



ORIGINAL ARTICLES

배 과수원 농약 노출에 따른 인근 거주자 노출 특성 및 농약 위해성평가 체계 구축 방안

김병준 · 임영주 · 박수진 · 조유미 · 신지영 · 홍소혜 · 양시영*

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 독성위해평가과

Assessing Impact of Pesticide Exposure in Pear Orchards on Residents in Surrounding Areas – Strategy for a Resident Pesticide Risk Assessment Framework

Byung Joon Kim, Young joo Lim, Soo-Jin Park, Youmi Jo, Ji-Young Shin,
So-Hye Hong, and Si Young Yang*

Toxicity and Risk Assessment Division, Department of Agro-food safety,
National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

(Received on November 17, 2025. Revised on December 4, 2025. Accepted on December 7, 2025)

Abstract In our study, we evaluated the risks associated with the use of major pesticides on residents in the surrounding areas of pear orchards in Korea. Using the Occupational Pesticide Exposure (OpEx) model for eight pesticide products commonly used in pear orchards, we estimated the exposure of adults and infants to spray, drift, vapour, surface deposit and entry contact in these areas. We assessed the risks to residents by comparing the pesticide exposures, derived under different dermal absorption criteria with Reference Values for Non-Acutely Toxic Active Substances (RVNAS) based on the Acceptable Operator Exposure Level (AOEL). Our results showed that the RVNAS values were generally below 100, indicating a low level of concern for drift and vapor exposure scenarios. In contrast, high risks were identified for deposit and entry scenarios for several active substances, including fenitrothion, mancozeb and propineb. Our findings suggest that direct contact with pesticide residues following their application on crop surfaces might constitute a vital exposure pathway more than airborne drift for residents living near Korean pear orchards. Our results underscore the need to establish resident exposure scenarios and risk assessment criteria that reflect Korean environmental and agricultural conditions. It is also pivotal to obtain country-specific data on key exposure determinants to support the development of a resident pesticide risk assessment framework.

Key words: Dermal absorption criteria, Pesticide exposure, Pear orchards, Residents, Risk assessment

서론

농약은 병해충으로 인한 농작물의 피해를 줄이고 잡초 방제를 통해 작물의 생육 환경을 개선하여 농작물의 품질을 향상시키기 위한 중요한 도구이다. 그러나 농약은 골수종, 전립선암 등 각종 암과 기타 만성질환의 원인이 되기도 하며, 독성학적 측면에서 환경과 인체에 위해를 가할 수 있는

잠재적 위험물질이다(Weller et al., 2014). 이에 따라 농약 관리 당국에서는 농약을 안전하게 사용·관리하기 위해 다양한 제도와 위해성평가 체계를 지속적으로 정비·운영하고 있다. 국내에서는 소비자의 농산물 섭취에 대한 농약노출 안전성 강화를 위하여 농약 허용물질목록관리제도(Positive list system, PLS)를 2019년부터 전면 확대 시행하고 있다. 이 제도는 농산물에 잔류할 수 있는 농약에 대하여 허용 기준을 설정하고, 목록에 포함되지 않은 농약에 대해서는 잔류허용 기준(Maximum residue limit, MRL)을 일률기준인 0.01 mg/kg으로 적용하는 방식이다(Song et al., 2021). 또한, 2009년

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

부터 농약의 비식이섭취(non-dietry) 노출에 대한 안전성을 강화하기 위해 농약살포자(Operator) 위해성평가 제도를 도입하여, 위해성이 높은 농약에 대해서는 등록심사 단계에서 등록을 제한하고 있다(RDA, 2023). 해외에서도 농약살포자, 농작업자, 거주자 그리고 주변인에 대한 비식이섭취 노출을 성인과 유아 등 노출 대상별로 평가하는 제도를 운영하고 있으며(EFSA, 2022; US EPA, 2025), 특히, 유럽식품안전청(European Food Safety Authority, EFSA)에서는 2014년과 2022년에 농약살포자, 농작업자, 거주자, 주변인에 대한 농약 노출 위해성평가 가이드라인을 발표하여 비식이섭취 농약노출에 따른 안전성을 지속적으로 강화해 나가고 있다(EFSA, 2014; EFSA, 2022).

농업 현장에서 사용되는 농약은 유효성분(Active ingredient, AI)을 고농도로 제형화한 제품으로서, 약효를 균일하게 나타내기 위하여 대부분 물에 희석한 후 고압 살포기를 이용하여 미세 입자형태로 살포된다. 그러나 살포된 농약의 약 50% 이상은 목표구역을 벗어나 비산될 가능성이 있으며, 실제 작물체에 도달하는 농약의 양은 전체 살포량의 약 2~5%에 불과한 것으로 보고된 바 있다(McCartor and Becker, 2010). 비산된 농약은 작물이나 토양에 침적되거나, 공기중에 부유하여 동물, 식물 및 수역에 위험을 초래할 수 있으며(Jensen and Olesen, 2014), 농약 살포 지역 인근 거주자에 대하여 직·간접적인 노출 가능성이 보고되고 있다. Cunha et al.(2012)은 농약살포 지점으로부터 50 m 떨어진 지점에도 농약 비산에 따른 농약노출 및 위해 가능성을 제시하였다. 또한 일부 역학 조사에서는 농경지 인접 거주자의 선천기형 및 암 발생과 농약노출 간의 연관 가능성을 제시하고 있다(Carles et al., 2017; Rull et al., 2006). 이는 농약을 직접 취급하는 인원뿐만 아니라 농약을 취급하지 않는 농약 살포 지역 인근 거주자에 대해서도 농약노출 위해성평가가 필요하다는 것을 시사한다.

피부흡수(dermal absorption)는 농약을 포함한 화학물질이 피부를 통과하여 전신순환계(systemic circulation)에 도달하는 과정을 의미하며(OECD, 2004), 농약노출 위해성평가에서 인체 전신노출을 추정하는 데 핵심적인 매개 변수로 사용된다(Sullivan et al, 2017). 즉, 피부흡수율(dermal absorption)은 체외에 존재하는 농약 중 어느 정도가 실제로 체내로 유입되어 전신독성을 유발할 수 있는 실질 유효 용량(systemically available dose)으로 전환되는지를 나타내는 지표이다. 따라서 동일한 체외 노출량이라 하더라도 적용되는 피부흡수율에 따라 전신노출량 및 위해성은 크게 달라질 수 있다. 이러한 이유로 각국의 농약 관리 당국에서는 자국의 평가체계에 따라 피부흡수율의 기본값(default)과 적용 기준을 마련하고 있으며, 일반적으로 *in vitro* 피부흡수 자료가 존재하는 경우 이를 우선적으로 사용하고, 자료가 없는 경우에는 피부흡수율 기본값을 적용하도록 규정하고 있다.

국내 과수 재배면적은 2023년 농업면적통계 조사에 따르면 약 15만ha에 달하며, 과수에 농약살포는 연간 평균 11회(배 15.2회, 사과 12.4회, 포도 9.2회, 복숭아, 감귤 9회) 이상이라고 보고되었다(Lim et al., 2003). 또한, 과수농가의 65%는 농약살포 시 Speed sprayer(SS)를 사용하였다(Hong et al., 2012). 이는 분무기의 압력으로 노출에서 분출된 약제를 송풍기의 강력한 바람으로 다시 한번 잘게 쪼개어 안개처럼 분사하는 방법으로 일반 동력분무기에 비해 농약 비산에 의한 농약 노출량이 많을 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구는 국내 과수 재배 지역을 대상으로, 주로 사용되는 농약에 대한 거주자 노출 및 위해성을 평가하고자 수행되었다. 이를 위하여 과수원 인근 거주자를 대상으로 노출 시나리오를 설정하고, 농약 노출량 산정 모델을 활용하여 농약 노출량을 산정하여 위해성을 평가하였다. 특히, 피부흡수율 적용이 전신 노출량 산정과 위해성 판단에 미치는 영향을 고려하여, 국내 피부흡수율 기본값과 유럽(EFSA)에서 제시하는 피부흡수율 기준 그리고 국외의 실제 피부흡수율 평가결과를 적용하여 위해성평가를 수행하였으며, 최종적으로 이를 통해 국내 거주자 위해성평가 체계를 고찰하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

농약 품목 선정

과수 주산지 거주자에 대한 위해성평가는 과수 중 농약 살포 횟수가 가장 많은 배에 등록된 품목 중 18개 품목을 대상으로 하였다(Table 1). 이 중 17개 품목은 농약연보의 2021년 통계 기준 출하 금액 6억 이상의 품목이며, 페니트 로티온은 농가에서 많이 사용한다고 알려진 품목이다(Park et al., 2024). 거주자 위해성평가 기준인 농작업자노출허용량(Acceptable Operator Exposure Level; AOEL)은 농촌진흥청 고시[별표4]를 참고하였으며, 살포물량은 2,500 L/ha로 설정하였다. 희석배수는 농약안전정보시스템에 입력된 기준으로 설정하였으며, 희석배수가 다양한 경우 높은 농도를 적용하였다.

농약 노출량 산정 및 농약노출 시나리오

거주자 농약노출량은 유럽 Crop Life의 OpEx 모델(Occupational Pesticide Exposure Model, 2015 ver.)을 통해 산출하였다. OpEx 모델은 EFSA의 농약 살포자, 농작업자, 거주자, 주변인에 대한 농약 노출 위해성평가 가이드라인에 준하여 농약노출량을 산출하는 모델이며, Microsoft사의 Excel 기반 오프라인 계산기이다. OpEX 모델에서 거주자의 농약 노출 시나리오는 EFSA 가이드라인(EFSA, 2014; EFSA, 2022)에 준하여 비산, 증기, 잔류물, 진입, 동시 노출 경로로 설정되었다. 하지만, 본 연구에서는 동시 노출은 각각의 노출이 일시에 발생하는 것을 가정하는 것으로 현실적으로 발

Table 1. Generic information of targeted pesticides

No	Active ingredient	Formulation ¹⁾	Cont ²⁾ (%)	Dilution factor	Application rate (kg a.s./ha)	AOEL ³⁾ (mg/kg bw/day)
1	Benomyl	WP	50	1500	0.83	0.017
2	Buprofezin	SC	20	1000	0.50	0.04
	Imidacloprid		3	1000	0.08	0.08
3	Buprofezin	SC	20	2000	0.25	0.04
	Thiacloprid		5	2000	0.07	0.02
4	Buprofezin	SC	20	1000	0.50	0.04
	Thiamethoxam		3.3	1000	0.09	0.082
5	Captan	WP	50	500	2.50	0.1
6	Cypermethrin	EC	5	500	0.13	0.063
7	Cyprodinil	WG	50	2000	0.63	0.031
8	Cyprodinil	EW	24.14	2000	0.31	0.031
	Difenoconazole		8.38	2000	0.11	0.16
9	Dinotefuran	WG	20	2000	0.25	0.22
10	Etofenprox	SE	8	1000	0.20	0.06
	Methoxyfenozide		3.2	1000	0.08	0.11
11	Fenitrothion	WP	40	800	1.25	0.013
12	Flutriafol	SC	20	2000	0.25	0.05
13	Mancozeb	WP	75	500	3.75	0.035
14	Propineb	WP	70	500	3.50	0.046
15	Pyrimethanil	WP	30	1000	0.75	0.12
16	Spirotetramat	SC	22	2000	0.28	0.05
17	Thiophanate-methyl	WP	70	1000	1.75	0.08
18	Triflumizole	WP	30	2000	0.38	0.041

¹⁾Wettable powder, Suspension concentrate, Emulsifiable concentrate, Water dispersible granule, Emulsion in water, Suspo-emulsion

²⁾Content

³⁾Acceptable Operator Exposure Level

Table 2. Pesticide exposure scenarios and default values

Pathway	Category	Default values ¹⁾
Spray	Adult	DE:0.47, IE:0.001, P:18
	Children	DE:0.33, IE:0.00022, P:18
Vapour	Adult	VC:0.001, IR:0.23, IA:100
	Children	
Deposit	Adult	D:23.96, TTR:5, TC: 7300, T:2
	Adult	D:23.96, TTR: 5, TC:2600, T:2
	Children	D:23.96, TTR:5, SE:50, SR:20, Freq:9.5, T:2
	Children	D:23.96, DRP:20, I:25
Entry	Adult	DFR:3, TC:7500, T:0.25
	Children	DFR:3, TC:2250, T:0.25

¹⁾DE: Dermal exposure (mL), IE: Inhalation exposure (mL), P: Protection rate (%), VC: Vapour concentration (mg/m³), IR: Inhalation rate (m³/day/kg), IA: Inhalation absorption (%) D: Drift percentage on surface (%), TTR: Turf transferable residue (%), TC: Transfer Coefficient (cm²/h), T: Exposure duration(h), SE: saliva extraction factor (%), SR: Surface area of hands (cm²), Freq: Frequency of hand to mouth activity (event/h), DRP: Dislodgeable residue percentage (%), I: Ingestion rate for mouthing of grass per day (cm³), DFR: Dislodgeable foliar residue (µg/cm²)

생하기에는 불가능한 시나리오라고 판단하였다. 따라서, 동시노출 시나리오를 제외한 비산, 증기, 잔류물, 진입 노출 경로에 대해 거주자 위해성평가를 수행하였다. 본 연구에서 적용한 거주자의 농약노출 시나리오 별 계산식은 다음과 같았으며, 각 지표의 기본값은 Table 2에 제시하였다.

- 비산(Spray) 노출 = [(피부노출량(mL) × 농약흡수율(%) × 의복보호율(%) + 호흡노출량(mL)) × 유효성분 함량(g/L)]
- 증기(Vapour) 노출 = [증기노출량 (mg/m³) × 호흡률 (m³/day/kg) × 흡수율(%)]
- 잔류물(Deposit) 노출
 - 성인 = [유효성분 살포량(kg/ha) × 비산농약 침적율 (Drift percentage on surface, DP, %) × 잔디 전이 잔류물(Turf transferable residue, TTR, %) × 전이계수 (Transfer coefficient, TC, cm²/h) × 노출시간(h) × 피부흡수율(%)]
 - 유아 = [유효성분 살포량(kg/ha) × DP(%) × TTR(%) × TC(cm²/h) × 노출시간(h) × 피부흡수율(%) + [유효성분 살포량(kg/ha) × DP(%) × TTR(%) × 추출계수(saliva extraction factor, %) × 손표면적(cm²) × 손-입 빈도 × 노출시간(h) × 흡수율(%)] + [유효성분 살포량(kg/ha) × DP(%) × 사물 전이 잔류물(Dislodgeable residue percentage, DRP, %) × 섭취율 (cm²) × 흡수율(%)]
- 진입(Entry) 노출 = [(유효성분 살포량(kg/ha) × 초기엽면잔류량(μg/cm²) × TC(cm²/h) × 노출시간(h)) / 1000 × 피부흡수율(%)]

피부흡수율 설정 및 위해성평가

농약의 피부흡수율은 농축액(Concentration)과 희석액(In-use dilution)을 구분하여 적용되고 있다. EFSA의 피부흡수율 규정은 농약원제의 이화학적 특성에 따라 피부흡수율 기본값을 구분한다. 농약원제의 n-옥탄올/물 분배계수(Log P)가 < -1 또는 > 4 그리고 분자량이 500 이상일 경우는 피부흡수율 10%를 적용하고 있다. 이외의 경우는 유효성분 함량이 > 5% 일때는 25%, < 5% 일때는 75%의 피부흡수율을 적용하고 있다(EFSA, 2017a). 본 연구에서는 EFSA 규정을 적용할 경우, 희석액의 피부흡수율은 농약이 희석되었을 때 존재하는 유효성분의 함량으로 판단하여 모두 75% 흡수율(유효성분 함량 < 5% 기준)을 적용하였다. 농축액의 피부흡수율은 이화학적 특성에 따라 적용하였다. 국내의 피부흡수율 규정은 농촌진흥청 고시 [별표 12]에 따라 살포농약의 조제시 및 살포시로 구분되어 일률적으로 10%를 적용되고 있다(RDA, 2023). 본 연구에서는 국내의 기준을 적용할 경우 조제시 농약의 피부흡수율은 농축액의 피부흡수율, 살포시 농약의 피부흡수율은 희석액의 피부흡수율로 판단하여 농축액과 희석액의 피부흡수율을 모두 10%로 적용하였다. 실제 피부흡수율 적용은 미국 환경보호청(United states Enviromental Protection

Agency, U.S EPA) 등 국외 농약등록 당국에서 발행하는 농약노출 위해성평가 보고서상의 제시된 피부흡수율 값을 적용하였다.

거주자에 대한 위해성평가는 농약노출량과 AOEL의 비를 나타내는 비급성독성 기준값(Reference value non acutely toxic active substance, RVNAS)으로 나타내었다. 즉, RVNAS가 100 이상일 경우 노출량이 AOEL을 초과하기 때문에 위해성이 높고, 100 보다 낮으면 위해성이 낮은 것으로 평가하였다.

결과 및 고찰

피부흡수율 적용기준에 따른 거주자 위해성평가

EFSA 적용기준을 근거로 이화학적 특성과 유효성분 함량에 따라 구분한 피부흡수율은 Table 3에 제시하였다. 총 18품목 23성분 중 농축액에 대한 피부흡수율 25%를 적용한 성분은 18성분이었으며, 75%를 적용한 성분은 이미다클로프리트, 티아클로프리트, 티아메톡삼, 사이퍼메트린, 메톡시페노자이드 5성분으로, 모두 유효성분 함량이 5% 미만인 제형에 해당하였다. 이와 같이 피부흡수율을 적용한 거주자 위해성평가 결과는 Table 4에 나타내었다. 총 18품목 중 뷰프로페진, 이미다클로프리트 액상수화제, 사이퍼메트린 유제, 디노테푸란 액상수화제, 에토펜프록스, 메톡시페노자이드 유현탁제, 플루트리아폴 액상수화제, 피리메탈린 수화제, 스피노테트라맷 액상수화제, 플루트리아폴 수화제 등 8품목은 모든 노출경로에서 성인과 유아 모두 위해성이 낮은 것으로 평가되었다. 반면, 10품목 10성분에서는 특정 노출경로에서 위해성이 확인되었다. 만코제브 수화제의 경우 유아에 대한 진입 노출 시나리오에서 RVNAS 값이 1356.1로 평가되어 가장 높은 위해성을 보였으며, 성인과 유아에 대해 잔류물 노출과 진입 노출 시나리오에서 위해성이 확인되었다. 베노밀 수화제, 페니트로티온 수화제, 프로피네브 수화제 역시 성인과 유아 모두에서 잔류물 노출과 진입 노출 시나리오에서 위해성이 높았다. 캡탄 수화제, 사이프로디닐 입상수화제, 티오파네이트메틸 수화제는 유아에 대해서는 잔류물 노출과 진입 노출에서 위해성이 확인되었으며, 성인의 경우 진입 노출 시나리오에서만 RVNAS 100을 초과하여 위해성이 확인되었다. 또한, 뷰프로페진, 이미다클로프리트 액상수화제와 뷰프로페진, 티아메톡삼 액상수화제 중 뷰프로페진, 그리고 사이프로디닐, 디페노코나졸 유타제 중 사이프로디닐은 성인에서는 위해성이 낮았으나, 유아의 진입 노출 시나리오에서 RVNAS 값이 100을 초과하여 위해성이 높았다.

국내 피부흡수율 기준을 적용한 거주자 위해성평가 결과는 Table 5에 제시하였다. 국내 기준(기본값 10%)을 적용했을 때 총 18품목 중 15품목은 성인과 유아에서 RVNAS 값이 100 이하로 나타나 위해성이 없는 것으로 평가되었다. 반면

Table 3. Dermal absorption of adapted by EFSA guidance and experiment data obtained pesticide registration evaluation reports

No.	Active ingredient	Formulation ¹⁾	M.W ²⁾	Log P	Dermal absorption(%)				
					EFSA guidance		Data values ³⁾		Reference
					Concentration	In-use dilution	Concentration	In-use dilution	
1	Benomyl	WP	290.3	1.4	25	75	0.1	3.5	US EPA(1999)
2	Buprofezin	SC	305.4	-0.1	25	75	40.0	40.0	EFSA(2010a)
	Imidacloprid		255.6	0.6	75	75	0.3	8.0	EFSA(2008)
3	Buprofezin	SC	305.4	-0.1	25	75	40.0	40.0	EFSA(2010a)
	Thiacloprid		252.7	1.3	75	75	0.2	14.0	EFSA(2019)
4	Buprofezin	SC	305.4	4.9	25	75	40.0	40.0	EFSA(2010a)
	Thiamethoxam		291.7	-0.1	75	75	2.9	2.9	US EPA(2017)
5	Captan	WP	300.6	2.6	25	75	0.8	12.0	EFSA(2020a)
6	Cypermethrin	EC	416.3	5.5	75	75	1.0	5.0	EFSA(2018)
7	Cyprodinil	WG	225.3	4	25	75	0.5	6.0	EFSA(2006a)
8	Cyprodinil	EW	225.3	4	25	75	0.5	6.0	EFSA(2006a)
	Difenoconazole		406.3	4.4	25	75	2.0	4.0	EFSA(2011)
9	Dinotefuran	WG	202.2	-0.6	25	75	1.71	1.71	Health canada (2019)
10	Etofenprox	SE	376.5	6.9	25	75	30.0	30.0	EFSA(2009b)
	Methoxyfenozide		368.5	3.7	75	75	0.5	8.0	EFSA(2017b)
11	Fenitrothion	WP	277.2	3.3	25	75	3.9	20.9	EFSA(2006b)
12	Flutriafol	SC	301.3	1.1	25	75	0.5	30.0	EFSA(2010b)
13	Mancozeb	WP	541	2.3	25	75	0.7	1.0	EFSA(2020b)
14	Propineb	WP	289.8	-0.26	25	75	0.1	0.7	EFSA(2016)
15	Pyrimethanil	WP	199.3	2.8	25	75	1.0	20.0	EFSA(2006c)
16	Spirotetramat	SC	373.5	2.5	25	75	0.5	10.0	EFSA(2013)
17	Thiophanate-methyl	WP	342.4	1.4	25	75	7.0	7.0	US EPA(2005)
18	Triflumizole	WP	345.8	4.8	25	75	4.0	11.0	EFSA(2009a)

¹⁾Wettable powder, Suspension concentrate, Emulsifiable concentrate, Water dispersible granule, Emulsion in water, Suspo-emulsion

²⁾Molecular weight

³⁾The dermal absorption values were extracted from pesticide registration evaluation reports including the references

페니트로티온 수화제, 만코제브 수화제, 프로피네브 수화제 3품목에서는 RVNAS 값이 100을 초과하여 거주자에 대한 위해성이 높았다. 페니트로티온 수화제의 경우 유아 진입 노출 시나리오에서 RVNAS 값이 162.3으로 평가되었으며, 프로피네브 수화제 역시 유아 진입 노출 시나리오에서 RVNAS 값이 128.4로 나타나 위해성이 확인되었다. 만코제브 수화제의 경우 성인과 유아 모두에서 위해성이 관찰되었다. 유아는 잔류물 노출과 진입 노출 시나리오에서 각각 RVNAS 104.0과 180.8로 평가되어 위해성이 높았고, 성인은 진입 노출 시나리오에서 RVNAS 값이 100.5로 나타났다.

본 연구에서는 피부흡수율 기준에 따라 거주자 위해성평가 결과가 크게 달라지는 것으로 나타났다. EFSA의 피부흡수율 기준을 적용한 경우 18품목 중 10품목에서 특정 노출경로에서 RVNAS가 100을 초과한 반면, 국내 피부흡수율 기준을 적용했을 때에는 페니트로티온 수화제, 만코제브 수화제, 프로

피네브 수화제 3품목에서만 위해성이 관찰되었다. 이러한 결과는 피부흡수율 산정체계와 기본값 설정이 등록신청 농약의 위해성평가 결과를 좌우하는 핵심 변수임을 시사한다. 유럽의 피부흡수율 적용 가이드라인에 따르면 유효성분 함량이 5%를 초과하는 농축액(concentrate)에 대해서는 피부흡수율 25%, 5% 이하인 희석액(in-use dilution)에 대해서는 75%를 적용할 것을 권고하고 있다(EFSA, 2017a). 이러한 접근은 농축액보다 희석액에서 상대적으로 높은 피부흡수율이 관찰된다는 시험 결과와, 유효성분 함량이 5% 미만인 저농도 제형에서 피부흡수율이 크게 증가하는 경향을 반영한 것으로 판단된다(Pieper et al., 2024). 반면 국내는 피부흡수율 자료가 부족한 현실을 고려하여 단일 기본값 10%를 적용하고 있다. 이는 EFSA가 제시하는 10-100% 범위의 하한에 해당하는 비교적 완화된 기준이며, 기본값 설정 차이가 실제 농약 노출량 산정과 위해성평가에 미치는 영향을 분석한 연구

Table 4. Risk assessment of pesticides exposure applying EFSA default value in dermal absorption

No	Active ingredient	Formulation ¹⁾	Content (%)	Infant RVNAS(%) ²⁾				Adult RVNAS(%) ²⁾			
				Spray	Vapour	Deposit	Entry	Spray	Vapour	Deposit	Entry
1	Benomyl	WP	50	39.4	6.3	245.1	618.0	9.5	1.4	106.8	343.3
2	Buprofezin	SC	20	10.1	2.7	62.8	158.2	2.5	0.6	27.4	87.9
	Imidacloprid		3	0.8	1.4	4.8	11.9	0.2	0.3	2.1	6.6
3	Buprofezin	SC	20	5.1	2.7	31.4	79.1	1.2	0.6	13.7	44.0
	Thiacloprid		5	2.6	5.4	15.7	39.6	0.6	1.2	6.9	22.0
4	Buprofezin	SC	20	10.1	2.7	62.8	158.2	2.5	0.6	27.4	87.9
	Thiamethoxam		3.3	0.9	1.3	5.1	12.8	0.2	0.3	2.2	7.1
5	Captan	WP	50	20.2	1.1	125.5	316.5	4.9	0.3	54.7	175.8
6	Cypermethrin	EC	5	1.6	1.7	10.0	25.2	0.4	0.4	4.4	14.0
7	Cyprodinil	WG	50	16.3	3.5	101.2	255.2	3.9	0.8	44.1	141.8
8	Cyprodinil	EW	24.14	7.9	3.5	48.89	123.2	1.9	0.8	21.3	68.5
	Difenoconazole		8.38	0.6	0.7	3.3	8.3	0.2	0.2	1.5	4.6
9	Dinotefuran	SC	20	1.0	0.5	5.7	14.4	0.3	0.1	2.5	8.0
10	Etofenprox	SE	8	2.7	1.8	16.8	42.2	0.7	0.4	7.3	23.5
	Methoxyfenozide		3.2	0.6	1.0	3.7	9.2	0.2	0.3	1.6	5.2
11	Fenitrothion	WP	40	77.5	8.3	482.7	1217.0	18.6	1.8	210.3	676.1
12	Flutriafol	SC	20	4.1	2.2	25.1	63.3	1.0	0.5	11.0	35.2
13	Mancozeb	WP	75	86.3	3.1	537.9	1356.1	20.7	0.7	234.3	753.4
14	Propineb	WP	70	61.3	2.4	382.0	963.0	14.7	0.5	166.4	535.0
15	Pyrimethanil	WP	30	5.1	0.9	31.4	79.1	1.2	0.2	13.7	44.0
16	Spirotetramat	SC	22	4.5	2.2	27.7	69.7	1.1	0.5	12.1	38.7
17	Thiophanate-methyl	WP	70	17.7	1.4	109.8	276.9	4.3	0.3	47.9	153.9
18	Triflumizole	WP	30	2.6	2.7	17.9	39.6	0.6	0.6	6.9	22.0

¹⁾Wettable powder, Suspension concentrate, Emulsifiable concentrate, Water dispersible granule, Emulsion in water, Suspo-emulsion
²⁾Reference value non acutely toxic active substance

들이 보고되고 있다. You et al. (2017)은 다양한 피부흡수율 기본값을 적용하여 농약살포자에 대한 위해성을 비교한 결과, 유럽 기본값을 적용할 경우 국내 기본값(10%)을 적용했을 때보다 위해성이 높음으로 분류되는 사례 수가 약 2.5 배 증가한다고 보고하였다. 이 결과는 EFSA 기준이 국내 현실에 비해 상당히 보수적일 수 있음을 시사하는 동시에, 단일 10% 기본값이 일부 물질에 대해서는 실제 노출을 과소평가할 수 있음을 보여준다. Kim et al. (2016)은 국내 주사용 농약 20종을 대상으로 EFSA 기본값(25%/75%), 국내 기본값(10%), 그리고 실제 피부흡수 시험값을 각각 적용하여 위해성을 비교한 결과, EFSA 기본값을 적용할 경우 실제 시험값 또는 국내 기본값을 적용했을 때보다 높은 위해성이 나타난다고 보고하였다. 이러한 국내·외 기준 차이를 고려할 때, 합리적인 거주자 위해성평가를 위해서는 국내 제형 특성과 유효성분 함량을 반영하여 제형 그룹별 기본값을 도출하고, 이에 따라 피부흡수율을 차등 적용하는 단계적 접근이 필요하다. 나아가 국내 농업 환경과 사용 실태를 반영한

한국형 피부흡수율 기본값 체계를 정립함으로써, 국제적 조화와 국내 현실 간 균형을 고려한 합리적인 거주자 위해성평가 체계를 구축할 필요가 있다.

실제 피부흡수율 적용에 따른 위해성평가

국의 평가보고서에서 제시된 실제 피부흡수율 값은 Table 3과 같으며, 품목 농축액(Concentration)의 피부흡수율은 0.1-40%, 희석액(In-use dilution)의 0.7-40% 범위로 조사되었다. 이 값을 적용하여 산정한 거주자 위해성평가 결과는 Table 6에 제시하였다. 그 결과, 총 18품목 중 페니트로티온 수화제를 제외한 17품목에서는 모든 노출경로에서 성인과 유아의 RVNAS 값이 100 이하로 산출되어 거주자에 대한 위해성은 없는 것으로 평가되었다. 반면 페니트로티온 수화제의 경우, 유아의 잔류물 노출경로에서 RVNAS 값이 158.6, 진입 노출경로에서 339.2로 산출되었으며, 성인의 진입 노출 시나리오에서도 RVNAS 값이 188.4로 평가되어 상대적으로 높은 위해성이 확인되었다. 우리나라에서는 2010년에 페니트

Table 5. Risk assessment of pesticides exposure applying domestic dermal absorption regulation values

No	Active ingredient	Formulation ¹⁾	Content (%)	Infant RVNAS(%) ²⁾				Adult RVNAS(%) ²⁾			
				Spray	Vapour	Deposit	Entry	Spray	Vapour	Deposit	Entry
1	Benomyl	WP	50	5.3	6.3	47.4	82.4	1.3	1.4	14.3	45.8
2	Buprofezin	SC	20	1.4	2.7	12.2	21.1	0.4	0.6	3.7	11.8
	Imidacloprid		3	0.1	1.4	1.0	1.6	0.1	0.3	0.3	0.9
3	Buprofezin	SC	20	0.7	2.7	6.1	10.6	0.2	0.6	1.9	5.9
	Thiacloprid		5	0.4	5.4	3.1	5.3	0.1	1.2	1.0	3.0
4	Buprofezin	SC	20	1.4	2.7	12.2	21.1	0.4	0.6	3.7	11.8
	Thiamethoxam		3.3	0.2	1.4	1.0	1.7	0.1	0.3	0.3	1.0
5	Captan	WP	50	2.7	1.1	24.3	42.2	0.7	0.3	7.3	23.5
6	Cypermethrin	EC	5	0.3	1.8	2.0	3.4	0.1	0.4	0.6	1.9
7	Cyprodinil	WG	50	2.2	3.5	19.6	34.1	0.6	0.8	5.9	18.9
8	Cyprodinil	EW	24.14	1.1	3.5	9.5	16.5	0.3	0.8	2.9	9.2
	Difenoconazole		8.38	0.1	0.7	0.7	1.1	0.1	0.2	0.2	0.7
9	Dinotefuran	SC	20	0.2	0.5	1.1	2.0	0.1	0.1	0.4	1.1
10	Etofenprox	SE	8	0.4	1.8	3.3	5.7	0.1	0.4	1.0	3.2
	Methoxyfenozide		3.2	0.1	1.0	0.8	1.3	0.1	0.3	0.3	0.7
11	Fenitrothion	WP	40	10.4	8.3	93.4	162.3	2.5	1.8	28.1	90.2
12	Flutriafol	SC	20	0.6	2.2	4.9	8.5	0.2	0.5	1.5	4.7
13	Mancozeb	WP	75	11.6	3.1	104.0	180.8	2.8	0.7	31.3	100.5
14	Propineb	WP	70	8.3	2.4	73.9	128.4	2.0	0.5	22.2	71.4
15	Pyrimethanil	WP	30	0.7	0.9	6.1	10.6	0.2	0.2	1.9	5.9
16	Spirotetramat	SC	22	0.6	2.2	5.4	9.3	0.2	0.5	1.6	5.2
17	Thiophanate-methyl	WP	70	2.4	1.4	21.3	37.0	0.6	0.3	6.4	20.6
18	Triflumizole	WP	30	1.1	2.7	9.1	15.9	0.3	0.6	2.8	8.8

¹⁾Wettable powder, Suspension concentrate, Emulsifiable concentrate, Water dispersible granule, Emulsion in water, Suspo-emulsion

²⁾Reference value non acutely toxic active substance

로티온에 대한 인축 및 환경 위해성 재평가가 실시되었고, 과학적 근거의 추가 검토 필요성이 제기됨에 따라 일시적인 사용 제한 조치가 이루어진 바 있다. 이후 농약살포자 노출량 측정시험과 조류·수생생물 독성시험 등 추가 자료를 확보하여 안전성을 재평가한 결과, 2015년에 제한 조치가 해제되었다. 이러한 점을 고려할 때, 본 연구에서 제시된 결과는 특정 농약의 사용 자체를 위협하다고 단정하기보다는, 보수적인 농약노출량 산정값을 적용했을 때에도 위해성이 높게 산정되는 품목에 대해서는 현행 관리체계 내에서 거주자에 대한 노출 저감 방안과 안전 지침을 마련할 필요가 있다.

국외의 피부흡수율 평가체계는 OECD 피부흡수시험 가이드라인(OECD TG 427, 428)을 기반으로 마련되었으나, 구체적인 적용 기준과 운용 방식은 국가별로 차이를 보인다. 유럽에서는 인체 *in vitro* 피부시험 결과를 핵심 자료로 활용하고, 필요할 경우 동물 *in vitro* 및 *in vivo* 자료를 보완적으로 사용하는 단계적(tiered) 평가체계를 운용하고 있다. 반면 미국 EPA는 인체 *in vitro*, 동물 *in vitro*, 동물 *in vivo* 시

험을 포함하는 triple pack 접근을 통해 총 피부흡수율을 산정하고 있다. 이러한 점은 동일한 시험지침을 적용하더라도, 각 국가의 정책적 판단과 사용 환경에 따라 피부흡수율 평가 방식이 달라질 수 있음을 시사한다. 따라서 우리나라에서도 피부흡수율 평가체계를 구축할 때 국내 농업환경과 농약 사용 실태를 충분히 반영한 평가 기준을 마련할 필요가 있다. 특히 우리나라의 농약 살포 방식은 다른 국가에 비해 희석배수가 높고 살포 물량이 많은 경향을 보인다. 이는 동일한 농약을 사용하더라도 실제 노출 양상과 노출 농도에 따라 피부흡수율이 달라질 가능성이 크다는 것을 의미한다. 따라서 한국형 거주자 위해성평가 체계를 확립을 위해서는 국내 재배 특성, 살포 관행, 사용 패턴을 체계적으로 반영한 피부흡수율 측정시험법과 관리기준을 단계적으로 확립해 나가는 노력이 필요하다.

농약 노출량 측정시험은 사람을 대상으로 수행되어야 하고 많은 시간과 비용이 소요되므로 현실적인 제약이 크다. 이에 따라 비식이섭취 위해성평가 초기 단계에서는 대표 노출 시

Table 6. Risk assessment of pesticides exposure applying dermal absorption values were extracted from pesticide registration evaluation reports

No	Active ingredient	Formulation ¹⁾	Content (%)	Infant RVNAS (%) ²⁾				Adult RVNAS (%) ²⁾			
				Spray	Vapour	Deposit	Entry	Spray	Vapour	Deposit	Entry
1	Benomyl	WP	50	1.9	6.3	27.7	28.9	0.5	1.4	5.0	16.1
2	Buprofezin	SC	20	5.4	2.7	32.9	84.4	1.3	0.6	14.6	46.9
	Imidacloprid		3	0.1	1.4	0.8	1.3	0.1	0.3	0.3	0.7
3	Buprofezin	SC	20	2.7	2.7	16.5	42.2	0.7	0.6	7.3	23.5
	Thiacloprid		5	0.5	5.4	3.9	7.4	0.2	1.2	1.3	4.1
4	Buprofezin	SC	20	5.4	2.7	32.9	84.4	1.3	0.6	14.6	46.9
	Thiamethoxam		3.3	0.1	1.3	0.6	0.5	0.1	0.3	0.1	0.3
5	Captan	WP	50	3.3	1.1	27.4	50.7	0.8	0.3	8.8	28.2
6	Cypermethrin	EC	5	0.2	1.7	1.4	1.7	0.1	0.4	0.3	1.0
7	Cyprodinil	WG	50	1.4	3.5	14.6	20.5	0.4	0.8	3.6	11.4
8	Cyprodinil	EW	24.14	0.7	3.5	7.1	9.9	0.2	0.8	1.7	5.5
	Difenoconazole		8.38	0.1	0.7	0.4	0.5	0.1	0.2	0.1	0.3
9	Dinotefuran	SC	20	0.4	0.5	2.6	5.8	0.1	0.1	1.0	3.2
10	Etofenprox	SE	8	1.1	1.8	6.6	16.9	0.3	0.4	3.0	9.4
	Methoxyfenozide		3.2	0.1	1.0	0.7	10.0	0.1	0.3	0.2	0.6
11	Fenitrothion	WP	40	21.7	8.3	158.6	339.2	5.2	1.8	58.6	188.4
12	Flutriafol	SC	20	1.7	2.2	11.1	25.4	0.4	0.5	4.4	14.1
13	Mancozeb	WP	75	1.3	3.1	25.3	18.1	0.3	0.7	3.2	10.1
14	Propineb	WP	70	0.7	2.4	19.2	9.0	0.2	0.5	1.6	5.0
15	Pyrimethanil	WP	30	1.4	0.9	10.0	21.1	0.4	0.2	3.7	11.8
16	Spirotetramat	SC	22	0.6	2.2	5.4	9.3	0.2	0.5	1.6	5.2
17	Thiophanate-methyl	WP	70	1.7	1.4	17.2	25.9	0.4	0.3	4.5	14.4
18	Triflumizole	WP	30	1.2	2.7	9.7	17.4	0.3	0.6	3.1	9.7

¹⁾Wettable powder, Suspension concentrate, Emulsifiable concentrate, Water dispersible granule, Emulsion in water, Suspo-emulsion

²⁾Reference value non acutely toxic active substance

나리오와 노출계수를 설정하고, 노출량 산정모델을 이용해 농약노출에 따른 위해성을 평가한다. 거주자에 대한 대표적인 농약 노출량 산정모델로는 영국의 BREAM/BREAM2 모델, 미국 EPA의 Residential SOPs 및 SHEDS-Residential/SHEDS-Multimedia 모델, 그리고 유럽의 OPEX 모델 등이 있다. BREAM/BREAM2 모델은 농업용 붐 스프레이어로 농약을 살포할 때 발생하는 비산농약을 입자 추적 모형으로 예측하고, 이를 거주자 피부 및 흡입 노출로 환산하는 확률론적 (probabilistic) 평가모델이다(Kennedy et al., 2012). 미국 EPA의 Residential SOPs는 비직업적 농약 사용을 대상으로 잔디·정원 및 실내 환경에서 거주자 노출평가를 표준화한 지침으로, 각 시나리오별 노출계수와 계산 절차를 제시하여 결정론적(deterministic) 평가에 활용된다. SHEDS-Residential 및 SHEDS-Multimedia 모델은 Residential SOPs에 제시된 노출계수와 시나리오를 바탕으로 활동 시간 및 양상 등 활동 특성과 결합하여 흡입, 피부, 손-입 경로에 대한 노출을 평가하는 모델이다(US EPA, homepage). 본 연구에서 활용한

유럽 OPEX 모델은 농약 살포에 따른 비산 및 증기노출, 잔류물 노출 그리고 진입 노출 등 다양한 시나리오를 하나의 평가체계 내에서 구분하여 각 노출경로별 노출량을 산정할 수 있도록 설계된 모델이다. 반면, BREAM/BREAM2는 비산 노출에 중점을 둔 모델로 잔류물 접촉 및 재진입 노출을 포괄적으로 반영하기에는 한계가 있다. Residential SOPs와 SHEDS 계열 모델은 주거지·정원·실내 환경 등 비직업적 사용 상황을 중심으로 구조화되어 있어 국내 과수 재배지 인근 거주자의 노출 양상을 판단하기에는 적합성이 떨어진다. 이러한 모델의 특성과 적용 범위를 종합적으로 고려할 때, 과수 주산지 인근 거주자의 노출 경로별 위해성을 평가하고자 한 본 연구에서는 OPEX 모델을 노출량 산정 도구로 사용하는 것이 가장 적절한 선택으로 판단된다.

농약노출 시나리오에 별 위해성평가

가장 보수적인 EFSA의 피부흡수율 값을 적용한 위해성 평가 결과를 바탕으로 농약 노출경로 별 위해성을 분석한

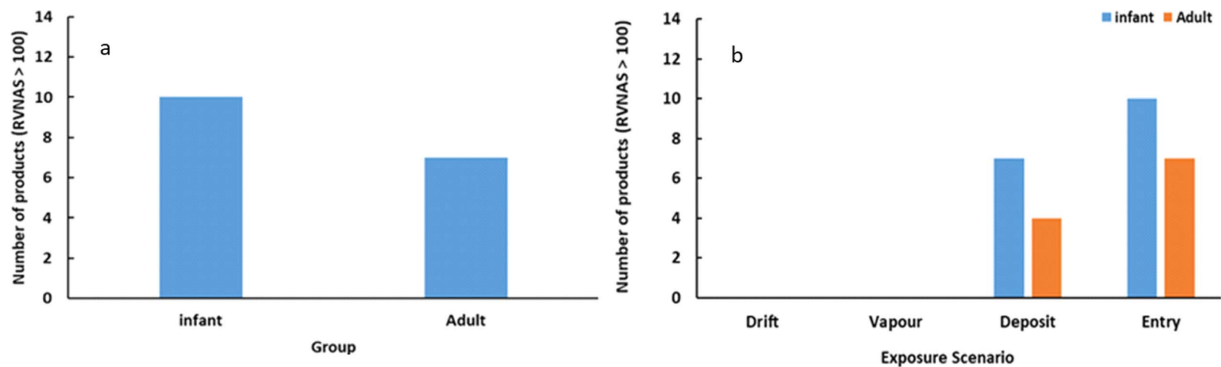


Fig. 1. Summary of resident risk assessment results for infant and adults by pesticide exposure scenario.

(a) Number of plant protection products classified as potential concern for infant and adults (N=18).

(b) Distribution of products classified as potential concern by exposure scenario (drift, vapour, deposit, entry) for infant (N=10) and adults (N=7).

결과는 그림 1에 제시하였다. RVNAS가 100을 초과한 농약은 유아에서 18품목 중 10품목(56%), 성인에서 7품목(39%)이었다(그림 1a). 위해성이 높았던 품목을 대상으로 노출 시나리오별로 살펴보면, 비산과 증기 노출에서는 유아와 성인 모두 RVNAS가 100 이하로 위해성이 낮았다. 반면 잔류물 및 진입 노출 시나리오에서는 두 집단 모두에서 높은 위해성이 나타났다(그림 1b). 잔류물 노출 시나리오에서는 유아의 경우 10품목 중 7품목(70%), 성인은 7품목 중 4품목(57%)에서 RVNAS가 100을 초과하였다. 진입 노출 시나리오에서는 위해성이 높은 모든 품목(100%)에서 유아와 성인 모두 RVNAS를 초과하였다. 이러한 결과는 국내 과수 주산지 거주자의 경우 비산 및 증기 노출로 인한 위해 우려는 낮지만, 작물 표면에 잔류한 농약과 직접적인 접촉으로 발생하는 진입 및 잔류물 노출로 인해 거주자의 위해성이 나타날 가능성이 높다는 것을 시사한다.

잔류물 노출과 진입 노출은 농약 살포지역에 방문한 거주자가 토양이나 작물 잎에 잔존한 농약과의 물리적 접촉을 통해 피부로 농약이 노출되는 경로이다. 해당 시나리오의 농약 노출량을 결정하는 주요요인은 초기엽면잔류량(dislodgeable foliar residue, DFR), 전이계수(transfer coefficient, TC)이다. DFR은 농약 살포 후 작물 표면에 부착된 농약 중 피부로 이동 가능한 잔류량을 의미하며, 이는 농작업자 및 거주자의 피부 노출량 산정에 핵심적인 지표로 사용된다(Duporté et al., 2024). 따라서 국외에서는 DFR 설정과 관련한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 이를 바탕으로 EFSA에서는 농작업자, 거주자 등의 위해성평가에 적용될 DFR 기초값을 $3 \mu\text{g a.i./cm}^2$ 제안하였다. 하지만, 국내 연구와 EFSA의 DFR 초기값과는 현저한 차이를 보였다. Choi et al. (2013)은 하우스 오이에서 메티다치온의 DFR 값을 $0.225\text{--}0.012 \mu\text{g/cm}^2$ 로 보고하였다. 또한 상기연구의 결과를 바탕으로 국내 등록된 품목 82종의 DFR값을 예측하였으며, 이들의 DFR 값은 $0.005\text{--}1.5 \mu\text{g/cm}^2$ 수준이라고 보고하였다(Choi, 2023). 이러

한 차이는 EFSA의 기본값이 최악의 시나리오를 고려한 보수적인 접근을 기반으로 설정되었기 때문인 것으로 판단되며, 국내 거주자 위해성평가를 위해서는 국내 환경에 적합한 다양한 DFR 값 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

TC는 작물 표면에 부착된 농약이 피부로 전이되는 정도를 나타낸 지표로, 작업활동 및 농업 환경에 따라 큰 차이를 보인다. 이에 따라, 미국 EPA와 EFSA에서는 작물의 종류, 크기, 밀도, 활동에 따라 TC값을 구분하여 설정하고 있다. 미국 EPA는 농업 재진입 노출 테스크포스(Agricultural reentry exposure task force, ARTF)의 연구결과를 바탕으로 노출 과학 자문 위원회(Science advisory council for exposure, Expo SAC)의 정책 3에서 작물의 크기, 밀식상태, 농작업 활동 등을 고려한 TC 값을 적용하고 있다(US EPA, 2021). EFSA는 ARTF의 결과를 통계학적 분석하여 작물과 활동에 따라 75분위, 95분위 그리고 최대 TC값을 제시하고 있다(EFSA, 2022). 반면, 국내에서는 TC에 관한 연구는 전무한 실정으로 이에 따른 기준이 마련되어 있지 않았다. 따라서 국내 거주자에 대한 농약노출 평가를 위해서는 주요 작물과 작업 활동을 대상으로 한 TC 값을 산출하고, 이를 바탕으로 국내 환경에 적합한 농약 노출평가 모델을 구축하는 연구가 필요하다.

거주자의 농약 노출 위해성평가는 국가별 농업환경과 규정에 따라 차이를 보이며, 미국과 유럽에서는 각각의 가이드라인과 표준 지침에 따라 체계적인 평가가 이루어지고 있다. 미국 EPA는 거주자 농약 노출 위해성평가 표준지침서(Residential standard operating procedures)에 따라 거주자 노출 평가를 수행하며, 평가 범위는 주거 환경(집, 아파트, 이동식 주택 등)뿐만 아니라 정원, 잔디, 공원, 학교, 어린이집 등 어린이 및 일반인이 생활하는 공간까지 포함된다(US EPA, 2012). 유럽에서는 EFSA의 가이드라인을 기반으로 거주자 농약이 살포된 인근에 거주하고 있는 사람으로 정의하며, 농약 살포로 인해 발생할 수 있는 비산, 증기, 잔류물 그리고 진입노출과 같은 특정 시나리오에 따라 위해성평가가 이루어

어진다. 반면, 우리나라에서는 거주자의 농약 노출에 대한 위해성평가 체계가 아직 확립되지 않았으며, 관련 연구는 전무한 실정이다. 현재 국내에서 수행되는 농약노출 평가 연구는 주로 농약살포자에 초점이 맞춰져 있으며, 거주자 및 일반인에 대한 노출 시나리오와 위해성평가 체계는 구축되지 않는 상태이다. 따라서, 거주자의 농약노출에 대한 체계적인 연구가 필요하며, 국내 환경에 적합한 평가 기준과 방법을 설정해야 한다. 특히, 우리나라의 주거환경을 고려할 때 단순히 농경지에 인접한 거주자뿐만 아니라 도시림, 생활림, 도시공원 등의 생활권 수목보호를 위한 농약 사용으로 인해 발생할 수 있는 거주자 노출평가도 포함될 필요가 있다. 현재 도시 및 생활권 내 수목 보호 목적으로 농약이 지속적으로 사용되고 있지만, 이에 따른 거주자의 노출 가능성과 위해성평가는 이루어지지 않고 있다. 따라서 수목보호 목적으로 사용되는 농약과 농가에서 사용되는 농약을 구분하여 각각의 노출 특성을 반영한 별도의 노출 시나리오를 개발하고, 이를 바탕으로 차별화된 위해성평가 체계를 마련할 필요가 있다고 사료된다.

본 연구에서는 국내 배 주산지에서 사용되는 주요 농약을 대상으로 거주자에 대해 농약노출량을 산정모델을 통해 노출량을 산정하고, 이를 기반으로 거주자의 농약노출 위해성을 평가하였다. 평가결과, 비산과 증기 노출에 인한 위해성은 낮은 반면, 작물 표면에 잔류한 농약과의 접촉으로 인해 발생하는 잔류물 노출 및 진입 노출에서 위해성이 관찰되었다. 이는 국내 과수 주산지 거주자에 대한 농약 노출 위해성평가에서 농약의 공기 중 비산 노출 보다는 살포 후 잔류물과의 직접적인 접촉이 주요한 위해성 요인이 될 가능성이 높음을 시사한다. 따라서 거주자의 농약노출에 따른 위해성 경감을 위해서는 우선적으로 농약살포 지역의 안전진입기한 설정 등과 안전관리 지침의 개발 연구가 필요하다.

현재 미국과 유럽은 거주자 위해성평가를 위한 지침과 평가모델을 마련하고 있으나, 국내에서는 이에 대한 체계와 연구가 미비한 상황이다. 따라서, 국내 거주자의 농약 노출 평가 체계를 구축하기 위해서 국내 주거 환경 특성을 반영하여 농경지 인접 지역과 일반 생활권 거주자의 범위를 설정하고 이에 따른 농약 노출 시나리오를 수립할 필요가 있다. 또한 각각의 농약 노출 경로에 따른 농약 노출량 산정에 영향을 미치는 요인(DFR, TC, 피부흡수율 등)에 대한 기본값을 도출하고 이를 반영한 위해성평가 모델을 개발하여 거주자 농약노출량 산정 기준을 확립하고 실효성 있는 위해성평가 체계 구축이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 '농약 노출 대상에 따른 농약 노출량 산정모델 개

발(PJ01598603)'에서 지원받아 수행되었습니다.

Author Information and Contributions

Byung Joon Kim, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Research, <https://orcid.org/0000-0002-5300-4246>, Writing-original draft preparation and Conducted the experiments.

Young Joo Lim, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Deputy director, <https://orcid.org/0009-0005-5942-702X>, Conceptualization.

Soo-Jin Park, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2522-3185>, Data analysis and Review.

Youmi Jo, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Senior Researcher, <https://orcid.org/0009-0008-6733-7181>, Data analysis and Review.

Ji-Young Shin, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3177-161X>, Data analysis and Review.

So-Hye Hong, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9958-5552>, Visualization and data review.

Si Young Yang, Toxicity and Risk assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Senior Researcher, <https://orcid.org/0009-0000-7308-969X>, Project administration.

저자 이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cites

- Carles C, Bouvier G, Esquirol Y, Piel C, Migault L, et al., 2017. Residential proximity to agricultural land and risk of brain tumor in the general population. *Environ. Res.* 159:321-330.
- Choi H, 2023. Transfer factor calculated using dermal exposure and dislodgeable foliar residue and exposure assessment for reentry worker after pesticide application in cucumber field. *Appl Biol Chem.* 66:1-9.
- Choi H, Byong JY, Kim JH, 2013. Determination of reentry

- interval for cucumber harvesters in greenhouse after application of insecticide methidathion. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 56:465-467.
- Cunha JP, Chueca P, Garcerá C, Moltó E, 2012. Risk assessment of pesticide spray drift from citrus applications with air-blast sprayers in Spain. *Crop Protection.* 42:116-123.
- Duporté G, Barron E, Bureau M, Le Menach K, Baldi I, et al., 2024. Dislodgeable foliar residue measurements and assessment of dermal exposure to captan for workers in apple orchards. *ES&T or Environ. Sci. Technol.* 58(31):13605-13612.
- EFSA, 2006a. Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance cyprodinil. *EFSA J.* 4(1):51r.
- EFSA, 2006b. Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance fenitrothion. *EFSA J.* 4(2):59r.
- EFSA, 2006c. Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance pyrimethanil. *EFSA J.* 4(2):61r.
- EFSA, 2008. Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance Imidacloprid. *EFSA J.* 6(7):148r.
- EFSA, 2009a. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance triflumizole. *EFSA J.* 7(12):1415.
- EFSA, 2009b. Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance etofenprox. *EFSA J.* 7(4):213r.
- EFSA, 2010a. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance buprofezin. *EFSA J.* 8(6):1624.
- EFSA, 2010b. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance flutriafol. *EFSA J.* 8(10):1868.
- EFSA, 2011. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance difenoconazole. *EFSA J.* 9(1):1967
- EFSA, 2013. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance spirotetramat. *EFSA J.* 11(6):3243.
- EFSA, 2014. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment for plant protection products. *EFSA J.* 12.10: 3874.
- EFSA, 2016. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance propineb. *EFSA J.* 14(11):e04605.
- EFSA, 2017a. Guidance on dermal absorption. *EFSA J.* 15(6): e04873.
- EFSA, 2017b. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance methoxifenozone. *EFSA J.* 15(9):e04978.
- EFSA, 2018. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance cypermethrin. *EFSA J.* 16(8):e05402.
- EFSA, 2019. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance thiacloprid. *EFSA J.* 17(3):e05595.
- EFSA, 2020a. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance captan. *EFSA J.* 18(9):e06230.
- EFSA, 2020b. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance mancozeb. *EFSA J.* 18(12):e05755.
- EFSA, 2022. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment of plant protection products. *EFSA J.* 20(1):e09032.
- Health Canada, 2019. Dinotefuran and Related End-Use Products. Pest Management Regulatory Agency, Health Canada, Ontario.
- Hong S, Lee JB, Park YK, Shin JS, Im GJ, et al., 2007. The proposal for pesticide exposure estimation of Korean orchard farmer. *Korean J. Pestic. Sci.* 11(4): 281-288. (In Korean)
- Jensen PK, Olesen MH, 2014. Spray mass balance in pesticide application: a review. *Crop Protection.* 61:23-31.
- Kennedy MC, Butler Ellis MC, Miller P, 2012. BREAM: A probabilistic Bystander and Resident Exposure Assessment Model of spray drift from an agricultural boom sprayer. *Comput. Electron. Agric.* 88:63-71.
- Kim SH, Lee CH, Kim KH, Jeong SH, 2016. Comparative Estimation of Exposure Level and Health Risk Assessment of Highly Produced Pesticides to Agriculture Operators by Using Default Dermal Absorption Rate or Actual Measurement Values. *Biomed. Sci. Lett.* 22(4):199-206
- Lim YB, Kim KS, Kyung KS, Kim NS, Ha HY, et al., 2003. Survey of pesticide usage on fruits in Korea. *Korean J. Pestic. Sci.* 7(4):258-263. (In Korean)
- McCortor A and Becker D, 2010. Blacksmith institute's world's worst pollution problems report. NY, USA.
- Park HG, Suh SI, Lee BS, Lee HS, Ki SJ, 2024. Performance comparison of basic pesticide residue prediction models in domestic agricultural environments. *J Korean Soc Environ Eng.* 46(12):806-815. (In Korean)
- Pieper C, Engel N, Wend K, Kneuer C, Martin S. In vitro human dermal absorption studies on pesticides in complex mixtures: Investigation of guidance criteria and possible impact parameters. *Toxics.* 12:248.
- Rull RP, Ritz B, Shaw GM. 2006. Neural Tube Defects and Maternal Residential Proximity to Agricultural Pesticide Applications. *Am. J. Epidemiol.* 163(8):743-753.
- Rural Development Administration(RDA), 2023. Criteria for Registration of Pesticide and Active substances, Legislation and Notification Directive for pesticide regulation, Wanju, Korea. (In Korean)
- Song SH, Kim KY, Kim YS, Ryu KS, Kang MS, et al., 2021. Comparative Analysis of Pesticide Residues in Agricultural Products in Circulation in Gyeonggi-do Before and After Positive List System Enforcement. *J. Food Hyg. Saf.* 36(3): 239-247. (In Korean)
- Sullivan KM, Aggarwal M, Akins JM, Fabian E, Heylings JR, et al., 2017. Dermal absorption for pesticide health risk assessment: Harmonization of study design and data reporting for North American Regulatory submissions. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 90:197-205.

- US EPA, 1999. BENOMYL AND CARBENDAZIM-RE-EVALUATION-Report of the Hazard Identification Assessment Review Committee. H.E. Division US EPA. Washington DC.
- US EPA, 2005. Reregistration Eligibility Decision Thiophanate-Methyl. Special Review and Reregistration Division, US EPA, Washington DC.
- US EPA, 2012. Standard Operating Procedures for Residential Pesticide Exposure Assessment. H.E. Division, US EPA. Washington DC. p.582
- US EPA, 2017. Thiamethoxam. Draft Human Health Risk Assessment for Registration Review. H.E Division, US EPA. Washington DC.
- US EPA, 2021. Science Advisory Council for Exposure (ExpoSAC) Policy 3 Revised March 2021. <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/science-advisory-council-exposure-exposac-policy-3> (Accessed Oct. 13. 2025)
- US EPA, 2025. Guidance for Human Health Risk Assessments for pesticide. <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/guidance-human-health-risk-assessments-pesticides> (Accessed Oct. 13. 2025)
- US EPA, Stochastic Human Exposure and Dose Simulation (SHEDS). https://www.epa.gov/chemical-research/stochastic-human-exposure-and-dose-simulation-sheds?utm_source (Accessed Nov. 28. 2025)
- Weller SC, Culbreath AK, Gianessi L, Godfrey LD, 2014. The Contributions of Pesticides to Pest Management in Meeting the Global Need for Food Production by 2050. CAST. Issue Paper 55:1-28.
- You AS, Lee N, Park S, Jo Y, Oh JA, et al., 2017. Estimation of Exposure Dose and Occupational Risk Assessment with Various Dermal Absorption Default in Spraying of Plant Protection Products. Korean J. Pestic. Sci. 21(4):434-452. (In Korean)

배 과수원 농약 노출에 따른 인근 거주자 노출 특성 및 농약 위해성평가 체계 구축 방안

김병준 · 임영주 · 박수진 · 조유미 · 신지영 · 홍소혜 · 양시영*

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 독성위해평가과

요 약 본 연구에서는 우리나라 배 재배 지역에서 사용되는 주요 농약을 대상으로 거주자에 대한 농약노출에 따른 위해성을 평가하였다. 이를 위해 배 과원에서 주로 사용되는 8개 농약 품목을 대상으로 Occupational Pesticide Exposure (OpEx) 모델을 활용하여 비산, 증기, 표잔류물, 진입 노출 시나리오별 성인 및 어린이 거주자의 노출량을 산정하였다. 거주자 위해성은 피부흡수율 적용기준에 따라 산정된 노출량을 바탕으로 농약살포자노출허용량(Acceptable Operator Exposure Level, AOEL)에 기반한 비급성독성 유효성분 참고값(Reference Values for Non-Acutely Toxic Active Substances, RVNAS)을 기준으로 평가하였다. 시험 결과, 비산 및 증기 노출 시나리오에서는 RVNAS 값이 전 반적으로 100 미만으로 나타나 농약노출에 따른 위해 우려 수준이 낮았다. 반면, 페니트로티온 수화제, 만코제브 수화제, 프로피네브 수화제를 포함한 일부 품목은 잔류물 및 진입 노출 시나리오에서 위해성이 확인되었다. 이는 국내 과수원 인근에 거주하는 주민의 경우, 살포 후 작물 표면에 남아 있는 농약 잔류물과의 직접적인 접촉이 공기 중 비산 보다 더 중요한 노출 경로가 될 수 있음을 시사한다. 본 연구를 통하여 우리나라의 환경을 반영한 거주자 노출 시나리오 및 위해성평가 기준을 정립하고, 주요 노출량 변이요인에 대한 국가 고유 기초자료를 구축하여 거주자의 농약 노출 위해성평가 체계 구축의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

색인어: 피부흡수율 기준, 거주자, 위해성평가, 배 과수원