 농약의 비율도 2% 낮았다. 개선한 평가법을 농약 등록평가에 활용한다면, 보다 현실적인 노출량을 산출할 수 있어 불필요한 야외포장시험 평가를 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

색인어 노출 시나리오, 미꾸리, 농약, 위해성 평가