pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 41, No. 3, pp. 180~190 (2026)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2026.41.3.180

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

생식용채소의 잔류농약 제거를 위한 효과적인 세척법

임윤선* · 김선회 · 여은영 · 염미숙 · 신민정 · 박병규 · 오성숙 · 장진섭
인천광역시보건환경연구원 삼산농산물검사소

Effective Washing Methods for Removal of Pesticide Residues in Raw-Eaten Vegetables

Yun-Sun Im*, Sun-Hoi Kim, Eun-Young Yeo, Mi-Sook Yeom, Min-Jung Shin, Byung-Kyu Park, Sung-Suck Oh, Jin-Seob Jang
Samsan Agricultural Products Inspection Center, Incheon Metropolitan City Institute of Public Health and Environment, Incheon, Korea

(Received December 19, 2025/Revised May 4, 2026/Accepted May 15, 2026)

ABSTRACT - In this study, we analyzed 190 samples (nine types) of raw-eaten vegetables collected from the Samsan Agricultural Products Wholesale Market in Incheon and online retailers to evaluate the removal efficiency of pesticide residues after washing. The samples were washed with five washing solutions (tap water, 0.15% fruit and vegetable wash, 1% salt, 1% vinegar, and 0.5% baking soda) by shaking for 1 min, rinsed under running water for 1 min, and analyzed with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS/MS) and liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) by using the QuEChERS multiresidue method. The mean removal efficiency of the fruit and vegetable wash was the highest (76.1±13.6%), although no significant differences were found among the washing solutions (P>0.05). The mean removal efficiencies of individual pesticide residues showed that 14 compounds had values above 70%, whereas seven compounds had values below 60%. In this study, the efficiency of pesticide residue removal from agricultural products currently in circulation was evaluated under realistic conditions. Our findings may provide basic data to raise awareness of the importance of pesticide-residue management among consumer-relevant organizations such as the Rural Development Administration (RDA) and farmers.

Key words: Pesticide residues, Washing solutions, Removal efficiency, Raw-eaten vegetables

농약은 해충, 병원균, 잡초를 방제하여 농작물의 피해를 예방하고 수확량과 품질을 향상시키는 데 필수적인 수단으로 사용되어 왔다. 또한 농약은 환경적 스트레스 요인으로부터 작물을 보호하여 농업 생산의 안정성을 유지하고, 농업 경영의 경제적 효율성을 높이는 데 기여하고 있다[1]. 특히 인구 증가와 식량 수요 확대, 기후변화로 인한 병해충 발생의 불확실성 증대는 농약 사용의 필요성을 더욱 가속화시켜 왔다.

*Correspondence to: Yun-Sun Im, Samsan Agricultural Products Inspection Center, Incheon Metropolitan City Institute of Public Health and Environment, Incheon 21320, Korea
Tel: +82-32-440-5603, Fax: +82-32-440-8801
E-mail: yunsun83@korea.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal 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.

그러나 농약의 사용은 인체 건강과 환경에 잠재적 위험을 수반한다. 농산물 섭취 과정에서 농약 잔류물이 인체에 노출될 수 있으며 장기적으로 암, 신경계 질환, 내분비계 교란, 면역계 이상 등 다양한 부작용을 유발할 수 있음이 보고되었다[2,3]. 또한 농약 잔류물은 토양과 수질을 오염시키고 비표적 생물에 영향을 미쳐 생태계의 균형을 교란할 수 있다고 알려져 있다[4]. 이러한 점에서 농약 잔류물은 소비자 건강뿐만 아니라 환경적 차원에서도 관리가 필요한 중요한 위험 요인으로 간주되어 각국은 잔류농약에 대한 규제를 강화하고 있다. 유럽연합(European Union, EU)은 비교적 엄격한 최대잔류허용기준(maximum residue limits, MRLs)을 설정하고 있으며 국제식품규격위원회(Codex Alimentarius Commission, CAC) 또한 국제 교역의 조화를 고려한 기준을 제시하고 있다[5]. 우리나라 식품의약품안전처(Ministry of Food and Drug Safety, MFDS)는 2019년 1월부터 유럽연합과 일본에서 시행 중인 Positive List System

(PLS)를 도입하여 등록되지 않은 농약의 경우 최대잔류허용기준을 0.01 mg/kg으로 일률적으로 적용하고 있다[6]. PLS 제도는 과도한 농약 노출을 방지하고 국제적 기준과의 정합성을 확보하는 데 기여하고 있으며 식품 안전성 강화와 국민 건강 보호를 위한 핵심적인 관리 체계로 평가되고 있다[7]. 그럼에도 불구하고 최근 식품 안전사고와 농산물 부적합 사례가 보고되면서 농약 잔류 관리에 대한 사회적 요구는 여전히 증가하고 있다. 이는 제도적 규제 강화만으로는 충분하지 않음을 보여주며 소비자가 실제로 체감할 수 있는 잔류농약 저감 방안에 대한 연구의 필요성을 더욱 부각시키고 있다.

식물에 부착된 농약은 광선에 의한 분해, 강수에 의한 제거, 대기 중 확산, 식물체 내 대사와 가수분해 과정을 거쳐 소실되며 시간이 경과하거나 세척 과정을 거치면서 대부분 감소하는 것으로 알려져 있다[8]. 물 세척은 가장 단순한 방법으로 일부 수용성 농약은 비교적 쉽게 제거되지만 지용성 또는 침투성이 강한 농약은 제거 효율이 낮은 것으로 보고되었다[9]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 식초, 소금, 베이킹소다 등의 천연물질이나 전해수·오존수와 같은 물리·화학적 처리 기술을 이용한 연구도 이루어지고 있다[10,11]. 그러나 대부분의 연구는 인위적으로 농약을 처리한 농산물을 대상으로 수행되어 실제 유통 환경을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 인천 삼산농산물도매시장 및 온라인 마켓에서 유통되는 생식용채소를 대상으로 가정에서 흔히 사용하는 다섯 가지 세척 용액(수돗물, 과일·채소용 세척제, 소금, 식초, 베이킹소다)의 잔류농약 제거 효과를 평가하였다. 다양한 농약이 검출되는 실제 유통 환경을 반영하여 소비자가 일반적으로 사용하는 세척 방법의 효과를 검증하고 소비자의 식품 안전 확보를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

Materials and Methods

실험재료

본 연구에서는 잔류농약의 세척 효과를 평가하기 위해 2024년 삼산농산물검사소에서 자체 수거한 생식용채소 9품목(상추, 시금치, 들깻잎, 쑥갓, 부추, 치커리(잎), 참나물, 케일, 겨자채) 642건의 잔류농약 모니터링 결과를 기초자료로 활용하였다. 이 중 잔류농약이 0.1 mg/kg 이상 검출되거나 부적합 판정을 받은 65건을 세척 제거율 실험 대상으로 최종 선정하였다.

표준품 및 시약

Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS/MS) 249종과 liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) 226종을 포함하여 총 475종의 농약 성분을 분석하였으며 농약 표준품은 Accustandard (New Haven, CT, USA)의 순도가 확인된 제품을 사용하였다. 농약 추출을 위해 acetonitrile (ACN, Honeywell, Muskegon, MI, USA), methanol (Honeywell), water (Honeywell, Ulsan, Korea)를 사용하였으며 formic acid는 (≥99%, Fluka, Basel, Switzerland), ammonium acetate는 Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA)를 사용하였다. 시료의 추출 및 정제는 QuEChERS kit (CHROMAtific, Heidenrod, Germany)를 사용하였으며 extraction kit ($MgSO_4$ 4 g, NaCl 1 g, Na_3Citrate 1 g, Na_2HCitrate 0.5 g)와 primary and secondary amine (PSA) kit (PSA 25 mg, $MgSO_4$ 150 mg)를 사용하였다.

시료 세척방법

수돗물, 0.15% (v/v) 과일·채소용 세척제 용액, 1% (w/v) 소금용액, 1% (v/v) 식초용액, 0.5% (w/v) 베이킹소다 용액 5종의 세척액을 사용하였다. 제조한 세척액과 시료를 플라스크에 넣고 60초간 저어주면서 침지하였다. 이후 시료를 2 L 용기에 옮겨 담아 60초 동안 2-3회 반복 세척하였으며 세척이 완료된 시료는 탈수기를 이용해 물기를 최대한 제거한 후 샘플링을 수행하였다.

잔류농약 제거율은 아래와 같이 계산하였다.

$$\text{잔류농약 제거율 (\%)} = \frac{\text{세척 전 농도} - \text{세척 후 농도}}{\text{세척 전 농도}} \times 100$$

추출 및 정제

시료의 전처리는 식품공전(7.1.2.2) 다성분 시험법 제2법(QuEChERS)에 따라 수행하였다. 검체 100 g을 균질화한 후 약 10 g을 취하여 50 mL 원심분리관에 넣고 ACN 10 mL를 가하여 1분간 강하게 교반하였다. $MgSO_4$ 4 g, NaCl 1 g, Na_3Citrate 1 g, Na_2HCitrate 0.5 g을 넣고 1분간 강하게 흔들어 섞은 다음 4°C, 4000×g에서 10분간 원심분리하였다. 상층액 1 mL을 PSA 25 mg, $MgSO_4$ 150 mg이 미리 담겨 있는 2 mL 원심분리관에 넣고 30초간 강하게 흔들어 섞은 다음 5분간 원심분리한 후 상층액을 PTFE 멤브레인 필터(0.2 μm)로 여과하여 시험용액으로 사용하였다. 잔류농약 분석은 GC-MS/MS (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)와 LC-MS/MS (Thermofisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 사용하였으며 475종을 분석하기 위한 장비의 세부분석 조건은 Table 1-2와 같다.

유효성 검증

분석방법에 대한 유효성 검증은 생식용채소에서 검출된 27종의 농약을 대상으로 수행하였으며 식품공전 잔류농약 분석법 해설서에 따라 진행하였다[12]. 회수율 실험은 잔류농약이 검출되지 않은 생식용채소에 표준용액을 첨가한 뒤 동일한 시험법으로 3회 반복 분석하였다. 검출한계(limit

Table 1. Analytical conditions of GC-MS/MS

Parameters	Conditions
Instrument	GC-MS/MS system (Agilent Technologies, 7890 GC/7000D MS/MS, Santa Clara, CA, USA)
Column	Agilent DB-5MS (0.25 mm×30.0 m, 0.25 μm)
Injection volume	1 μL
Flow rate	Carrier gas: He, 0.8 mL/min Collision flow: N_2, 1 mL/min Quench flow: He, 4 mL/min
Injection temperature	260°C
Split mode	Splitless
Oven temperature	60°C (0 min)→180°C (6 min)→300°C (30 min)
Ion source temperature	280°C

Table 2. Analytical conditions of LC-MS/MS

Parameters	Conditions
Instrument	LC-MS/MS system (Vanquish UHPLC-TSQ Altis Plus, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)
Column	Hypersil GOLD C18 (2.1 mm×100 mm, 1.9 μm, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)
Injection volume	2 μL
Mobile phase	A: 0.1% formic acid+5 mM ammonium acetate in H_2O B: 0.1% formic acid+5 mM ammonium acetate in MeOH
Gradient condition (% B)	90% (0 min)→40% (2.5 min)→5% (9 min)→held at 5% for 3 min→90% (12.1 min)→90% (15 min)
Flow rate	0.3 mL/min
Column temperature	40°C
Ion source	electrospray ionization (ESI), positive mode (3,000 V)
Scan range	50-1,650 *m/z*

of detection, LOD) 및 정량한계(limit of quantification, LOQ)는 국제의약품규제조화위원회(International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use, ICH)에 따라 산출하였으며[13], 검출된 잔류농약 27종에 대해서는 회귀직선으로부터 얻은 기울기(S)와 잔차의 표준편차(δ)를 이용하여 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$LOD = 3.3(\delta/S)$$
$$LOQ = 10(\delta/S)$$

δ=The standard deviation of the response
S=The slope of the calibration curve

통계분석

모든 데이터 분석은 SPSS version 27 (IBM, Chicago, IL, USA)을 사용하여 수행하였다. 각 세척 방법에 대해 반복 실험 데이터의 평균과 표준편차를 산출하였다. 모든 데이터의 통계적 유의성은 일원배치 분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)으로 검정한 후, $P<0.05$ 수준에서 사후검정으로 Tukey's HSD를 이용하여 분석하였다.

Results and Discussion

유효성 검증

본 연구에서 검출된 잔류농약 27종의 유효성 검증 결과는 Table 3와 같다. 회수율은 84.0-103.7%로 trifloxystrobin이 84.0%로 가장 낮고 flutolanil이 103.7%로 가장 높았다. 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)는 0.7-7.4%를 나타냈다. 검량선에 대한 직선성의 결정계수(R^2)은 0.9962-0.9999로 양호한 직선성을 보였으며 LOD는 0.001-0.006 mg/kg, LOQ는 0.002-0.017 mg/kg으로 나타났다. 식품공전 잔류농약 시험법 실무해설서(제6판)[14]에서 Codex 농도 수준에 따른 회수율 및 정밀도의 오차범위를 만족할 경우 유효성 검증이 충분한 것으로 규정하고 있으며 본 실험의 회수율 및 정밀도는 해당 농도 수준의 기준 범위를 충족하여 적합하게 수행되었다고 판단되었다.

생식용 채소 중 농약 잔류

삼산 및 남촌농산물도매시장에서 2021년부터 2023년까지 수거된 채소류의 잔류농약 실태조사 결과(Table 4,5) 엽채류에서 65.6-71.4%의 높은 검출률을 보였으며 들깻잎과

Table 3. Recovery, LOD and LOQ of pesticide residues

Pesticides	Recovery (%)	RSD (%)	Correlation coefficient (R^2)	LOD[1)] (mg/kg)	LOQ[2)] (mg/kg)
Azoxystrobin	102.0	2.4	0.9998	0.001	0.003
Benthiavalicarb-isopropyl	102.7	1.2	0.9997	0.001	0.002
Carbendazim	84.3	0.8	0.9997	0.002	0.005
Chlorantraniliprole	99.3	2.1	0.9997	0.001	0.002
Clothianidin	95.7	1.5	0.9997	0.001	0.002
Cyantraniliprole	103.2	2.4	0.9997	0.001	0.003
Cyazofamid	101.3	1.5	0.9995	0.001	0.002
Cyclaniliprole	103.2	2.4	0.9995	0.001	0.003
Cyenopyrafen	103.0	1.7	0.9994	0.002	0.007
Cyflumetofen	84.3	0.7	0.9993	0.006	0.017
Emamectin benzoate	98.0	5.3	0.9991	0.001	0.002
Etofenprox	99.0	4.4	0.9984	0.002	0.006
Fenpyroximate	98.7	2.2	0.9981	0.001	0.002
Fluazinam	103.3	3.0	0.9980	0.001	0.004
Flubendiamide	84.3	6.6	0.9979	0.004	0.013
Fludioxonil	84.3	7.2	0.9979	0.005	0.016
Flutolanil	103.7	1.1	0.9977	0.001	0.002
Fluxametamide	93.8	2.7	0.9970	0.001	0.002
Mandipropamid	89.7	4.3	0.9969	0.002	0.007
Metaflumizone	97.3	2.4	0.9965	0.003	0.008
Spinetoram	101.4	7.4	0.9964	0.002	0.006
Diethofencarb	90.3	3.0	0.9962	0.001	0.003
Fluquinconazole	89.3	3.6	0.9999	0.003	0.009
Fluxapyroxad	89.3	6.0	0.9998	0.002	0.007
Buprofezin	88.3	1.3	0.9996	0.002	0.006
Paclobutrazol	90.7	4.1	0.9992	0.002	0.006
Trifloxystrobin	84.0	6.1	0.9978	0.001	0.002

[1)]LOD: Limit of detection.
[2)]LOQ: Limit of quantification.

Table 4. Pesticide residues by vegetable group from Samsan and Namchon wholesale markets (2021-2023)

Rank	Category	2021 (No. of detections, %)	2022 (No. of detections, %)	2023 (No. of detections, %)
1	Leafy vegetables	220 (71.4)	554 (66.9)	622 (65.6)
2	Stalk and stem vegetables	51 (16.6)	126 (15.2)	145 (15.3)
3	Fruiting vegetables other than cucurbits	23 (7.5)	107 (12.9)	123 (13.0)
4	Fruiting vegetables, cucurbits	6 (1.9)	25 (3.0)	47 (5.0)
5	Root and tuber vegetables	5 (1.6)	8 (1.0)	6 (0.6)
6	Flowerhead brassicas	3 (1.0)	8 (1.0)	5 (0.5)

상추는 검출 및 부적합 건수에서 3년 연속 상위권을 차지하였다. 농산물 중 잔류농약 부적합 판정은 2024년 식품 기준 및 규격 [별표4] 잔류농약 허용기준을 초과한 경우에 적용하였다[15].

Table 5. Pesticide residues detection in top-ranked vegetables from Samsan wholesale markets (2021-2023)

Year	Rank	Commodity	No. of detections	No. of violations
2021	1	Perilla leaves	34	1
	2	Chinese chives	28	2
	3	Lettuce	28	3
2022	1	Perilla leaves	86	7
	2	Lettuce	74	4
	3	Winter cabbage	55	1
2023	1	Perilla leaves	103	10
	2	Lettuce	101	7
	3	Chili pepper	92	9

Table 6. Pesticide residues detection and violation in raw-eaten vegetables (2024)

Commodity	No. of samples	No. of detections	No. of violations
Lettuce	154	46	4
Spinach	128	38	4
Perilla leaves	104	65	3
Crown daisy	78	22	1
Chinese chives	69	26	2
Chicory(leaves)	73	12	1
Chamnamul	27	15	2
Kale	8	5	1
Mustard green	1	1	1
Total	642	230	19

2021년부터 2023년까지 농산물 잔류농약 분석결과, 검출률이 높고 부적합이 자주 발생하여 소비자 노출 위험이 높은 생식용채소 상추, 시금치, 들깻잎, 쑥갓, 부추, 치커리(잎), 참나물, 케일, 겨자채 9품목을 선정하였으며 2024년 삼산농산물검사소에서 자체 수거한 해당 9품목의 잔류농약 검출 및 부적합 현황은 Table 6과 같다. 총 642건의 시료 중 230건(35.8%)에서 잔류농약이 검출되었으며 부적합 건수는 총 19건으로 전체의 3.0%를 차지하였다. 품목별 검사건수는 상추, 시금치, 들깻잎 순으로 많았으며 검출률은 겨자채 100.0%, 들깻잎 62.5%, 케일 62.5%, 참나물 55.6%, 부추 37.7%, 상추 29.9%, 시금치 29.7%, 쑥갓 28.2%, 치커리(잎) 16.4% 순으로 나타났다. 이 중 잔류농약 검출농도가 0.1 mg/kg 이상이거나 부적합 판정을 받은 65건을 세척 제거율 평가를 위한 최종 실험재료로 선정하였다. 선정된 65건의 농산물에서 총 27종의 잔류농약이 검출되었으며(Table 7) 이를 대상으로 5종의 세척 용액을 이용한 제거율 실험을 수행하였다.

Table 7. Detected pesticides and mean removal efficiencies in nine raw-eaten vegetables

Category	Commodity	Detected pesticides	No. of detections	Mean removal efficiency (%)
Leafy vegetables	Perilla leaves	Azoxystrobin	5	70.4±10.2
		Benthiavalicarb-isopropyl	1	
		Clothianidin	2	
		Cyantraniliprole	1	
		Cyclaniliprole	1	
		Cyenopyrafen	3	
		Cyflumetofen	1	
		Fenpyroximate	2	
		Fluxapyroxad	1	
		Mandipropamid	1	
	Lettuce	Carbendazim	2	78.3±10.7
		Cyclaniliprole	1	
		Emamectin benzoate	1	
		Flubendiamide	1	
		Fluxametamide	1	
		Spinetoram	3	
	Spinach	Azoxystrobin	3	70.9±13.1
		Carbendazim	1	
		Chlorantraniliprole	4	
		Cyazofamid	2	
		Cyflumetofen	1	
		Flutolanil	1	
		Fluxametamide	2	

Table 7. (Continued) Detected pesticides and mean removal efficiencies in nine raw-eaten vegetables

Category	Commodity	Detected pesticides	No. of detections	Mean removal efficiency (%)
Leafy vegetables	Chamnamul	Carbendazim	1	72.5±14.0
		Diethofencarb	1	
		Fludioxonil	1	
	Crown daisy	Azoxystrobin	1	72.8±10.4
		Metaflumizone	1	
	Mustard green	Metaflumizone	1	55.9±10.0
		Paclobutrazol	1	
	Chicory (leaves)	Chlorantraniliprole	1	87.7±5.0
		Fludioxonil	1	
	Kale	Cyantraniliprole	1	68.5±15.8
		Cyazofamid	1	
		Fluquinconazole	1	
		Paclobutrazol	3	
Stalk and stem vegetables	Chinese chives	Buprofezin	1	63.4±17.4
		Cyantraniliprole	1	
		Etofenprox	1	
		Fluazinam	1	
		Fludioxonil	1	
		Fluxametamide	3	
		Trifloxystrobin	1	
Total		27	65	

품목별 제거율

생식용채소 9품목을 수돗물, 1% 식초용액, 0.5% 베이킹소다용액, 1% 소금용액, 0.15% 과일·채소용 세척제 용액을 이용하여 세척 후 품목별 검출된 농약의 종류와 제거율을 확인하였다.

5종의 세척액에 대한 품목별 제거율의 결과는 Table 7과 같다. 치커리(잎)가 87.7±5.0%로 가장 높았고 상추는 78.3±10.7%, 쑥갓은 72.8±10.4%, 참나물은 72.5±14.0%, 시금치는 70.9±13.1%, 들깻잎은 70.4±10.2%로 70% 이상의 제거율을 보였으나 케일은 68.5±15.8%, 부추는 63.4±17.4%, 겨자채는 55.9±10.0%의 제거율을 나타냈다.

수돗물 세척만으로도 치커리(잎)는 87.2±5.4%, 상추는 77.0±10.8%로 높은 제거율을 보였으나 겨자채는 50.4±13.7%, 부추는 64.1±16.6%로 낮은 제거율을 보였다. 시금치

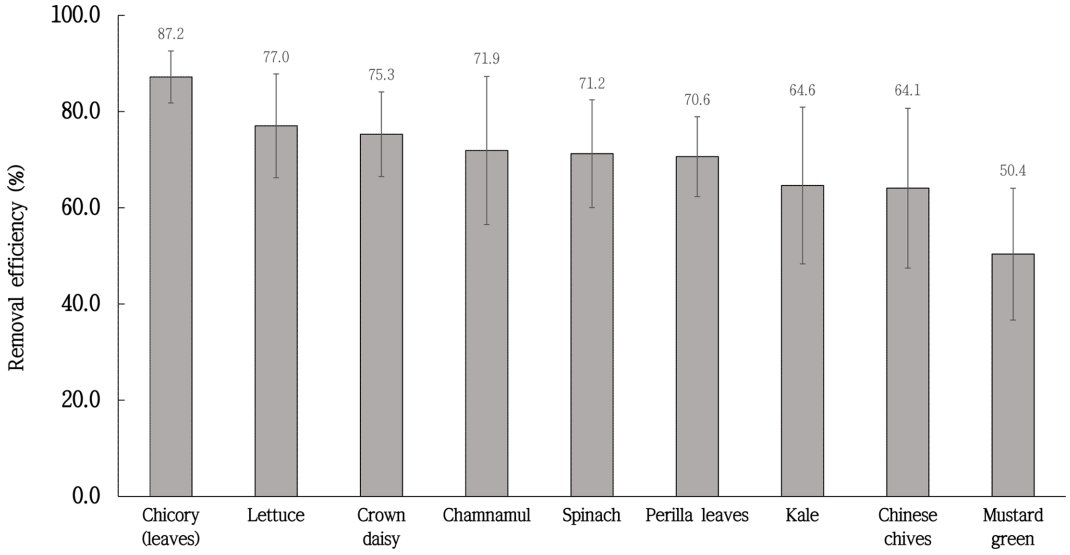

Fig. 1. Removal efficiency of pesticide residues in nine raw-eaten vegetables by tap water washing. Values are expressed as the mean±SD of triplicate experiments (n=3).

71.2±11.2%, 들깻잎 70.6±8.3%, 쑥갓 75.3±8.8%, 참나물 71.9±15.4%, 케일은 64.6±16.3%의 제거율을 보였다(Fig. 1).

본 연구에서 상추가 77.0±10.8%로 높은 제거율을 보였는데 이는 잎이 크고 평평한 채소일수록 세척 과정에서 물리적 마찰과 세정액의 접촉이 고르게 이루어져 농약이 잘 제거된 것으로 판단된다. 치커리는 잎이 좁고 주름이 깊음에도 불구하고 87.2±5.4%의 높은 제거율을 보였는데 이는 치커리에서 검출된 농약이 2종에 불과하여 제거율을 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다고 여겨진다. Myung 등[16]의 보고에 따르면 들깻잎은 단순 수돗물 세척만으로도 일부 지용성 농약에서 30-50% 제거율을 보고한 바 있으나, 본 실험에서는 약 70%의 제거율을 나타내었다. 부추의 경우 64.1±16.6%로 제거율이 낮았는데 Zhang 등[17]의 연구에 따르면 부추는 잔류농약 감소가 완만하고 비교적 오래 남을 수 있다고 보고 하였다. 부추는 잎이 가늘고 매끈하며 표면 왁스층이 발달해 지용성 농약이 잘 흡착되는 특성이 있으며 겨자채는 잎이 두껍고 주름이 많아 굴곡부위에 농약이 잔류하기 쉬운 특성이 있어 낮은 제거율을 보인 것으로 판단된다. 본 실험에서는 채소의 형태적 특성과 농약의 물리·화학적 성질이 제거 효율에 중요한 영향을 미치는 것으로 보이며 일부 품목에서는 표준편차가 크게 나타났는데 이는 세척·침지·탈수 과정에서 실험자 간 숙련도 차이에 일부 기인한 것으로 판단된다.

세척용액별 제거율

세척용액별 9품목의 생식용채소에 대한 잔류농약의 제거율은 Fig. 2와 같다. 치커리(잎)는 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 92.4±0.8%로 가장 높았으며 1% 소금용액 89.8±0.7%, 1% 식초용액 85.1±4.8%, 수돗물 87.2±5.4%, 0.5% 베이킹소다 용액 84.2±4.9% 순으로 나타나 모든 세척 방법에서 84% 이상의 높은 제거율을 보였으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±3.0%였다. 상추는 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 83.2±9.2%로 가장 높았고 1% 소금용액 77.5±11.8%, 1% 식초용액 77.5±9.8%, 수돗물 77.0±10.8%, 0.5% 베이킹소다 용액 76.4±10.1% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±2.4%였다. 쑥갓은 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 83.6±5.2%로 가장 높았고 수돗물 75.3±8.8%, 1% 소금용액 68.4±9.2%, 1% 식초용액 67.7±8.7%, 0.5% 베이킹소다 용액 69.1±10.0% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±6.0%로 가장 크게 나타났다. 참나물은 1% 소금용액에서 76.6±11.6%로 가장 높았고 0.5% 베이킹소다 용액 73.8±11.2%, 0.15% 과일·채소용 세척제 용액 72.4±11.3%, 수돗물 71.9±15.4%, 1% 식초용액 68.0±18.0% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±2.8%였다. 시금치는 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 81.6±10.6%로 가장 높았고 수돗물 71.2±11.2%, 1% 소금용액 68.0±14.2%, 1% 식초용액 66.9±9.7%, 0.5% 베이킹소다 용액 66.8±12.9% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±5.5%였다. 들깻잎은 0.15% 과일·채소용 세척제 용액과 1% 소금용액에서 각각 72.0±10.3%로 가장 높았고 수돗물 70.6±8.3%, 0.5% 베이킹소다 용액 69.1±10.8%, 1% 식초용액 68.5±10.6% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±1.5%로 가장 작아 모든 방법에서 유사한 세척 효과를 보였다. 케일은 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 72.0±13.6%로 가장 높았고 1% 소금용액 68.9±15.5%, 0.5% 베이킹소다 용액 69.6±15.9%, 1% 식초용액 67.3±14.2%, 수돗물 64.6±16.3% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±2.5%였다. 부추는 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 71.3±18.8%로 가장 높았고 수돗물 64.1±16.6%, 1% 소금용액 60.3±16.2%, 1% 식초용액 60.7±17.5%, 0.5% 베이킹소다 용액 60.9±14.9% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±4.1%였다. 겨자채는 0.15% 과일·채소용 세척제 용액에서 63.5±0.2%로 가장 높았고 1% 식초용액 57.5±7.2%, 0.5% 베이킹소다 용액 54.7±11.1%, 1% 소금용액 53.4±6.2%, 수돗물 50.4±13.7% 순으로 나타났으며 세척 방법 간 제거율의 표준편차는 ±4.4%였다. 수돗물과 과일·채소용 세척제는 생식용채소 9품목 중 치커리, 상추, 쑥갓에서 75.3% 이상의 높은 제거율을 보였다. 베이킹소다 용액과 1% 소금용액은 치커리, 상추, 참나물에서 73.8 % 제거율을 보였고 1% 식초용액은 치커리, 상추, 들깻잎에서 68.5% 이상의 제거율을 보였다. 부추, 상추, 시금치, 치커리에서 0.15% 과일·채소용 세척제 용액의 농약 제거율이 나머지 세척 용액에 비해 유의적으로 높았으며(P<0.05) 그 외 겨자채, 들깻잎, 쑥갓, 참나물, 케일에서는 세척 용액 간 유의적인 차이가 없었다(P>0.05).

세척용액 5종의 전체 잔류농약 평균 제거율은 Fig. 3과 같다. 전체 제거율 범위는 68.3-76.1%로 나타났으며 대부분의 세척용액에서 잔류농약이 감소하였다. 세척용액별 제거율은 0.15% 과일·채소용 세척제 용액이 가장 높은 76.1±13.6%의 제거율을 보였고 수돗물 70.1±14.1%, 1% 소금용액 70.0±14.7%, 0.5% 베이킹소다 용액 68.8±13.8%, 1% 식초용액 68.3±13.9% 순으로 나타났다. 세척용액별 제거율은 다소 차이가 있었으나 통계적으로 유의하지 않았다(P>0.05). 케일과 청경채에서 chlorpyrifos와 cypermethrin을 대상으로 다양한 세척 방법을 비교한 결과 수돗물 세척만으로도 약 52.7-65.4% 및 51.1-66.3%의 제거율을 보였으며 소금 및 베이킹소다 용액에서도 저감 효과가 보고되었다[18]. 또한 상추에서 boscalid, pyraclostrobin 등 5종 농약을 대상으로 수돗물, 식초용액, 베이킹소다 용액, 소금용액과 초음파 세척방법을 비교한 결과 모든 세척 방법이 잔류농약을 제거하는데 효과적이었지만 통계적으로 유의하지 않았다고 보고된 바 있어[19] 본 실험과 유사한 결과를 보였다. Tiryaki와 Flores 등은 다양한 과일과 채소를

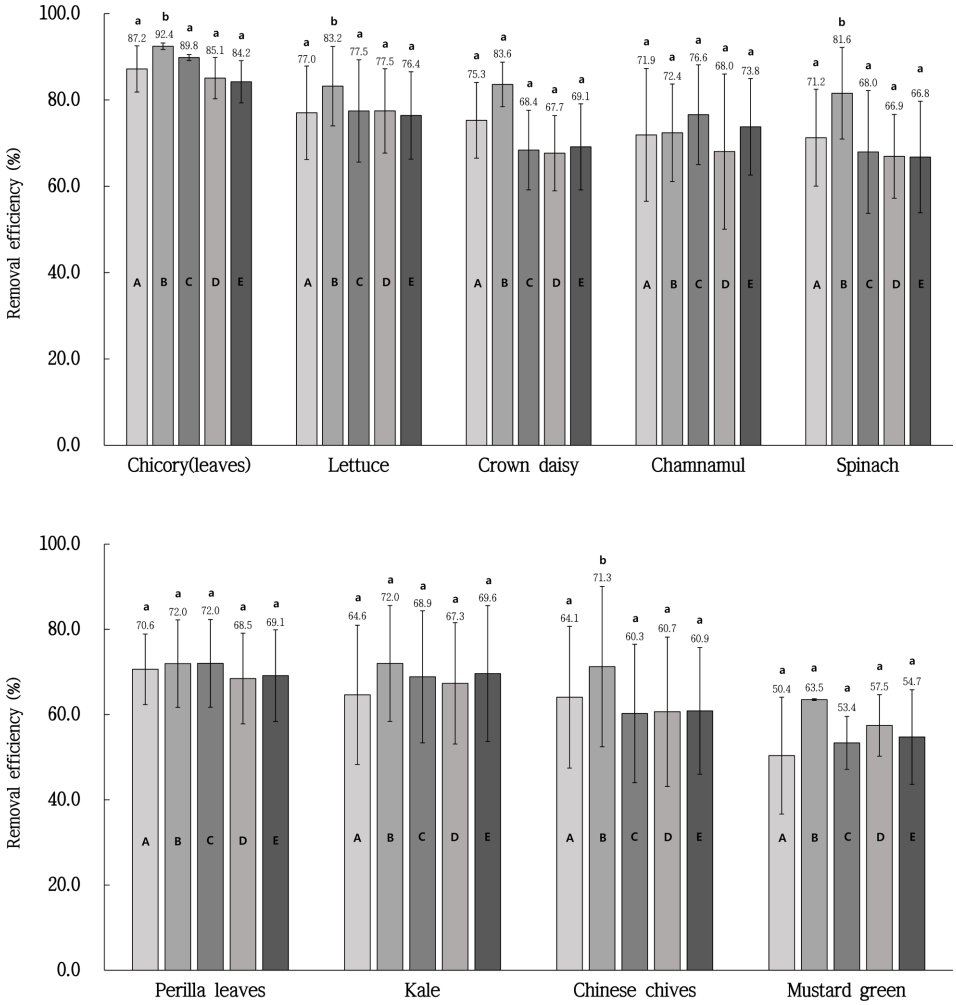

Fig. 2. Comparison of removal efficiencies of nine raw-eaten vegetables washed with different solutions. Values are expressed as the mean±SD of triplicate experiments (n=3). (A) Tap water, (B) 0.15% fruit and vegetable wash, (C) 1% salt solution, (D) 1% vinegar solution, and (E) 0.5% baking soda solution. Different letters above bars indicate significant differences among washing solutions within each vegetable (P<0.05).

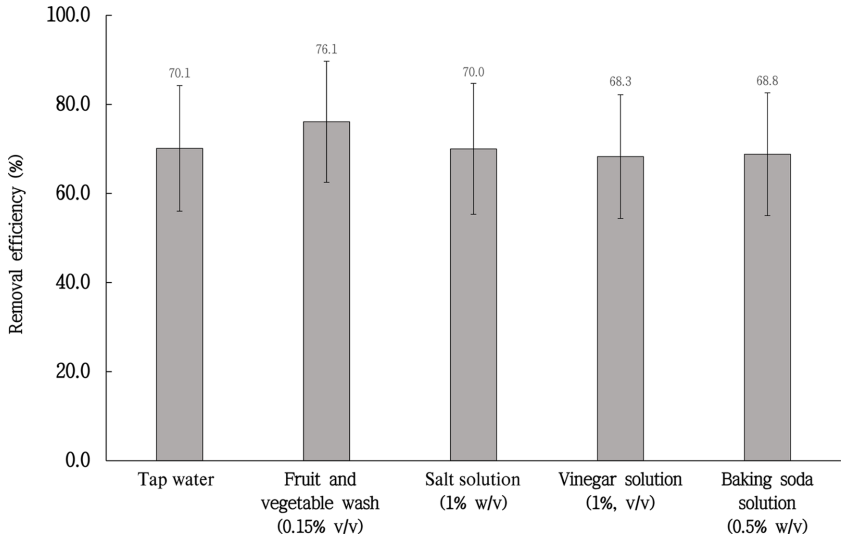

Fig. 3. Removal efficiencies of pesticide residues by different washing solutions. Values are expressed as the mean±SD of triplicate experiments (n=3). No significant differences were observed among treatments (P>0.05).

대상으로 수돗물, 소금용액, 베이킹소다 용액, 식초용액 등을 이용한 가정에서의 일반적인 세척 방법과 세척 시간에 따라 20-80% 제거율을 보고 하였다[20,21]. 따라서 가정에서 흔히 사용되는 세척 용액들이 평균적으로 약 70% 내외의 농약 제거가 가능할 것으로 판단된다.

농약 성분별 제거율

검출된 27종의 잔류농약에 대한 세척액 5종의 평균 제거율은 Table 8에 나타냈다. 대부분의 농약은 세척과정을 통해 일정 수준 이상 제거되었지만 농약의 물리·화학적 특성에 따라 유의한 차이를 보였다. 가장 높은 제거율을 보인 농약은 carbendazim으로 87.5±2.0%의 제거율을 보였다. 느타리버섯을 대상으로 수행한 연구에 따르면[22-24]흐르는 수돗물 세척 시 70.3-93.0% 감소를 보였는데 벤지이미다졸계 살균제인 carbendazim은 주로 식물 표면에 부착되어 존재하는 비침투성 농약으로 세척 시에는 물에 용해되어 제거되기보다는 표면에 부착된 잔류물이 물리적 세척력에 의해 제거된 것으로 판단되었다. 반면, buprofezin은 54.8±4.8%, fluxametamide는 56.5±14.4%, metaflumizone은 56.4±11.6%로 낮은 제거율을 보였다. 이는 지용성 농약으로 물에는 거의 녹지 않고 식물의 큐티클 왁스층과 강하게 결합하는 특성을 가지며 친수성 농약보다 훨씬 높은 소수성을 지녔기 때문이라고 판단된다. 27종 농약의 표준편차는 1.9-18.1% 범위로 나타났으며 대부분의 농약에서 10% 이내로 안정적인 재현성을 보였다.

잔류농약 평균 제거율의 구간별 검출 농약의 분포는 Table 9와 같다. 70% 이상 제거율을 나타낸 azoxystrobin, benthiavalicarb-isopropyl, carbendazim, chlorantraniliprole, cyantraniliprole, cyclaniliprole, cyenopyrafen, cyflumetofen, diethofencarb, emamectin benzoate, fluazinam, fluquinconazole,

Table 8. Mean removal efficiencies of individual pesticides detected in nine raw-eaten vegetables

No.	CAS No.	Detected pesticide	Mean reduction rate (%)
1	131860-33-8	Azoxystrobin	74.5±10.1
2	177406-68-7	Benthiavalicarb-isopropyl	81.3±3.0
3	69327-76-0	Buprofezin	54.8±4.8
4	10605-21-7	Carbendazim	87.5±2.0
5	500008-45-7	Chlorantraniliprole	76.5±16.1
6	210880-92-5	Clothianidin	57.6±3.5
7	736994-63-1	Cyantraniliprole	80.0±9.9
8	120116-88-3	Cyazofamid	56.6±7.6
9	1031756-98-5	Cyclaniliprole	82.7±10.3
10	560121-52-0	Cyenopyrafen	79.1±3.9
11	400882-07-7	Cyflumetofen	81.3±9.3
12	87130-20-9	Diethofencarb	74.6±1.9
13	155569-91-8	Emamectin benzoate	75.0±4.3
14	80844-07-1	Etofenprox	59.4±6.4
15	134098-61-6	Fenpyroximate	67.8±8.1
16	79622-59-6	Fluazinam	84.3±5.3
17	272451-65-7	Flubendiamide	65.0±4.8
18	131341-86-1	Fludioxonil	65.7±18.1
19	136426-54-5	Fluquinconazole	70.6±7.1
20	66332-96-5	Flutolanil	71.7±14.5
21	928783-29-3	Fluxametamide	56.5±14.4
22	907204-31-3	Fluxapyroxad	68.9±2.7
23	374726-62-2	Mandipropamid	59.2±5.6
24	139968-49-3	Metaflumizone	56.4±11.6
25	76738-62-0	Paclobutrazol	62.3±1.9
26	935545-74-7	Spinetoram	79.0±8.7
27	141517-21-7	Trifloxystrobin	66.6±9.1

Table 9. Distribution of detected pesticides by mean removal efficiency range

Removal Range	No. of compounds (%)	Pesticides
≥70%	14 compounds (51.9%)	Azoxystrobin, benthiavalicarb-isopropyl, carbendazim, chlorantraniliprole, cyantraniliprole, cyclaniliprole, cyenopyrafen, cyflumetofen, diethofencarb, emamectin benzoate, fluazinam, fluquinconazole, flutolanil, spinetoram
≥60% and < 70%	6 compounds (22.2%)	Fenpyroximate, flubendiamide, fludioxonil, fluxapyroxad, paclobutrazol, trifloxystrobin
< 60%	7 compounds (25.9%)	Buprofezin, clothianidin, cyazofamid, etofenprox, fluxametamide, mandipropamid, metaflumizone

flutolanil, spinetoram 14종은 대부분 비침투성 또는 표면 잔류형 농약으로 식물체 내부보다는 표피층이나 왁스층에 존재하기 때문에 세척에 의해 상대적으로 쉽게 제거되는 경향을 보였다. 60-70% 제거율을 보인 fenpyroximate, flubendiamide, fludioxonil, fluxapyroxad, paclobutrazol, trifloxystrobin 6종은 대체로 소수성이 높거나 작물의 표면뿐만 아니라 큐티클층 또는 조직 내부에 잔류할 가능성이 있다. fluxapyroxad는 카복사마이드계 살균제로 왁스층과 친화력이 높고 trifloxystrobin은 스트로빌루린계 살균제로 휘발성이 있어 표면에 강하게 결합한다. 또한 fenpyroximate는 접촉형 응애제로 수용성이 낮으며 flubendiamide는 다이아미드계 살충제로 엽내 이동성이 보고되어 있다[25]. paclobutrazol은 생장조절제로 식물체 내 자일렘 이동성을 가지며 fludioxonil은 비침투성 접촉형이지만 큐티클층과의 결합력이 강해 완전한 제거가 어려운 것으로 알려져 있다[26,27]. 60% 미만 제거율을 나타낸 buprofezin, clothianidin, cyazofamid, etofenprox, fluxametamide, mandipropamid, metaflumizone 7종은 대부분 침투성을 지니거나 높은 소수성으로 식물 내부로 침투하거나 표면과 강하게 결합하여 물리적 세척만으로는 상대적으로 제거가 어렵다고 보고되었다[28]. 세척에 의한 잔류농약의 제거율은 농약의 물리·화학적 특성과 작물 표면의 왁스층 구조 등 다양한 요인의 상호작용에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

본 연구에서 검출된 27종 중 cyclaniliprole과 fenpyroximate를 제외한 25종은 2024년 식품안전관리지침의 최근 3년간 부적합 농약 목록에 포함된 성분으로 실질적인 부적합 농약의 세척에 의한 제거율을 확인하고 실제 도매시장에서 유통 중인 농산물을 이용하여 현실적인 잔류농약 제거율을 평가한 측면에서 의의가 있다. 향후 친환경적이고 세척 효율이 높은 세척 용액의 선택과 사용을 유도하는 제도적 개선이 이루어진다면 생식채소 섭취에 따른 소비자 안전 확보와 농약 관리 체계의 과학적 기반 강화에 기여할 것으로 기대된다.

국문요약

본 연구에서는 인천 삼산농산물도매시장 및 온라인 마켓에서 유통되는 생식용채소의 세척 후 잔류농약의 제거율을 확인하기 위해 9품목 190건을 대상으로 분석하였다. 다섯 가지 세척 용액(수돗물, 0.15% 과일 및 채소 세척제, 1% 소금, 1% 식초, 0.5% 베이킹소다)으로 1분 동안 교반하며 흐르는 물에 1분간 헹군 후 QuEChERS 다성분 시험법을 이용하여 GC-MS/MS와 LC-MS/MS로 분석하였다. 세척 용액의 평균 제거율은 과일 및 채소 세척제가 76.1±13.6%로 가장 높은 제거율을 보였으나 세척 용액 간에 유의미한 차이는 없었다(P>0.05). 개별 잔류농약 평균 제거율은 carbendazim, cyclaniliprole, fluazinam 등 14종의 농약이 70% 이상인 반면, clothianidin, cyazofamid, mandipropamid 등 7종의 농약은 60% 미만으로 나타났다. 실제 유통되고 있는 농산물에서 검출된 잔류농약을 대상으로 제거율을 평가한 측면에서 의의가 크며 소비자뿐만 아니라 농촌진흥청 등 유관기관과 농민들에게 잔류농약 관리의 중요성을 인식시키는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Yun-Sun Im https://orcid.org/0009-0006-1988-0468
Sun-Hoi Kim https://orcid.org/0000-0002-5817-0825
Eun-Young Yeo https://orcid.org/0000-0003-2896-8972
Mi-Sook Yeom https://orcid.org/0000-0001-9771-2992
Min-Jung Shin https://orcid.org/0009-0002-6595-5695
Byung-Kyu Park https://orcid.org/0000-0002-1010-3244
Sung-Suck Oh https://orcid.org/0000-0002-3867-6271
Jin-Seob Jang https://orcid.org/0000-0002-5375-5947

References

1. Cooper, J., Dobson, H., The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Prot.*, **26**, 1337-1348 (2007).

2. Mnif, W., Hassine, A.I.H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., Roig, B., Effect of endocrine disruptor pesticides: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, **8**, 2265-2303 (2011).
3. Xie, P.P., Zong, Z.Q., Qiao, J.C., Li, Z.Y., Hu, C.Y., Exposure to pesticides and risk of colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Pollut.*, **345**, 123530 (2024).
4. Akhtar, M.W., Sengupta, D., Chowdhury, A., Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol.*, **2**, 1-12 (2009).
5. Shingal, A., Ehrich, M., The EU's pesticides MRLs harmonization: effect on trade, prices and quality. *Food Policy.*, **125**, 102634 (2024).
6. Oh, J.K., Kim, J.H., An, G.E.H., Chang, H.R., Simultaneous determination of six acidic pesticides, including 2,4-DB and 2,4,5-T with no established MRL in Korea using LC-MS/MS and QuEChERS for the safety of imported agricultural products. *Foods*, **14**, 904 (2025).
7. Kim, H.H., Han, Y., Lee, H.H., Yang, Y., Cho, S., Park, J., Kim, D., Kim, A.G., Park, D., Mun, S., Yang, S., Kim, H., Lim, S., Cho, B.S., Kee, H.Y., Monitoring of positive list system on residual pesticides analysis of agricultural products in Southwest of Korea. *Agric. Res. Technol. Open Access J.*, **27**, 556368 (2022).
8. Park, E.S., Ahn, Y.J., Han, U.K., Lee, Y.J., Kim, H.G., Removal effect of dithiocarbamates pesticide (mancozeb) residues in agricultural products by washing methods. *Korean J. Pestic. Sci.*, **25**, 407-414 (2021).
9. Balkan, T., Yılmaz, Ö., Efficacy of some washing solutions for removal of pesticide residues in lettuce. *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.*, **11**, 143 (2022).
10. Studziński, W., Narloch, I., Dąbrowski, Ł., Removal of pesticides from lemon and vegetables using electrolyzed water kitchen devices. *Molecules*, **29**, 5797 (2024).
11. Yang, S.J., Mun, S., Kim, H.J., Han, S.J., Kim, D.W., Cho, B.S., Kim, A.G., Park, D.W., Effectiveness of different washing strategies on pesticide residue removal: the first comparative study on leafy vegetables. *Foods*, **11**, 2916 (2022).
12. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2017. Analytical manual for pesticide residues in foods, 5th ed, Cheongju, Korea, pp. 78-82.
13. The International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use (ICH), (2022, April 20). Quality guidelines, validation for analytical procedures. Retrieved from https://database.ich.org/sites/default/files/Q2_R1_Guideline.pdf
14. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2022. Practical commentary on analytical methods for pesticide residues in foods, 6th ed, Cheongju, Korea, pp. 221-224.
15. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2024. Food code (Notice no. 2024-4), Cheongju, Korea. pp. 413-594.
16. Myung, S.W., Comparative study on the efficiency of pesticide residue removal in foods (Perilla leaves, strawberries, apples). *Anal. Sci. Technol.*, **37**, 1-11 (2024).
17. Zhai, R., Zhang, K., Chen, G., Liu, G., Huang, X., Gao, M., Zhou, J., Xu, X., Li, L., Zhang, Y., Wang, J., Jin, M., Xu, D., Abd El-Aty, A.M., Residue, dissipation pattern, and dietary risk assessment of imidacloprid in Chinese chives. *Front. Nutr.*, **9**, 846333 (2022).
18. Tongjai, P., Hongsibsong, S., Sapbamrer, R., The efficiency of various household processing for removing chlorpyrifos and cypermethrin in Chinese kale and Pakchoi. *Qual. Assur. Saf. Crops Foods.*, **13**, 45-52 (2021).
19. Alonzo, N., do Carmo, H., Paullier, A.P., Santos, I., Mattos, B., Irazoqui, M., Pareja, L., Effects of cleaning procedures on the concentration of pesticide residues on crisp fresh-cut lettuce (cv. Vera). *Biol. Life Sci. Forum*, **6**, 53 (2021).
20. Tiryaki, O., Polat, B., Effects of washing treatments on pesticide residues in agricultural products. *Gida ve Yem Bilim-Teknol. Derg.*, **29**, 1-11 (2023).
21. Flores Takahashi, J.S., Schwantes, D., Gonçalves Jr., A.C., Fuentealba, D., Valdés Gómez, H., Bortolato Piccioli, A.F., Efficiency of combined techniques in pesticide residues removal from food: a systematic review. *Food Prod. Process. Nutr.*, **7**, 31 (2025).
22. Pesticide Properties Database (PPDB), (2025, October 21). University of Hertfordshire. Retrieved from https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb
23. Wang, T., Zhang, H., Hu, Y., Visual analysis of carbendazim residues in carrot tubers via postionization mass spectrometry imaging. *Appl. Sci.*, **14**, 5431 (2024).
24. Xia, E., Tao, W., Yao, X., Wang, J., Tang, F., Effects of processing on carbendazim residue in Pleurotus ostreatus. *Food Sci. Nutr.*, **4**, 645-650 (2016).
25. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), (2015, October 24). Benefits review for flubendiamide. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/benefits-review.pdf
26. Witchard, M., Paclobutrazol is phloem mobile in castor oil plant (Ricinus communis L.). *J. Plant Growth Regul.*, **16**, 215-217 (1997).
27. D'Aquino, S., Palma, A., Angioni, A., Schirra, M., Residue levels and efficacy of fludioxonil and thiabendazole in controlling postharvest green mold decay in citrus fruit when applied in combination with sodium bicarbonate. *J. Agric. Food Chem.*, **61**, 296-306 (2013).
28. Klingelhöfer, D., Braun, M., Brüggmann, D., Gronenberg, D.A., Neonicotinoids: a critical assessment of the global research landscape of the most extensively used insecticide. *Environ. Res.*, **213**, 113727 (2022).