

농산물의 형태적 특성에 따른 잔류농약 검출 패턴 비교 연구

김강천* · 김창조* · 송지숙* · 박은수* · 김용현* · 홍지화*†

* 국립농산물품질관리원 시험연구소

Comparative Study on the Detection of Residual Pesticides Based on Morphological Characteristics of Produce

Gangcheon Kim* · Chang Jo Kim* · Jisook Song* · Eunsoo Park* · Yonghyun Kim* · Jeehwa Hong*†

* Experiment Research Institute, National Agricultural Products Quality Management Service

ABSTRACT

Purpose: The objective of this study is to analyze and compare the detection pattern of residual pesticides according to the morphological characteristics of the main fruits and vegetables using data comparison.

Methods: The two different datasets were collected. One is the residual characteristics reported in the paper and the other is the pesticide detection data for same crop. The data of weight, surface area and pesticide data for crops were used to compare the detection pattern between the two types of datasets. A total of nine agricultural products were selected for analysis of residual detection patterns according to the morphological characteristics.

Results: The results of four cases for nine crops are as follows. In the surface ratio based on the weight of crop, the violation rate of mini tomato was higher than tomato in case 1. The twisted pepper had a higher violation rate than the chili pepper in case 2. Mini paprika had a small number of safety investigation, making it difficult to analyze violation patterns with paprika in case 3. In the leafy vegetables, which considers the dilution effect of the surface form and growth rate of the crop, the violation rate of perilla leaf was higher than the lettuce, and kale's violation rate was higher than lettuce in case 4. In addition, pesticide components detected as violations in nine crops were extracted and discussed.

Conclusion: By comparing the detection patterns of nonconformity according to morphological characteristics, we derived the items to be considered in safety investigation. The results of this study can be used as basic data for establishing safety policies in the future.

Key Words: Agricultural Products, Residual Characteristics, Morphological Characteristics, Residual Pesticides, Safety Investigation

● Received 31 October 2024, 1st revised 21 November 2024, accepted 25 November 2024

† Corresponding Author(hongjh19@korea.kr)

© 2024, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

* 본 논문은 국립농산물품질관리원 시험연구소 연구개발과제(과제명: 농산물 안전관리 정책수립 지원을 위한 데이터 분석 및 시각화 연구)의 지원에 의해 연구되었습니다

1. 서론

농약은 전 세계적으로 균, 곤충, 바이러스, 잡초 등으로부터 농작물 피해 예방과 생리 기능 증진 및 억제를 목적으로 사용되고 있다(Burger et al., 2008). 전 세계 농약 사용량은 1990년부터 경시적으로 증가하였으며, 2021년에는 1990년 대비 약 2배에 달하는 3.54백만톤으로 나타났다(FAO, 2023). 농약은 독성을 가진 화학물질로서 농약의 과도한 사용은 농작물과 환경에 잔류하는 문제를 유발하고 있다(Syafurudin et al., 2021; Ngegba et al., 2022). 또한 농약은 환경 및 인체에 노출 시 면역·생식·신경 계통 등에 독성을 유발하여 식품 섭취 및 인체 노출에 따른 위해성 문제가 지속적으로 발생되고 있으며(Damalas and Eleftherohorinos, 2011; Lushchak et al., 2018) 농업생산 과정에서 투입되는 농약의 사용 절감을 통해 온실가스 배출을 줄이는 저탄소 농업의 중요성 또한 커지고 있는 실정이다(Shin and Hwang, 2024).

농촌진흥청과 식품의약품안전처에서는 작물별 농약의 안전사용기준 및 잔류허용기준을 설정하며, 국립농산물품질관리원과 식품의약품안전처는 국내에서 생산 및 유통되는 농산물 중 잔류농약 등 유해물질에 대한 안전성 조사를 실시하여 안전한 농산물 생산에 기여하고 있다. 이처럼 국내에서는 농약 등록 단계와 사용 단계에서 잔류 규제를 시행하고 있으며, 생산단계 안전성 조사는 1일 섭취량이 많은 작물(쌀, 배추, 사과 등), 가공과정 없이 섭취하는 농산물(상추, 들깨잎 등), 잔류허용기준 또는 농약허용물질목록 관리제도(Positive List System, PLS) 일률기준을 초과한 비율이 높은 작물 및 소비자의 관심이 큰 신선 채소류를 기본 관리 품목으로 지정하여 집중적으로 조사하고 있다(NAQS, 2024). 그리고 최근에는 식품 안전 확보 및 위해요소의 사전 예방을 위하여 국제식품안전표준인 FSSC 22000과 같은 인증제도 등이 개발되고 있음에 따라 농산물을 포함한 농식품의 안전관리 중요성 또한 커질 것으로 전망된다(Gong and Yoo, 2023).

농산물 중 잔류농약은 작물 내부에 침투한 농약뿐만 아니라, 작물 표면에 물리적으로 부착된 비침투성 농약까지 포함하며, 이는 농약의 물리화학적 성질, 작물의 형태학적 특성, 살포 방식, 환경적 요인 등에 의해 영향을 받는다(Kim, 2019). 농산물의 형태적 특성에 따른 농약 잔류 특성 연구는 농약 잔류 기준 설정과 검정을 위한 중요한 자료로 활용이 된다. 이에 따라 기존에 보고된 연구 결과를 살펴보면, Lee et al. (2024)은 풋고추와 파리고추 농산물의 중량, 표면적, 비대생장과 잔류농약 감소 원인 간의 관계성을 연구하였다. Shin et al. (2021)은 파프리카 품종에 따른 잔류농약의 특성을 보고하였으며, Son et al. (2012)은 농산물 중 엽채류는 작물마다 크기와 무게가 다양하고 형태와 표면 성질이 달라 들깨잎, 상추, 케일의 형태적 특성이 농약 잔류 양상에 영향을 미친다고 보고한 바 있다. 그리고 들깨잎, 상추 등의 농산물 생육 특성에 따른 작물 잔류 효과 패턴을 분석하고 감소 시간 예측을 통해 농약 안전 사용 지침을 설정하는 기초 연구도 수행되었다(Noh et al., 2019). Sardar et al. (2022)은 상추와 들깨잎의 물리적 특성과 성장 조건이 농약 잔여물 축적에 많은 영향을 미치며 농산물 간의 잔여 특성 차이를 이해하는데 중요한 데이터임을 보고하였다. 또한 토마토의 과종에 따른 농약 잔류량 예측 연구도 수행된 바 있다(Kwon et al., 2004).

따라서 본 연구에서는 기존에 보고된 연구 결과를 기반으로 이에 해당되는 실제 농산물에 대한 안전성 조사 부적합 결과를 비교해 봄으로써 형태적 특성에 따른 부적합 패턴을 파악한 후 안전성 조사를 위한 개선방안 등을 도출하고자 하였다. 특히 최근 5년(2019년~2023년)간 수집된 농약 안전성 조사 결과를 대상으로 기존에 보고된 주요 농산물의 형태적 특성에 따른 잔류 특성 연구결과와 비교 분석해보고자 한다.

2. 재료 및 방법

연구자료 선정을 위하여 국내 주요 과채류 및 엽채류의 형태학적 특성에 따른 농약의 잔류특성 데이터를 수집하였다. 수집된 결과 중 안전성 조사 결과와 비교가 가능한 농산물을 4개의 case로 구분하여 1) 완숙토마토와 방울토마토, 2) 풋고추와 파리고추, 3) 파프리카와 미니 파프리카, 4) 들깻잎, 상추 및 케일, 총 9개 농산물을 연구 대상 농산물로 선정하였다.

잔류특성 데이터 분석을 위하여 농산물 생산단계 안전성 조사 결과는 <Figure 1>의 절차에 따라 수집한 후, 전처리를 통해 기 보고된 논문과 일치하는 농산물에 대한 대분류/중분류/품목 수준의 데이터셋을 구축하였다. 문헌의 데이터와 안전성 조사 데이터 총 두가지 데이터셋을 이용하여 농산물 품목에 따른 잔류 특성과 부적합 결과를 비교 분석하였다.

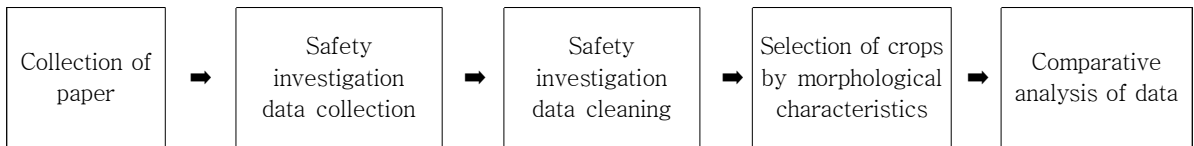


Figure 1. Steps of the research process

본 연구에 사용된 최근 5년(2019년~2023년) 동안의 농산물 안전성 조사 데이터는 총 301,725건이었으며 이중 생산단계에서 수집된 조사 정보인 총 256,514건의 데이터를 추출하였다. 안전성 조사 데이터의 탐색적 자료 분석을 위하여 Tableau Desktop(ver. 2024.1.1.) 소프트웨어를 사용하여 데이터를 시각화 하였으며 분석에 사용된 변수는 안전성 조사 결과 통보일(년), 농산물 품목(대분류, 품명), 분석결과(적합, 부적합)이다.

형태적 특성에 따른 부적합 패턴을 파악하기 위하여 기존의 문헌을 참고하여 <Table 1>과 같이 요인에 따른 잔류 특성 6가지를 정리하였고(Kim, 2019; Sardar et al., 2022), 본 연구에서는 작물의 외적 표면 형태, 작물체의 중량에 따른 표면적 비율 그리고 작물의 생장속도 요인을 안전성 조사결과와 비교 분석하는 요인으로 선택하였다.

Table 1. Factors affecting pesticide residues

Factor	Residual characteristics
1) Stability of the pesticide itself	Properties that do not break down easily, penetrability, etc.
2) Pesticide formulations and spraying methods	The amount of pesticide attached to crops varies depending on the formulation of diluted spray powder, granules, etc., and the spray pressure of the sprayer.
3) Surface morphology of crop	The amount of adhesion and residual amount varies depending on the external surface shape, such as upright/flat, curved, and hairy/waxed.
4) Surface area to crop weight ratio	The larger the crop, the greater the amount of residue.
5) Crop growth rate	The heavier the weight compared to the surface area, the less residual amount.
6) Cultivation type (facility vs. open field), supplements, etc.	

선정된 요인에 대하여 형태적 특성에 따른 농약 잔류 가능성 결과를 정리해보면 <Table 2>와 같다. 9가지 농산물에 대한 형태적 특성(중량, 표면적 값, 중량 대비 표면적비, 비대 성장 회석효과) 데이터와 최근 5년간 안전성 조사 결과를 비교하였고 추가적으로 농산물에 설정된 농약잔류허용기준(Maximum Residue Limit, MRL) 값을 함께 비교함으로써 데이터 간의 유의적인 차이를 알아보려고 하였다. 농산물의 형태적 특성을 직관적으로 파악하기 위하여 본 연구에서는 Adobe Firefly AI image generator를 이용하여 농산물의 대표적인 이미지를 생성하였다(www.adobe.com/products/firefly).

Table 2. Potential pesticide residues by factor

Factor	Characteristics	Possibility of pesticide residue	References
Surface morphology of crop	If there's a curve	Higher	Lee et al. (2024)
	If there's hair	Higher	Noh et al. (2019)
	If it's smooth	Lower	
Surface area to crop weight ratio	The larger the surface area	Higher	Lee et al. (2024)
	The heavier the weight	Lower	Son et al. (2012)
Crop growth rate	If it's fast	Lower	Lee et al. (2024)

3. 자료분석 결과

3.1 안전성 조사 데이터 활용 탐색적 자료 분석

지난 5년(2019~2023)간 국내 생산단계 농산물 대상 잔류농약 안전성 조사는 총 256,514건 수행되었으며 본 연구에서 선정한 9개 농산물의 지난 5년간 잔류농약 안전성 조사 건수는 26,995이며, 이는 전체 안전성 조사 물량 중 약 10.5%를 차지한다<Table 3>.

Table 3. The number of safety investigation of pesticides in nine pre-harvest agricultural products from 2019 to 2023

Crop	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Green chili pepper	1,227	1,179	1,276	1,320	1,141	6,143
Kale	82	95	84	64	57	382
Lettuce	873	870	1,065	1,020	1,212	5,040
Mini paprika	-	2	7	4	5	18
Mini tomato	658	712	951	931	836	4,088
Paprika	753	862	878	736	752	3,981
Perilla leaf	566	472	536	479	496	2,549
Tomato	714	874	979	1,049	819	4,435
Twisted pepper	87	89	74	65	44	359
Total	4,960	5,155	5,850	5,668	5,362	26,995

2023년도 생산단계 안전성 조사 농산물 중 9개 농산물에 대한 잔류농약 안전성 조사 비중을 조사한 결과, 상추 2.31%, 풋고추 2.17%, 미니 토마토 1.59%, 토마토 1.56%, 파프리카 1.43% 순으로 나타났으며, 깻잎, 케일, 파리고추, 미니 파프리카는 1% 이하로 나타났다(Figure 2). 그러나 9개 농산물 대상으로 잔류농약 안전성 조사는 매년 수행되었기 때문에 시계열적 변동성과 통계적 유의성을 검토하기에 충분한 분석 개수를 확보하고 있다고 판단된다.

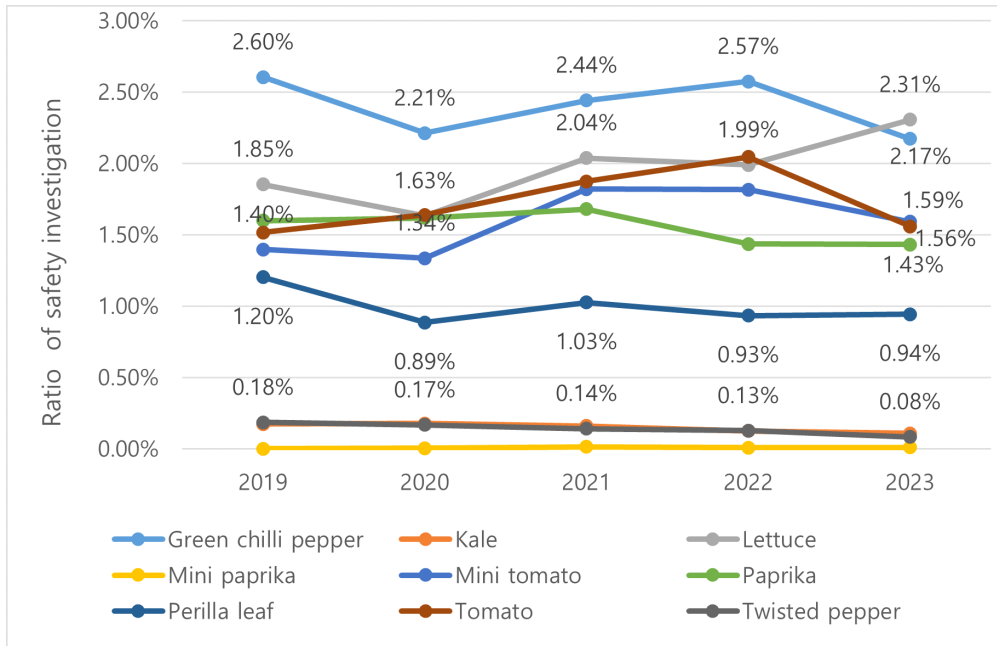


Figure 2. The percentage of safety investigation of pesticides in nine pre-harvest agricultural products among the total number of investigations from 2019 to 2023

3.2 (Case 1) 완숙토마토와 방울토마토의 형태적 특성에 따른 농약 잔류 특성

사례1에서는 토마토의 형태학적 특성에 따른 농약 안전성 조사 결과 패턴을 비교 분석하고자 하였다. 토마토의 형태학적 특성은 토마토의 과종별 농약 잔류량 예측을 보고한 Kwon et al. (2004)의 연구를 활용하여 <Table 4>에 제시하였으며, 최근 5년간 완숙토마토와 방울토마토 대상으로 수행된 잔류농약 안전성 조사 결과는 <Table 5>에 제시하였다. 최근 5년간 완숙토마토와 방울토마토의 생산단계 조사 건수는 각각 4,435건과 4,088건이었으며, 부적합률은 각각 0.29% 및 0.44%로 방울토마토가 약 1.5배 높은 것으로 나타났다. 이는 방울 토마토의 비표면적은 토마토 대비 약 2.15배 큰 특징을 가졌으며, 비표면적의 비와 농약 잔류량은 상관성 있다는 보고(Kwon et al., 2004)를 고려했을 때 형태적 특성과 과종에 따른 부적합 건수는 관련성이 있다고 판단되었다. 특히 작물 잔류성 시험의 기준 및 방법 중 시험작물의 선정은 일반적으로 널리 재배되는 품종으로 하되, 품종이 다양한 경우에는 농약의 잔류가능성이 높은 품종으로 하도록 제시한바 있다(농약관리법-작물 잔류성 시험의 기준 및 방법). 또한, 본 연구에서 방울토마토 중 잔류농약의 부적합 사례가 완숙토마토 대비 높은 경향을 보이며, 토마토 중 농약 잔류허용기준 설정 시 방울토마토 기준으로 검토하는 것이 적절하다는 보고(Kwon et al., 2004)를 고려했을 때 작물의 형태학적 특성은 농약의 작물 잔류성에 영향을 줄 수 있는 중요한 요인으로 판단된다. 또한, 작물의 비표면적 외에도 작물의 생장은 잔류농약에 영향을 주는 주 요인이다. 비록 Kwon et al. (2004)의 연구 기간 중 완숙토마토와 방울토마토의 비대생장은 거의 없었지만, 생산단계 농산물 안전성 조사의 경우 수확 전 또는 수확 후 저장 단계의 농산물을 대상으로 수행되었으

로 약제 살포 후 작물의 생장에 따른 농약 희석 효과가 발생했을 것이며 이로 인해 완숙토마토가 방울토마토보다 부적합률이 낮게 나타난 것으로 추정된다.

완숙토마토와 방울토마토의 안전성 조사에서 가장 많은 부적합 건수를 나타내는 5가지 검출 성분은 <Table 6>과 같다. 완숙토마토와 방울토마토 모두에서 부적합 검출이 많이 나타난 성분은 fluazinam으로 나타났다. Fluazinam, cyenopyrafen, orysastrobin, chlorpyrifos, cyprodinil, diazinon은 토마토에 잔류허용기준이 등록되어 있지 않음에 따라 검출 건수가 적음에도 높은 부적합률을 보였다. 토마토 중 부적합 건수가 가장 많은 imicyafos는 관주 및 토양처리를 통해 과채류 중 뿌리 혹 선충을 예방하기 위한 살 선충제이며, 토양 중 잔류하는 imicyafos는 작물로 흡수 이행이 가능한 성분이다. 토양 중 잔류농약의 후작물 흡수 이행은 비의도적인 농약 오염의 대표 사례로서 농약 사용에 주의가 필요하다. Lim et al. (2021)의 보고에 따르면 상추와 시금치의 후작물 재배를 위한 토양 안전기간 (Plant Back Interval, PBI)은 각각 213.9~357.3일 및 100.8~283.6일로 나타났으며, PLS 제도 도입에 따른 부적합 사례를 예방하기 위해서는 최소 1년의 휴경기간을 제시하였다. 따라서 순환재배형 작물 재배 시 사용 농약과 재배 작물에 적합한 휴경기간을 가진다면 부적합률을 저감할 수 있을 것이다. 완숙토마토와 방울토마토의 경우 향후 안전성 조사 건수를 비슷하게 유지하면서 모니터링이 필요할 것이며, 토마토 안전성 조사를 위한 시료 채취 시 부적합 예방을 위하여 농약 안전사용 기준 등 농가지도와 교육을 지속적으로 강화해야 할 것으로 생각한다.

Table 4. Morphological characteristics of tomato and mini tomato

Crop	Weight (g)	Surface area (cm ²)	Specific surface area (cm ² /g)	Ratio of specific surface area
Tomato	95.8	96.2±9.7	1.00	2.15 (=2.15/1.00)
Mini tomato	9.6	20.3±3.0	2.15	

Table 5. Safety investigation data of tomato and mini tomato

Crop	No. of investigation	No. of violation	Violation rate (%)	Ratio of violation rate
Tomato	4,435	13	0.29	1.52 (=0.44/0.29)
Mini tomato	4,088	18	0.44	

Table 6. Top 5 violated pesticides in tomato according to the safety investigation data

Crop	Pesticide	No. of detection	No. of conformity	No. of violation	Violation rate (%)
Mini tomato	Imicyafos	34	29	5	14.7
	Fluazinam	2	0	2	100.0
	Cyantraniliprole	102	101	1	1.0
	Cyenopyrafen	2	1	1	50.0
	Flufenoxuron	3	2	1	33.0
Tomato	Fluazinam	1	0	1	100.0
	Orysastrobin	1	0	1	100.0
	Chlorpyrifos	1	0	1	100.0
	Cyprodinil	1	0	1	100.0
	Diazinon	1	0	1	100.0

3.3 (Case 2) 풋고추와 파리고추의 형태적 특성에 따른 농약 잔류 특성

고추의 형태적 특성에 따른 잔류 특성을 규명하기 위해 풋고추와 파리고추의 형태적 특성에 따른 농약 잔류 특성을 <Table 7>에 제시하였다(Lee et al., 2024). 2019년부터 2023년까지 잔류농약 안전성 조사 결과, 풋고추와 파리고추의 부적합률은 각각 0.83% 및 1.94%로 나타났으며, 비표면적이 큰 파리고추에서 약 2배 이상 부적합률이 높은 것으로 나타났다<Table 8>. 작물 중 농약의 잔류특성은 작물의 형태학적 특성(비표면적, 표면의 특성 등), 작물의 종류 및 재배 조건 등에 의해 영향을 받을 수 있다고 보고된 바 있으며(Kim et al., 2023). 특히 고추는 국내에서 조미채소로 분류되며, 과형에 따라 <Figure 3>에서 볼 수 있듯이 풋고추는 표면이 매끈하고 광택이 좋은 반면, 파리형 고추는 과실 표면에 많은 굴곡이 있는 형태를 가지고 있다(Hur, 2020; Lee et al., 2024).

Table 7. Morphological characteristics of green chili pepper and twisted pepper

Crop	Weight (g)	Surface area (cm ²)	Specific surface area (cm ² /g)	Ratio of specific surface area
Green chili pepper	17.23±1.51	66.49±5.52	3.87±0.20	1.47 (=5.70/3.87)
Twisted pepper	8.29±0.85	47.07±3.65	5.70±0.24	

Table 8. Safety investigation data of green chili pepper and twisted pepper

Crop	No. of investigation	No. of violation	Violation rate (%)	Ratio of violation rate
Green chili pepper	6,064	50	0.83	2.34 (=1.94/0.83)
Twisted pepper	360	7	1.94	

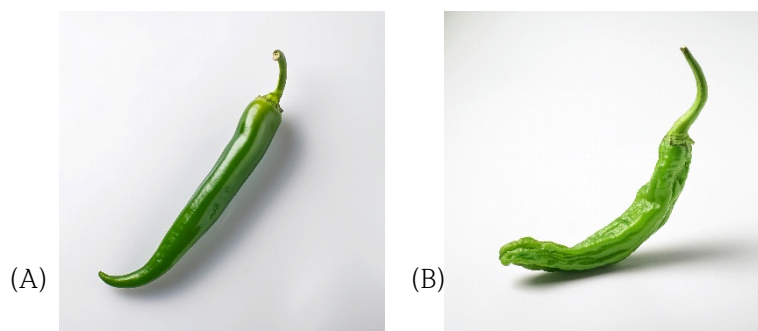


Figure 3. Surface morphology of green chili pepper(A) and twisted pepper(B) created by Adobe Firefly AI image generator

그러나 Lee et al. (2024)는 파리고추가 풋고추보다 중량 대비 표면적이 약 1.5배 크므로 파리고추가 풋고추보다 잔류량이 많을 것으로 예상하였지만, 대부분의 수확일자에서 풋고추와 파리고추의 품종 간 잔류량의 유의한 차이가 없다고 보고하였다. 하지만 본 연구에서는 풋고추와 파리고추에 동일한 잔류허용기준(3 mg/kg)을 적용하였을 때 파리고추의 부적합률은 풋고추 대비 약 2.3배 높게 나타났다. 고추에 발생하는 병해의 발생 양상은 과거에 비해 종류가 다양할뿐만 아니라 넓은 지역에서 발생하는 경향을 보이고 있으며 각종 병해충의 발생을 줄이기 위해 다양한 농약이

사용되고 있다는 보고를 고려했을 때(Hur et al., 2020) 고추 품종별 다양한 농약 성분에 대한 지속적인 안전성 조사가 필요할 것으로 생각된다.

고추 중 잔류농약 안전성 조사 결과 부적합이 가장 많이 발생한 농약을 <Table 9>에 제시하였다. 풋고추와 파리고추 모두에서 부적합 검출이 많이 나타난 성분은 ethoprophos로 나타났다. 다빈도 부적합 농약 5개 중 flutriafol, orysastrobin, ferimzone, EPN은 고추에 잔류허용기준이 설정된 농약이 아니기 때문에 PLS 일률기준(0.01 mg/kg)을 초과한 부적합 사례였다. 특히 국립농산물품질관리원의 다성분 동시분석법의 정량한계가 0.01 mg/kg이므로 부적합률이 높게 나타난 것으로 사료된다. Ethoprophos는 유기인계 살충제로서 토양처리를 통해 고추뿐만 아니라 과채류, 채소류 등의 농산물 중 뿌리혹선충 및 거세미나방 등의 해충을 예방하는데 사용되고 있다. Kwak et al. (2021)은 토양 중 ethoprophos 처리에 따른 전작물(엇갈이 배추)과 후작물(시금치) 흡수이행을 조사한 결과 전작물의 경우 기준량 처리 기준 최대 약 0.03% 흡수 이행되었으며, 후작물도 극미량이지만 흡수 이행되었다고 보고하였다. 특히 ethoprophos는 국내 유통 농산물에서도 부적합 사례가 꾸준히 발생했다는 보고(Kim et al., 2013)를 고려했을 때 생산단계 농산물에 대한 지속적인 잔류농약 모니터링이 필요해 보인다. 풋고추와 파리고추의 경우에도 향후 안전성 조사 건수를 비슷하게 유지하면서 모니터링이 필요할 것이며, 고추 안전성 조사를 위한 시료 채취 시 부적합 예방을 위한 농가지도 및 교육을 지속적으로 강화해야 할 것이다.

Table 9. Top 5 violated pesticides in pepper according to the safety investigation data

Crop	Pesticide	No. of detection	No. of conformity	No. of violation	Violation rate (%)
Green chili pepper	Carbofuran	8	2	6	75.0
	Flutriafol	4	0	4	100.0
	Orysastrobin	4	0	4	100.0
	Ferimzone	3	0	3	100.0
	Ethoprophos (Ethoprop)	7	4	3	42.9
Twisted pepper	Ethoprophos (Ethoprop)	3	1	2	66.7
	EPN	1	0	1	100.0
	Diazinon	1	0	1	100.0

3.4 (Case 3) 파프리카와 미니 파프리카의 형태적 특성에 따른 농약 잔류 특성

농산물의 형태적 특성에 따른 잔류 특성 연구를 검토할 세번째 대상은 파프리카 종류에 따른 잔류 특성을 연구한 논문이다(Shin et al., 2021). 파프리카의 경우 국내 생산량과 수출량이 꾸준히 증가하고 있지만 대부분 로열티를 지불하는 수입품종이라 열악한 시설환경에서도 재배 가능하도록 미니 파프리카 품종이 최근 활발히 개발된다고 보고된 바 있다(Shin et al., 2021).

2024년 파프리카 재배면적은 2023년 대비 1% 감소한 716ha로 전망되며, 생산량은 면적 감소에도 불구하고 단수 증가로 인해 2023년 대비 3% 증가한 8만 톤으로 예상된다고 하였다(Han, 2024). 미니 파프리카는 일반 파프리카보다 크기가 손질과 섭취가 용이하며, 당도가 높아 소비자 선호가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(Han, 2024). 기존에 보고된 연구 및 <Figure 4>에 제시한 것과 같이 미니 파프리카는 일반 파프리카에 비해 중량 대비 표면적이 크기 때문에 미니 파프리카에서 잔류량이 더 높을 것으로 예상하였으며 기 보고된 표면적, 중량, 중량 대비 표면적 값과 비대생장 희석 효과 자료는 <Table 10>과 같다(Shin et al., 2021). 파프리카와 미니 파프리카의 최근

5년(2019~2023)간 안전성 조사 결과를 살펴보면, <Table 11>과 같이 파프리카의 부적합률은 0.2%였고 미니 파프리카는 18건의 조사에서 모두 적합으로 나타났다. 미니 파프리카의 경우 파프리카에 비해 안전성 조사 건수가 적었고, 연구 대상 기간 중 부적합 사례가 없어서 품목별 중량 대비 표면적 데이터를 비교하기는 어려운 것으로 사료된다.

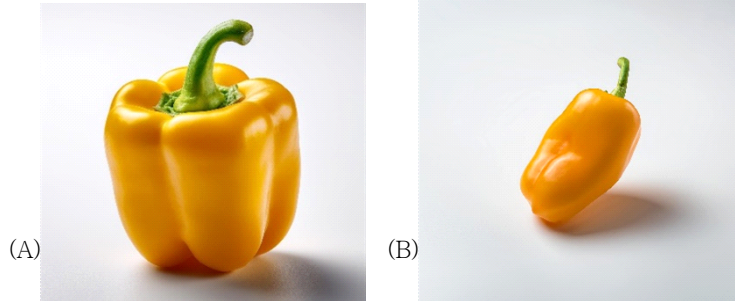


Figure 4. Surface morphology of paprika(A) and mini paprika(B) created by Adobe Firefly AI image generator

Table 10. Morphological characteristics of paprika and mini paprika

Crop	Weight (g)	Surface area (cm ²)	Specific surface area (cm ² /g)	Ratio of specific surface area
Paprika	176.32±22.70	271.78±28.51	1.55±0.10	1.52 (=2.35/1.55)
Mini paprika	33.53±3.30	78.62±5.78	2.35±0.08	

Table 11. Safety investigation data of paprika and mini paprika

Crop	No. of investigation	No. of violation	Violation rate (%)
Paprika	3,981	8	0.2
Mini paprika	18	0	0.0

농업관측센터의 2023년도 소비자 조사 결과에서 미니 파프리카의 구매 의향이 전년 조사치 대비 17%p 상승되는 추세로 본다면(Han, 2024) 안전성 조사에 있어 해당 품목의 조사 건수를 늘려가야 할 필요가 있어 보인다. 2021년도 기준 파프리카와 미니 파프리카의 재배면적(KOSIS, 2022)과 최근 5년간 안전성 조사 건수를 살펴보면 미니 파프리카가 파프리카에 비해 적게 조사되고 있는 것을 <Table 12>에서 볼 수 있다.

파프리카에 대한 잔류농약 안전성 조사 결과 Shin et al. (2021)의 시험 농약인 fluopyram과 metrafenon은 검출이 되었지만 모두 잔류허용기준 미만으로 적합하였으며, 부적합 농약은 dichlorvos 1건이었다<Table 13>. 유기인계 농약인 dichlorvos는 단고추류(*Capsicum annuum* L. var.grossum) 중 꽃노랑총채벌레, 담배나방 및 파리허리노린재를 예방하기 위한 농약으로 사용되고 있다. Dichlorvos는 상온에서 높은 증기압(2100 mPa)을 가진 농약으로서 휘발성이 높은 특징을 가지고 있다. 또한 작물 및 토양 중 dichlorvos의 반감기는 4일 이내였다는 보고를 고려했을 때(Oh et al., 2021), 농약 안전사용기준에 준하여 사용한다면 안전성에는 문제가 없지만 향후 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다. 사례 3의 비교 분석을 통하여 향후 파프리카와 미니 파프리카의 안전성 조사 시에는 미니 파프리카에 대한 조사 건수가 증가되어야 함을 알 수 있었으며, 조사 건수를 확보한 후 파프리카와 미니 파프리카 간의 중량 대비 표면적에 따른 부적합 패턴 조사가 더 이루어져야 할 것으로 생각된다.

Table 12. Cultivation area and safety investigation number of paprika and mini paprika

Crop	Cultivation area (ha) in 2021	Cultivation area (%)	No. of investigation from 2019 to 2023	Investigation ratio (%)
Total	719	100.0	3,999	100.0
Paprika	684	95.1	3,981	99.5
Mini paprika	35	4.9	18	0.5

Table 13. Nonconformity pesticide in paprika and mini paprika according to the safety investigation data

Crop	Pesticide	No. of detection	No. of conformity	No. of violation	Violation rate (%)
Paprika and Mini paprika	Dichlorvos (DDVP)	2	1	1	50.0

3.5 (Case 4) 들깻잎, 상추, 케일의 형태적 특성에 따른 농약 잔류 특성

농산물의 형태적 특성에 따른 잔류 특성 연구로 네번째 검토한 자료는 들깻잎, 상추, 케일이다. 사례 4에서는 농산물 품목에 따른 잔류 특성 연구 논문(Noh et al., 2019)과 PLS 시행 이전의 연구이지만 들깻잎, 상추, 케일의 형태적 특성과 농약 잔류 특성을 연구(Son et al., 2012)한 논문을 모두 활용하였다. 먼저 들깻잎과 상추의 비교에서는, 두 품목의 무게 대비 엽면적의 비율 차이에서 기인한 잔류량의 영향과 들깻잎의 표면에 솜털이 있는 특성과 상추의 매끄러운 표면 특성에서 나타나는 잔류량의 영향을 함께 고려하였다. 기존 연구에서 들깻잎과 상추의 metrafenone 성분 반감기는 각각 9일과 3일로 보고된 바 있다(Noh et al., 2019). 털이 많은 들깻잎은 형태적으로 농약 부착량이 많고 증체에 따른 무게 변화량이 적어 상대적으로 농약이 소실될 수 있는 요인이 적기 때문에 상추보다 반감기가 길다고 하였다. 상추의 경우 매끄러운 표면 특성으로 인해 초기 부착량은 들깻잎보다 적으나 생육이 왕성하여 희석에 의해 소실되는 양이 많아 반감기가 들깻잎보다 짧다고 보고하였다(Noh et al., 2019; Sardar et al., 2022).

들깻잎과 상추의 중량 대비 표면적비는 2.15이며, 상추와 케일의 중량 대비 표면적비는 1.17로 이들 작물의 안전성 조사 결과를 살펴보면 부적합률 간의 비율은 각각 1.31과 0.86으로 <Table 14><Table 15>와 같다. 들깻잎과 상추 간의 비교에서 중량 대비 표면적비와 부적합률 간의 비율이 2.15와 1.31로 들깻잎이 상추보다 부적합이 높게 나타났다. 이를 통해 들깻잎의 경우 형태적 특성으로 인하여 잔류농약 소실에 더 오랜 시간이 걸린다는 기존의 결과와 유사함을 확인할 수 있었다.

Table 14. Morphological characteristics of perilla leaf, lettuce and kale

Crop	Weight (g)	Surface area (cm ²)	Specific surface area (cm ² /g)	Ratio of specific surface area	
Perilla leaf	1.4±0.2	82.6±8.7	58±5.5	2.15 (=58/27)	-
Lettuce	4.9±1.2	125.5±14.5	27±5.3		1.17 (=27/23)
Kale	4.4±0.5	101.8±9.8	23±1.8	-	

Table 15. Safety investigation data of perilla leaf, lettuce and kale

Crop	No. of detection	No. of violation	Violation rate (%)	Ratio of violation rate	
Perilla leaf	2,549	120	4.71	1.31 (=4.71/3.59)	-
Lettuce	5,040	181	3.59		0.86
Kale	382	16	4.19	-	(=3.59/4.19)

다음으로 상추와 케일의 비교에서는, 케일은 잎 표면이 매끄러운 형태적 특성으로 인해 농약 입자가 부착되지 않고 흘러내려 농약 잔류량이 낮은 편이며, 이러한 현상은 케일이 들깻잎이나 상추에 비해 잎 전면에 농약이 균일하게 부착되지 못하는 형태적 특성에서 기인한다고 보고된 바 있다(Son et al., 2012). 그러나 상추와 케일의 경우 중량 대비 표면적비와 부적합률 간의 비율은 1.17과 0.86로 나타나 상반된 경향을 나타내었다. 이는 케일에 비해 상추(Noh et al., 2019)의 비대생장 희석효과가 특히 크게 나타나는 것을 원인으로 볼 수 있으며, 케일의 안전성 조사 건수가 상추에 비해 상대적으로 적게 조사된 것도 무시할 수는 없는 요인 중 하나일 것으로 생각된다. 특히 Sun et al. (2022)는 농작물 중 농약의 잔류에 영향을 미치는 요인은 온도, 작물의 생장, 농약의 제형 등이 있지만 케일의 형태학적 특성이 잔류농약의 반감기에 영향을 주었다고 보고하였다. 본 연구에서는 부적합 농약의 물리화학적 특성, 재배조건 및 작물 등의 조건들이 모두 다르므로 부적합 원인을 단정지을 수는 없지만 공통 요인이 업체류인 점과 안전성 조사결과를 고려했을 때 작물의 형태학적 특성이 원인이 될 수도 있다고 사료된다.

들깻잎, 상추, 케일의 경우 기존 연구에서 사용된 농약의 MRL은 <Table 16>과 같다. 들깻잎, 상추 및 케일 중 잔류농약 안전성 조사 결과 부적합이 가장 많이 발생한 1~5위 검출성분을 <Table 17>에 제시하였다.

Table 16. Maximum Residue Level (MRL) of perilla leaf, lettuce and kale

Crop	Pesticide ¹⁾	MRL ²⁾ (mg/kg)
Perilla leaf	Bifenthrin	10
	Dimethomorph	20
	Fludioxonil	40
Lettuce	Cyazofamid	15
	Imidacloprid	7.0
	Metrafenone	20
	Pyraclostrobin	15
Kale	Boscalid	0.05
	Chlorfenapyr	5.0
	Methoxyfenozide	15

¹⁾ Only some of the pesticides used on perilla leaf, lettuce, and kale are recorded

²⁾ As of 2024 July 15 (www.foodsafetykorea.go.kr)

Table 17. Top 5 nonconformity pesticides in the safety investigation data

Crop	Pesticide	No. of detection	No. of conformity	No. of violation	Violation rate (%)
Perilla leaf	Pendimethalin	16	7	9	56.3
	Fenitrothion (MEP)	19	11	8	42.1
	Isoprothiolane	10	3	7	70.0
	Fenobucarb	6	1	5	83.3
	Carbofuran	6	1	5	83.3
Lettuce	Phorate	34	8	26	76.5
	Imicyafos	21	5	16	76.2
	Oryastrobin	15	4	11	73.3
	Tebuconazole	92	84	8	8.7
	Carbofuran	8	1	7	87.5
Kale	Fluxametamide	5	2	3	60.0
	Flubendiamide	6	4	2	33.3
	Cartap	2	0	2	100.0
	Prochloraz	1	0	1	100.0
	Fluopyram	3	2	1	33.3

Carbofuran의 경우 들깨잎과 상추에서 83.3%, 87.5%의 부적합률을 나타내었다. 엽채류는 국내 생산단계 및 유통 농산물 중 부적합 사례 발생 빈도가 높은 경향을 보였으며(Kim et al., 2013), 채소류는 국내에서 곡류 다음으로 다소비 되는 식품군에 해당되므로 잔류농약 섭취에 대한 우려가 보고된 바 있다(Noh et al., 2011). 특히 코로나 이후 샐러드, 채소 품목의 매출이 증가하고 있다고 보고되었는데(Ha et al., 2022) 들깨잎, 상추 및 케일은 주로 쌈채소로 소비되는 작물로서 특별한 조리과정 없이 생식으로 섭취된다. 그러나 쌈배추 세척 및 조리방법에 따른 농약 감소 계수를 산출한 결과 농약의 물리화학적 특성에 따라 차이는 있지만 세척은 잔류농약을 저감할 수 있다는 보고를 고려했을 때(You et al., 2011) 안전한 농산물 섭취가 가능할 것으로 사료되며 향후 안전성 조사에 있어 케일 품목에 대한 조사 건수를 증가시킨 후 부적합 패턴을 지속적으로 모니터링해야 할 필요가 있어 보인다.

4. 결론

본 연구에서 활용한 농산물의 형태적 특성에 따른 잔류 특성을 연구한 자료들은 주로 포장시험을 위한 시설하우스 단위의 시험을 시행하였다. 반면 국립농산물품질관리원에서 실시하는 농산물 안전성 조사는 PLS 시행 이후 5년(2019~2023)간 전국에서 수집되었으며 그 중 생산단계에서 수집된 총 256,514건의 자료를 분석한 결과이므로 이들 두 데이터셋을 비교해 본다는 것은 기존에 연구된 자료에 대한 실제 농산물의 결과를 확인하는 매우 의미 있는 시도이다.

분석 대상으로 선정한 완숙토마토, 방울토마토, 풋고추, 파리고추, 파프리카, 미니 파프리카, 들깻잎, 상추, 케일 각 작물의 농약 잔류 논문 연구와 안전성 조사 결과 그리고 MRL 데이터를 추가적으로 고려하여 형태적 특성에 따른 부적합 패턴을 비교해 볼 수 있었다.

사례별로 살펴보면 case 1에서 완숙토마토와 방울토마토의 두 종별 부적합률 간의 비율은 1.52로 나타나 중량 대비 표면적 비율과 비슷한 패턴을 나타내었다. Case 2는 파리고추가 풋고추보다 중량 대비 표면적비가 높은 형태적 특성을 연구한 기존 논문과 안전성 조사 부적합률 간에는 비슷한 패턴을 보였다. Case 3에서는 미니 파프리카가 파프리카보다 중량 대비 표면적이 크기 때문에 잔류량이 높을 것으로 예상한 것과 달리, 미니 파프리카는 모두 적합으로 나타났다. 그러나 미니 파프리카의 조사 건수가 적어 중량 대비 표면적과의 관계성을 정확하게 파악하기는 어려웠다. Case 4에서 들깻잎과 상추는 중량 대비 표면적비와 부적합률 간의 비율이 2.15와 1.31로 들깻잎이 높게 나타나는 공통적인 패턴을 파악할 수 있었다. 그러나 상추와 케일의 경우 중량 대비 표면적비와 부적합률 간의 비율은 1.17과 0.86로 나타나 상반된 경향을 보여주었다.

본 연구의 다양한 사례 분석을 통해 형태적 특성에 따른 잔류특성을 확인할 수 있었다. 샘플 수의 제한으로 본 연구에서 밝히지 못한 한계점에 대해서는 향후 안전성 조사 계획 수립 시 형태적 특성을 고려한 시료 수집과 조사 건수 조정 등을 통해 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 향후에는 다양하게 이루어지고 있는 유통단계의 잔류농약 연구 및 자료를 검토해 보고, 지자체 등 여러 기관에서 수행하고 있는 농산물 잔류농약 조사 결과와 비교해 보는 것도 새로운 패턴과 의미를 찾는 데 도움이 될 것으로 생각된다. 본 연구에서 비교 분석한 형태적 특성에 따른 부적합 데이터는 농약의 안전한 사용을 지도하기 위한 교육 자료로도 활용이 가능할 것으로 사료되며, 이를 통해 소비자에게 안전한 농산물을 공급하는데 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Burger, J., Mol, F., and Gerowitt, B. 2008. The “necessary extent” of pesticide use—thoughts about a key term in German pesticide policy. *Crop Protection* 27:343-351.
- Damalas, C. A., and Eleftherohorinos, I. G. 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8(5):1402-1419.
- FAO, 2023. Pesticides use and trade 1990-2021. p 3.
- Gong, W. J., and Yoo, H. J. 2023. Effects of FSSC 22000 Food safety management system characteristics on business performance: mediating effects of organizational capabilities. *Journal of Korean Society for Quality Management* 51(2):263-282.
- Ha, J. Y., and Lim, S. H. 2022. Analysis of salad purchaser types and purchasing behaviors through social network analysis. *Journal of Korean Society for Quality Management* 50(2):287-304.
- Han, D. B. 2024. *Agricultural outlook 2024(volume 2): agriculture and rural areas in an uncertain era, challenges and the future.* p 637.
- Hur, T. W. 2020. *Pepper-agriculture technology guide* 115. Rural Development Administration, Jeonju, South Korea. p 55, 56, 226.
- Kim, C. J., Yuan, X., Kim, M., Kyung, K. S., and Noh, H. H. 2023. Monitoring and risk analysis of residual pesticides drifted by unmanned aerial spraying. *Scientific Reports* 13, 10834.

- Kim, H. Y., Lee, S. Y., Kim, C. G., Choi, E. J., Lee, E. J., Jo, N. G., Lee, J. M., and Kim, Y. H. 2013. A survey on the pesticide residues and risk assessment for agricultural products on the markets in Incheon area from 2010 to 2012. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32(1):61–69.
- Kim, K. G. 2019. Understanding pesticides correctly—agriculture technology guide 221. Rural Development Administration, Jeonju, South Korea. p 38–40.
- KOSIS. 2022. Status and production performance of vegetable greenhouses. Available from: <https://kosis.kr/>.
- Kwak, S. Y., Lee, S. H., Kim, H. Y., Shin, B. G., and Kim J. E. 2021. Uptake and translocation of ethoprophos mixed with soil for cultivation of preceding crop into succeeding crop. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 40(2):92–98.
- Kwon, H. Y., Kim, J. B., Lee, H. D., Ihm, Y. B., Kyung, K. S., Park, I. H., and Choi, J. 2004. Estimate of pesticide residues in tomato varieties using ratio of surface area to weight. *The Korean Journal of Pesticide Science* 8(1):30–37.
- Lee, J. R., Kim, D. B., Choi, J. Y., Han, H. R., Kwon, H. Y., and Park, S. E. 2024. Residual characteristics of cyenopyrafen, fludioxonil and fluopyram in green chilli pepper and twisted pepper. *The Korean Journal of Pesticide Science* 28(1):1–12.
- Lim, D. J., Kim, S. W., Kim, Y. E., Yoon, J. H., Cho, H. J., Shin, B. G., Kim, H. Y., and Kim, I. S. 2021. Plant-back intervals of imicyafos based on its soil dissipation and plant uptake for rotational cultivation of lettuce and spinach in greenhouse. *Agriculture* 11(6):495.
- Lushchak, V. I., Matviishyn, T. M., Husak, V. V., Storey, J. M., and Storey, K. B. et al., 2018. Pesticide toxicity: A mechanistic approach. *EXCLI Journal* 17:1101–1136.
- NAQS. 2024. Safety investigation. Available from: <https://www.naqs.go.kr>.
- Ngegba, P. M., Cui, G., Khalid, M. Z., and Zhong, G. 2022. Use of botanical pesticides in agriculture as an alternative to synthetic pesticides. *Agriculture* 12(5):600.
- Noh, H. H., Jo, S. H., Lee, J. W., Shin, E. S., Shin, H. W., Kwon, H. Y., and Kyung, K. S. 2019. Residual characteristics of fungicide metrafenone in perilla leave, lettuce and ponytail radish and estimation of reducing residual concentration. *The Korean Journal of Pesticide Science* 23(1):51–59.
- Noh, H. H., Lee, K. H., Lee, J. Y., Park, H. K., Park, S. H., Kim, S. H., and Kyung, K. S. 2011. Characteristics of pesticide residues in leafy vegetables collected from wholesale and traditional markets in Cheongju. *The Korean Journal of Pesticide Science* 15(4):453–462.
- Oh, K. Y., Bae, J. Y., Lee, D. Y., Kim, Y. J., Lee, D. Y., and Kim, J. H. 2021. Residual dissipation pattern of dichlorvos and etofenprox in squash under greenhouse condition. *The Korean Journal of Pesticide Science* 25(1):31–39.
- Sardar, S. W., Byeon, G. D., Choi, J. Y., Ham, H. J., Ishag, AESA., and Hur, J. H. 2022. Residual characteristics and safety assessment of the insecticides spiromesifen and chromafenozide in lettuce and perilla. *Scientific Reports* 12(1):4675.
- Shin, C. Y., and Hwang, J. H. 2024. The effect of consumer perceived naturalness on benefits, attitude, and willingness to pay a premium for smart farm vegetables: low carbon label as a moderating variable. *Journal of Korean Society for Quality Management* 52(2):201–220.
- Shin, H. J., Kim, C. J., Noh, H. H., Kim, T. K., Oh, M. S., Lee, E. Y., Kyung, K. S., and Kim, D. B. 2021. Residual characteristics of fluopyram and metrafenone in sweet pepper caused by cultivars. *The Korean Journal of Pesticide Science* 25(4):379–389.
- Son, K. A., Im, G. J., Hong, S. Y., Kim, J. B., Ihm, Y. B., Ko, H. S., and Kim, J. E. 2012. Comparison of pesticide residues in perilla leaf, lettuce and kale by morphological characteristics of plant. *The Korean Journal of Pesticide Science* 16(4):336–342.

- Sun, J. H., Hwang, K. W., Jeong, K. S., Lee, T. H., Kim, H. J., Park, S. J., and Moon, J. K. 2022. The residual characteristic of chromafenozide and pyridalyl in kale. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 41(2):125-134,
- Syafrudin, M., Kristanti, R. A., Yuniarto, A., Hadibarata, T., Rhee, J. T., Al-onazi, W. A., Algarni, T. S., Almarri, A. H., and Al-Mohameed, A. M. 2021. Pesticides in drinking water—a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(2):468.
- You, Y. H., Lee, Y. S., and Kwon, H. J. 2011. Reduction factors of pesticides with different physicochemical properties under washing and cooking conditions. *Korean Journal of Food Science and Technology* 43(5):537-543.

저자소개

- 김강천** 경북대학교 공업화학과를 졸업하였으며 국립농산물품질관리원 시험연구소에서 연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 빅데이터 활용이다.
- 김창조** 충북대학교에서 석사, 박사 학위를 취득하였고 현재 국립농산물품질관리원 시험연구소 안전성분석과에서 근무하고 있으며, 주요 관심분야는 잔류농약 분석법 개발과 연구이다.
- 송지숙** 서울대학교에서 농학박사 학위를 취득하였으며, 농림축산식품부에서 농생명 종자 및 농축산물 위생 정책 등을 수립하였다. 현재 국립농산물품질관리원 시험연구소장으로 재직 중이며 주요 관심분야는 빅데이터 및 AI 활용 연구 사업 발굴이다.
- 박은수** 충남대학교 생물자원공학과를 졸업하고, 충남대학교 농업기계공학과에서 석사 및 박사학위를 취득하였다. 현재 국립농산물품질관리원 시험연구소 품질조사과에서 근무하고 있으며, 주요 관심분야는 데이터마이닝, 빅데이터 분석, 분광분석, 영상처리이다.
- 김용현** 원광보건대학을 졸업하였고, 현재 국립농산물품질관리원 시험연구소 품질조사과장으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 농산물 분야 품질관리이다.
- 홍지화** 건국대학교 원예과학과를 졸업하고, 서울대학교 원예학과에서 석사학위를 취득하였으며 건국대학교 분자생명공학과에서 박사 학위를 취득하였다. 현재 국립농산물품질관리원 시험연구소 품질조사과에서 연구기획팀장으로 재직 중이며 주요 관심분야는 농업분야에서의 빅데이터 분석 과제 발굴 및 분석 연구이다.