



ORIGINAL ARTICLES

시설재배 망고 과실 중 profenofos 잔류 분포 특성

허수형^{1†} · 전관우^{1†} · 김지원^{1,2} · 김소진¹ · 김민건¹ · 김창숙^{1,2,3} · 부경환^{1,2,3*}

¹제주대학교 생명공학부, ²제주대학교 아열대·열대생물유전자은행센터, ³제주대학교 농생명소재안전성연구센터

Distribution Characteristics of Profenofos Residues in Greenhouse-Cultivated Mango Fruit

Suhyeong Heo^{1†}, Kwan Woo Jeon^{1†}, Jiwon Kim^{1,2}, Sojin Kim¹, Min Gun Kim¹, Chang Sook Kim^{1,2,3}, and Kyung-Hwan Boo^{1,2,3*}

¹Department of Biotechnology, College of Applied Life Science (SARI), Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

²Subtropical/tropical Organism Gene Bank, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

³Agricultural and Biomaterial Safety Research Center, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

(Received on June 17, 2025. Revised on July 3, 2025. Accepted on July 3, 2025)

Abstract Our study aimed to investigate the residue profile of profenofos in the peelings and the pulps of greenhouse-cultivated mangoes (*Mangifera indica* L.) to obtain baseline data for pesticide registration and food safety evaluation. The mangoes were treated with a 1,000-fold diluted formulation of deltamethrin (0.6%) and profenofos (15%), which was applied 7 days prior to and on the days of harvest. The mangoes were harvested at 0, 7, and 14 days following the final treatment. We analyzed the peelings and the pulps of the fruits. Using gas chromatography with a flame photometric detector (GC-FPD), profenofos residues were isolated and measured with a method limit of quantitation (MLOQ) of 0.01 mg/kg. The recoveries for both the peelings and the pulps were within the acceptable range (70-120%). The average levels of profenofos residues in the peel were 0.84 mg/kg (day 0), 0.24 mg/kg (day 7), and 0.01 mg/kg (day 14), while those in the pulp remained below the MLOQ for all the sampling days. The %ADI of the profenofos residue levels in the peel was 0.030% on day 0 and decreased markedly to 0.00035% by day 14. The levels of profenofos residue in the pulp were consistently less than 0.00035% of %ADI on all the sampling days. Our results suggest that profenofos is retained primarily in the peel and presents minimal dietary risk when edible pulp is consumed.

Key words: Greenhouse cultivation, Mango fruit, Pesticide residues, Profenofos

서론

농약은 병해충으로부터 작물을 보호하고, 재배 과정의 노동력을 줄이며, 작물의 생산성과 품질을 높이는 데 기여하는 필수 농자재이다(Gang et al., 2017; Woo et al., 2013). 그러나, 농약 사용 후 일부 성분은 대기나 토양 등 주변 환경으로 유입되어, 인체 건강과 생태계에 잠재적인 위협을

초래할 수 있다(Kim, 1989; Woo et al., 2013).

실제로 농약의 독성과 관련된 다양한 사례가 보고되고 있다. 미국의 농업인건강연구(Agricultural Health Study)에서는 농약 노출이 악성 종양, 호흡기 질환, 신경계 질환, 안과 질환, 당뇨병 등 여러 만성 질환과 연관될 수 있음을 제시하였다. 또한, 한국소비자원(KCA)의 농약 안전실태 조사 보고에 따르면, 농약 성분에 의한 급성 중독 사례는 총 1,518건이며, 이 중 제초제 paraquat 중독이 585건으로 가장 높은 빈도를 보였다(KCA, 2009). Paraquat은 폐조직에 산화손상을 유발하여 폐부종, 폐 손상, 나아가 폐섬유화를 일으키며, 심할 경우 사망에 이를 수 있다(Hampson and Pond, 1988).

[†]The authors contributed equally to this work

*Corresponding author

E-mail: khboo@jejunu.ac.kr

이 외에도 살충제 piperonyl butoxide는 배아 발달에 중요한 sonic hedgehog 신호 전달 경로를 억제하여 배아 발달과 뇌와 얼굴 형태 형성에 악영향을 줄 수 있으며(Kenneth et al., 2021), imidacloprid는 지렁이의 섭식 기능을 저해해 낙엽 분해 능력을 감소시키는 등 생태계 기능에도 영향을 미치는 것으로 보고되었다(David et al., 2008).

이러한 문제를 최소화하기 위해 우리나라를 포함한 여러 국가에서는 농산물의 안정성 확보를 위한 제도적 장치를 마련하고 있다. 국내에서는 농약의 오남용을 방지하고 소비자 안전을 보장하기 위해 허용물질목록관리제도(Positive List System, PLS)를 도입하여, 잔류허용기준(Maximum Residue Limit, MRL)과 안전사용기준(Pre-Harvest Interval, PHI)을 설정하고 있다(An et al., 2019).

Profenofos는 유기인산계 살충제로, 신경전달물질인 acetylcholine을 가수분해하는 효소 acetylcholinesterase를 억제함으로써 해충의 신경계를 교란시켜 살충 효과를 나타낸다(Chakra and Venkateswara, 2008). 특히, 목화나방, 담배나방 등 나비목 해충에 효과적이며, 유기염소계 살충제에 비해 잔류성이 짧고 급성 독성이 낮은 장점으로 인해 전 세계적으로 널리 사용되고 있다.

망고(*Mangifera indica* L.)는 세계 주요 30대 작물 중 하나로, 옷나무과에 속하는 다년생 열대과수이다(Yoo and Lee, 2020). 동남아시아 및 남아시아가 원산지이며, 현재는 인도, 중국, 태국 등지에서 대규모로 재배되고 있다(Kumar et al., 2021). 최근에는 기후 변화와 재배 기술의 발달로 망고 재배 가능 지역이 확대되고 있으며, 우리나라에서도 평균 기온 상승에 따라 제주도, 여수, 경상남도 등 남부 지역을 중심으로 당도가 높고 껍질이 붉은 'Irwin' 품종(일명 애플망고)이 주로 재배되고 있다(An et al., 2015). 국내 재배면적은 2017년 42.3 ha(97 농가)에서 2024년 138.07 ha(431 농가)로 7년 사이 약 3배가 증가하는 등 지속적인 확산 추세를 보이고 있다(MAFRA, 2024).

망고는 다양한 페놀화합물(mangiferin, catechins, quercetin, kaempferol 등)을 함유하고 있어 항산화 활성이 우수하며(Masibo and Qian, 2008), 과육뿐만 아니라 잎과 씨 등 다양한 부위에서도 항산화, 항염증, 미백 등의 생리활성이 보고되고 있다(Kang and Lee, 2022; Maisuthisakul and Gordon, 2009; Yoo and Lee, 2020).

한편, 망고는 국내에서도 수입량이 많은 대표적인 열대 과일로, 유통 및 보관 과정에서 농약을 처리한 후 광분해가 어려운 조건에 노출되어 잔류 가능성이 높아질 수 있다(Cho et al., 2012). 실제로 식품의약품안전처 보도자료에 따르면 2024년 국내 유통 망고에서 부적합 농약이 검출된 사례는 2건으로 보고되었다(MFDS, 2024). 이 중 필리핀산 망고에서는 metominostrobin, phenthoate, profenofos 등 3종의 농약이 기준치(0.01 mg/kg 이하)를 초과하여 검출되었고,

베트남산 망고에서는 permethrin이 기준치(0.01 mg/kg 이하)를 초과하여 검출됨에 따라 해당 제품이 판매 중단 및 회수 조치가 이루어진 바 있다.

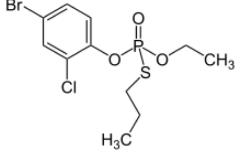
농약은 일반적으로 과피에 더 많이 잔류하는 경향이 있으며, 과육에서는 검출되지 않거나 낮은 농도로 나타나는 경우가 많다(Han et al., 2015; Lee et al., 2004). 이에 따라 과일 섭취 시 부위에 따른 잔류농약 노출 수준에 차이가 발생할 수 있어, 부위별 잔류 특성에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 껍질째 섭취하거나 껍질을 활용한 가공식품의 소비가 늘어남에 따라 소비자들은 과피에 잔류할 수 있는 농약에 대해 더욱 민감하게 반응하고 있다(Jung et al., 2024). 그럼에도 불구하고, 수박, 망고, 복숭아 등 일반적으로 껍질을 제거하고 섭취하는 과일류의 부위별 농약 잔류량 분석 연구는 아직 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 망고 과실을 과피와 과육으로 구분하여 profenofos의 부위별 잔류 특성을 분석하고, 안전한 망고 소비와 유통을 위한 과학적 기초자료를 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

시험약제 및 시약

시험에 사용한 약제는 deltamethrin+profenofos 15.6% 유제로, 시중 농약상에서 구입하여 사용하였다. Profenofos 표준품(95.0%)은 Sigma-Aldrich Chemical Co. (St. Louis, MO, USA)로부터 구입하였으며, 해당 물질의 이화학적 특성은 Table 1에 제시하였다. 분석에 사용한 acetone, acetonitrile은 Fisher Scientific사의 HPLC급 제품을 사용하였고, QuEChERS extraction kit (NaCl 1 g, MgSO₄ 4 g, trisodium citrate dihydrate 1 g, sodium hydrogencitrate sesquihydrate 0.5 g)와 dispersive SPE (PSA 25 mg, MgSO₄ 150 mg)는 각각 Chromatific (Heidenrod, Germany)와 Thermo Fisher Scientific (Sunnyvale,

Table 1. Physicochemical properties of profenofos

Pesticide	Profenofos
Structure	
IUPAC name	4-bromo-2-chloro-1-[ethoxy(propylsulfanyl)phosphoryl]oxybenzene
M.W.	373.63 g·mol ⁻¹
Solubility	Readily miscible with most organic solvents. In water 28 mg/L (25°C)
Stability	Relatively stable under neutral and slightly acidic conditions. Unstable under alkaline conditions

CA, USA) 제품을 사용하였다.

시험포장

포장시험은 제주특별자치도 서귀포시 동홍동에 위치한 시설재배용 비닐하우스에서 수행하였다. 본 시험은 2021년 농촌진흥청 주관 농약직권등록사업의 일환으로, 해당 사업의 공식 시험설계서 지침에 따라 나무 1주를 1반복으로 설정하여 총 3반복으로 배치하였으며, 반복 구당 면적은 약 5 m² 였다. 농약을 처리하지 않은 무처리구 면적도 동일 면적으로 1반복 설정하였다(Fig. 1). 약제 처리 시 비산에 의한 오염을 방지하기 위해 각 구획 사이에 가림막을 설치하였다. 시험기간 동안 비닐하우스 내 온도 및 습도는 TM-306U (Tenmars Electronics Co., Ltd.) 센서를 시험포장 내 두 지점에 설치하여 1시간 간격으로 측정하였으며, 이를 평균하여 일평균 온도 및 습도를 산출하였다. 시험기간 중 평균온도는 27.4°C, 평균습도는 72.2%였으며, 구체적인 변화는 Fig. 2에 나타내었다.

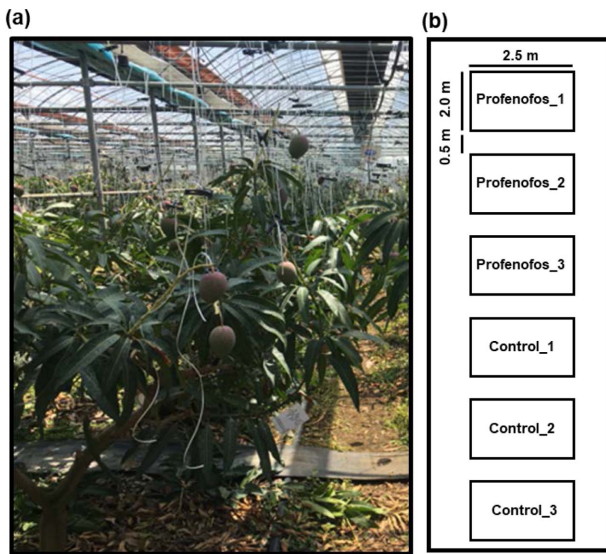


Fig. 1. Photograph of the Mango field used for this trial (a) and layout of treatment plot for the field experiment (b).

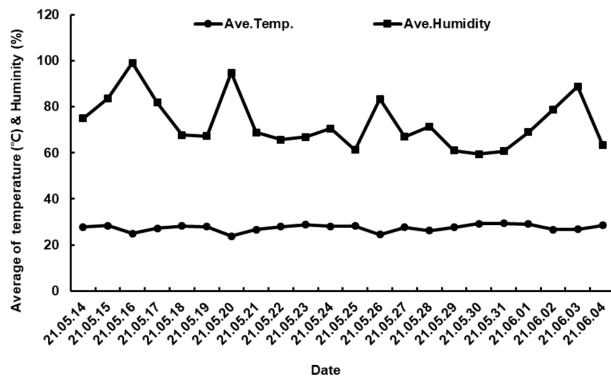


Fig. 2. Daily temperature and humidity in the mango facility during the experimental period.

약제처리 및 시료채취

시험 약제는 1,000배로 희석하여 전기 충전식 분무기 (ASABA BP-10Li, Japan)를 이용해 과실에 약액이 흐를 정도로 충분히 살포하였다. 약제는 주당(5 m²) 약 1.3 L의 희석액을 살포하였으며, 이는 10 a 기준으로 환산하면 약 260L에 해당한다. 사용된 약제는 유효성분 중 profenofos 함량이 15%인 제제로, 실질적으로 1 m²당 0.039 g의 유효성분(a.i.)이 처리되었다. 약제 처리는 망고 수확 예정일인 2021년 5월 21일을 기준으로, 수확 7일 전과 수확 당일에 각각 1회씩 총 2회 실시하였다.

시료 채취는 수확 일을 기준으로 7일 간격으로 총 3회(0일, 7일, 14일)에 걸쳐 수행하였다. 기존 농약직권등록사업에서는 전체 망고 과실을 대상으로 잔류량을 분석하였으나, 본 연구에서는 보다 정밀한 잔류 특성 평가를 위해 과피와 과육을 분리하여 각각 분석하였다. 각 시기마다 반복 구당 5개의 망고 과실을 수확하였고, 과실은 4등분하여 과피와 과육을 분리하였다(Fig. 3). 과피 두께는 2.5 mm 이하로 분리하였으며, 평균 두께는 2.26±0.55 mm이었다. 분리한 과피와 과육 시료는 드라이아이스와 함께 믹서기(SMX-5800LM, Shinil, Korea)를 사용해 균질화한 뒤, -20°C에 냉동 보관하여 분석에 사용하였다.

분석법 검증

기기 정량한계(Instrumental Limit of Quantitation, ILOQ)는 크로마토그램에서 측정된 피크면적의 signal to noise ratio (S/N)가 10 이상이 되는 농도로 설정하였다. 이후, 해당 농도에 주입량을 곱하여 최소검출량(Minimum Detectable Amount, MDA)을 산출하였다. 분석법 정량한계(Method Limit of Quantitation, MLOQ)는 MDA 값, 시료 주입량, 채취량, 최종 시험용액 부피, 희석배수를 고려하여 다음의 계산식으로 도출하였다.

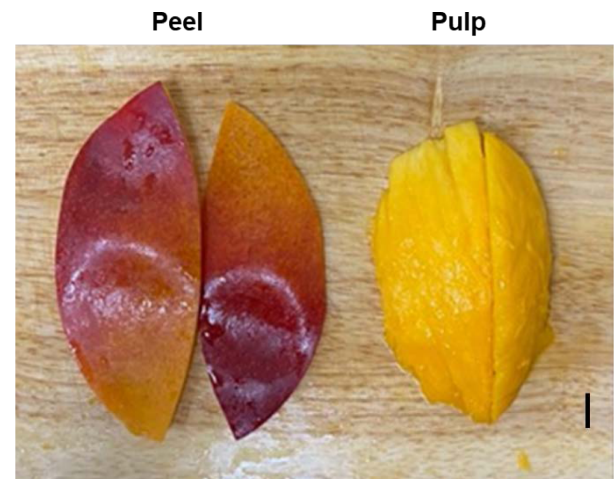


Fig. 3. Mango fruit separated into peel and pulp. Scale bar: 1 cm. Average thickness of the peel: 2.26±0.55 mm.

$$\text{MLOQ (mg/kg)} = \frac{\text{MDA (ng)} \times \text{최종부피 (mL)} \times \text{회석배수}}{\text{시료주입량 (\mu L)} \times \text{시료량 (g)}}$$

과피 및 과육의 농약잔류량 산출을 위한 표준검량선은 외부표준법을 기반으로 작성하였다. Profenofos 표준품(95.0%) 10.5 mg을 칭량한 후, 10 mL 용량 플라스크에 넣고 acetone으로 정용하여 1,000 mg/L의 농도의 stock solution을 제조하였고, 이후 stock solution을 acetone으로 단계적으로 희석하여 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.25 및 0.30 mg/L의 농도로 조제하였다. 각 표준용액 2.0 μ L를 GC-FPD에 주입하여 얻은 chromatogram의 피크 면적을 바탕으로 외부표준 검량선을 작성하였다.

분석법의 정확도를 검증하기 위한 회수율 시험은 잔류농약 분석과 동일한 전처리 및 분석 조건하에 진행하였으며, 0.01, 0.1 및 0.5 mg/kg의 세 농도 수준에서 각 3반복으로 실시하였다.

잔류농약 분석

Profenofos 잔류량 분석을 위해 망고 과피와 과육 시료를 각각 균질화한 후, 각 부위에서 10 g씩 취하여 50 mL 튜브에 넣고 acetonitrile 10 mL를 첨가한 뒤, 300 rpm에서 1분간 진탕하였다. 진탕액에 QuEChERS kit와 ceramic homogenizer (Chromatific; Heidenrod, Germany) 2개를 첨가한 후, 300 rpm에서 1분간 진탕하였다. 이후 혼합액을 3,000 rpm에서 5분간 원심분리하고, 상등액 7 mL를 취해 40°C 수욕상에서 감압 농축한 후, acetonitrile 1.4 mL로 재용해하였다. 이 중 1 mL을 d-SPE kit에 넣고 교반한 뒤, 10,000 rpm에서 2분간 원심분리하였다. 최종적으로 상등액을 0.2 μ m syringe filter로 여과한 후, 2.0 μ L를 GC-FPD에 주입하여 얻은 chromatogram의 피크 면적을 표준검량선과 비교하여 profenofos의 잔류량을 산출하였다. GC-FPD는 Shimadzu사의 GC-2010 Plus 기기를 이용하였으며, 컬럼은 agilent HP-5 (0.32 mm \times 30 m, 0.25 μ m, Agilent, California, USA)를 사용하였다. 분석 조건은 splitless 모드에서 시료 2 μ L를 주입하였고, carrier gas는 2.0 mL/min

Table 2. GC-FPD conditions for the analysis of profenofos

Instrument	Shimadzu GC-2010 Plus
Detector	Flame Photometric Detector (FPD)
Column	Agilent HP-5 (0.32 mm \times 30 m, 0.25 μ m) 100°C for 2 min
Oven Temperature	10°C/min to 180°C (2 min) 20°C/min to 260°C (4 min) 30°C/min to 290°C (4 min)
Gas flow	Carrier Gas He 2.0 mL/min
Injection volume	2 μ L
Injection port	Splitless mode
Injection port temperature	250°C
Detector temperature	300°C

유속으로 공급하였으며, 상세한 기기 조건은 Table 2에 제시하였다.

안전성 평가

망고에 잔류된 profenofos의 안전성은 일일섭취허용량 (Acceptable Daily Intake, ADI) 대비 일일섭취추정량 (Estimated Daily Intake, EDI)인 %ADI로 산출하였다. ADI는 농촌진흥청에서 고시한 값인 0.03 mg/kg b.w./day를 적용하였으며, 망고의 일일섭취량은 0.66 g/day를 기준으로 하였다(KHIDI, 2023; RDA, 2025). EDI는 잔류량(mg/kg)에 일일섭취량(g/day)을 곱한 후, 우리나라 성인 평균 체중 62.5 kg으로 나누어 계산하였다.

$$\% \text{ADI} = \text{EDI} / \text{ADI} * 100 (\%)$$

결과 및 고찰

분석법 검증

외부표준용액을 기반으로 profenofos의 MDA를 산출한 결과, 0.01 ng으로 확인되었고, 이 값을 바탕으로 계산된 MLOQ는 0.01 mg/kg이었다. 표준검량선은 외부표준법에 따라 작성되었으며, 크로마토그램상 피크 면적을 기준으로 도출된 직선식은 $y = 702,627.008x - 24,026.532$ 이었다. 결정 계수(R^2)는 0.998로 양호하였다(Fig. 4). 과피와 과육을 대상으로 수행한 회수율 시험은 최종농도가 0.01, 0.1, 0.5 mg/kg이 되도록 설정하였으며, 과피에서는 각각 95.0%, 72.4%, 72.4%, 과육에서는 각각 94.3%, 84.5%, 74.9%의 평균회수율을 나타냈다. 이때 산출된 상대표준편차(Relative Standard Deviation, RSD)는 두 시료 모두 1.2~13.4% 범위로, 재현성 측면에서도 안정적인 결과를 보였다(Table 3). 해당 결과는 ‘잔류성 시험의 기준 및 방법’(농촌진흥청 고시 제2024-5호)에서 제시하는 분석법 검증 기준인 70~120%, RSD 20% 이하 조건을 충족하였으며(MFDS, 2017) 이에 따라 본 분석법은 망고 시료 내 profenofos 잔류량 측정에 적합한 것으로 판단되었다.

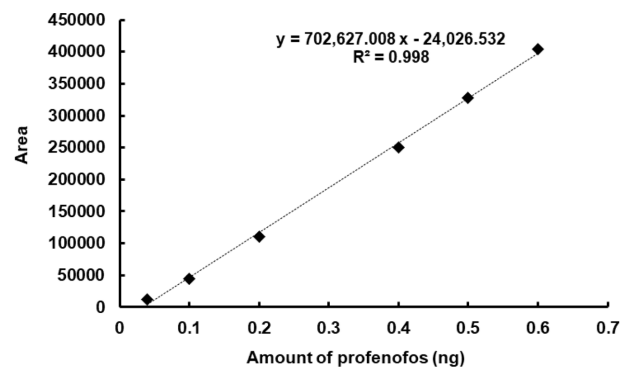


Fig. 4. Calibration curve for profenofos used in method validation.

Table 3. Recovery and LOQ of profenofos in mango peel and pulp

Sample	Fortification level (mg/kg)	Average recovery (%) ± SD ^{a)}	RSD ^{b)} (%)	LOQ ^{c)} (mg/kg)
Peel	0.01	95.0 ± 12.7	13.4	0.01
	0.1	72.4 ± 1.9	2.6	
	0.5	72.4 ± 0.8	1.2	
Pulp	0.01	94.3 ± 9.6	10.2	
	0.1	84.5 ± 2.0	2.3	
	0.5	74.9 ± 2.3	3.0	

^{a)}Standard Deviation, ^{b)}Relative Standard Deviation, ^{c)}Limit of Quantitation

생육단계 중 망고에서의 잔류량 변화

망고 과실에 profenofos를 수확일 기준 7일 전과 당일(0일)에 각각 1회씩, 총 2회 살포하였으며, 이후 0일, 7일, 14일차에 시료를 수확하여 잔류량 변화를 분석하였다. 과피에서는 수확 당일(0일차) 평균 잔류 농도가 0.84 mg/kg으로 나타났고, 7일 경과 시 0.24 mg/kg로 급감하였으며, 14일차에는 0.01 mg/kg으로 나타났다(Table 4). 반면, 과육에서는 전 기간(0, 7, 14일차)동안 profenofos가 정량한계 미만 수준으로 검출되어, 실질적인 잔류는 확인되지 않았다(Table 4). 한편, 본 연구에 앞서 2021년 농약직권등록사업의 일환으로 망고 전체 과실을 균질화하여 분석한 결과, 0, 7, 14일차에 각각 0.18, 0.05, 0.01 mg/kg의 잔류량이 검출된 바 있다(Kim et al., 2022). 이에 따라, 본 연구에서는 과피와 과육을 구분하여 부위별 잔류 특성을 보다 정밀하게 분석하였고, 그 결과, profenofos는 과피에 집중적으로 잔류하며, 과육으로의 흡수는 거의 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. 현재 국내에서는 망고에 대한 profenofos의 MRL이 별도로 설정되어 있지 않으나, 사과, 석류, 유자, 토마토 등 유사 과실류의 MRL은 2.0 mg/kg으로 규정되어 있다. 따라서 본 시험에서의 profenofos 잔류량을 유사 과실류의 MRL을 기준으로 볼 때, 과피의 잔류량은

허용기준 보다 낮은 수준이며, 과육에서는 정량한계 미만으로 나타난 바, 인체 위해 우려는 매우 낮을 것으로 판단된다.

망고에서의 농약 잔류 분포는 약제의 침투이행성뿐만 아니라 살포시기에 따라 달라질 수 있다. Bhattacharjee (2013)의 연구에 따르면, imidacloprid를 개화 전 단계에 처리한 경우, 살포 30일 후 과피와 과육에서 각각 1.21 mg/kg, 0.56 mg/kg의 잔류가 확인되었으며, 수확기(85일 후)에는 불검출 수준까지 감소하였다. 반면, 과실 발달기에 처리한 carbosulfan은 살포 직후 과피에서 5.30 mg/kg인 것에 비해 과육에서 0.08 mg/kg으로 잔류가 현저히 낮았으며, 과육은 26일, 과피는 45일 후 불검출 수준에 도달하였다(Bhattacharjee, 2013). 이 두 약제는 모두 침투이행성 성분이지만(Tomlin, 2006), 처리 시기의 차이에 따라 실제 과육 내 잔류 양상에는 큰 차이를 보였다. Imidacloprid는 과실 형성 이전에 처리되어 유효성분이 과실 발달 과정 중 내부로 침투이행 되었을 가능성이 높은 반면, carbosulfan은 과실 발달 과정에 처리되어 주로 과실 표면에 부착되었고, 내부로의 침투 이행은 상대적으로 제한적이었던 것으로 보인다. 본 연구에서의 profenofos는 살포 직후 망고 과피에서 0.84 mg/kg의 잔류가 검출되었고, 이후 빠르게 감소하여 14일차에는 0.01 mg/kg까지 낮아졌으며, 과육에서는 모든 시점에서 정량한계 미만으로 검출되었다. 이는 profenofos가 과실이 일정 수준 이상 성장한 이후에 처리되어, 밀착된 왁스층 등으로 인해 과육 내로의 침투가 제한적이었을 뿐만 아니라, 비이행성(non-systemic) 성분으로 식물체 내 확산이 어려운 특성에 기인한 결과로 판단된다(Tomlin, 2006).

생물학적 반감기

망고 과피에서 profenofos의 생물학적 반감기를 산출하기 위해, 시간 경과에 따른 평균 잔류량을 기준으로 잔류감소 회귀식을 도출하였다. 그 결과, 회귀식은 $y=1.1078 \cdot e^{-0.298x}$ ($R^2=0.9739$)로 나타났으며, 이를 통해 계산된 반감기는 2.33일이었다(Fig. 5). 망고 과피에서의 짧은 반감기는 profenofos가 작물 표면에 처리된 후 휘발, 광분해, 수분 및 기타 환경 요인에 의해 빠르게 분해되는 물리화학적 특성을 반영한 결과로

Table 4. Residual concentration of profenofos in mango peel and pulp

Sample	DAT ^{a)}	Residual amount (mg/kg)			Mean ± SD ^{b)}
		1	2	3	
Peel	0	0.65	1.00	0.88	0.84 ± 0.18
	7	0.22	0.19	0.29	0.24 ± 0.05
	14	0.01	0.02	0.01	0.01 ± 0.00
Pulp	0	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	7	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	14	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

^{a)}Days after treatment, ^{b)}Standard Deviation

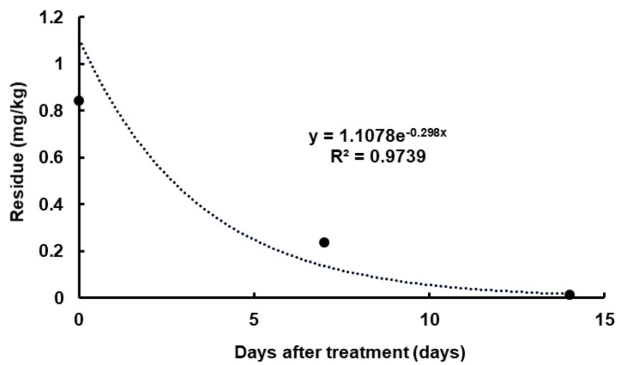


Fig. 5. Dissipation curve of profenofos in mango peel.

해석된다(USEPA, 2016). 유사하게, 토마토에 profenofos를 처리한 연구에서도 14일 후 잔류량이 처리 직후 대비 96.5% 감소하였고, 반감기가 2.25일로 보고된 바 있다(Romeh et al., 2009). 또한, 남인도 열대 농경지에서 수행된 연구에서는 토양 내 profenofos가 환경 요인에 의해 빠르게 분해되는 경향이 확인되었으며(Masbou et al., 2025), 야외 광 노출 실험에서는 profenofos가 수 시간 내 급격히 분해되는 광분해 특성이 보고되었다(Min and Cha, 2000). 이러한 결과들은 profenofos가 다양한 환경 조건에서 빠르게 분해되는 특성을 보인다는 점에서 본 연구 결과와 일치한다.

안전성 평가

농촌진흥청 고시에 따른 profenofos의 ADI는 0.03 mg/kg b.w./day이며, 이를 국내 성인 평균 체중(62.5 kg)으로 환산하면 1일 섭취 허용량은 1.875 mg/day로 산출된다. 본 연구에서는 망고 과피 및 과육의 평균 잔류량과 성인의 망고 1일 평균 섭취량(0.66 g/day)을 곱하여 EDI를 산출하고, 이를 기준으로 %ADI를 계산하였다. 과육의 경우, 모든 시료에서 profenofos가 정량한계 미만(<0.01 mg/kg)으로 검출되었기 때문에, EDI 산출 시 정량한계 값인 0.01 mg/kg을 보수적으로 적용하였다. 그 결과, 과피에서는 0일차에 %ADI가 0.030% 였으나, 7일차에는 0.0084%, 14일차에는 0.00035%로 빠르게 감소하였다. 반면, 과육에서는 모든 수확 시점에서 %ADI가 0.00035% 미만이었다(Table 5). FAO/WHO 기준에 따르면, %ADI가 10% 미만일 경우 인체 위해 우려는 낮은 것으로 평가된다(Lee and Lee 1997). 일반적으로 농약은 과실류의 과피에 주로 잔류하며, 유기인계 농약의 경우 세척, 껍질 제거, 저장 등을 통해 상당량 제거될 수 있음이 보고되었다(Lee et al., 2010; Romeh et al., 2009). 따라서, 망고와 같은 과일은 수확 후 일정 기간 보관하거나 섭취 전 충분한 세척 및 껍질 제거를 통해 농약 섭취를 효과적으로 줄일 수 있다. 결론적으로, 본 연구에서 분석한 망고의 profenofos 잔류량은 ADI 대비 매우 낮은 수준이었으며, 특히 식용 부위인 과육에서는 인체 위해 가능성이 극히 낮은 것으로 판단된다.

Table 5. Risk assessment of the pesticides in Mango

Sample	DAT ^{a)}	ADI ^{b)}	EDI ^{c)} (mg/day·bw/day)	%ADI
Peel	0	0.03	8.9E-06	3.0E-02
	7		2.5E-06	8.4E-03
	14		1.1E-07	3.5E-04
Pulp	0	0.03	1.1E-07	<3.5E-04
	7		1.1E-07	<3.5E-04
	14		1.1E-07	<3.5E-04

^{a)}Days after treatment, ^{b)}Acceptable Daily Intake, ^{c)}Estimated Daily Intake

본 연구는 망고 과실의 부위별 profenofos 잔류 특성을 정량적으로 제시함으로써, 향후 잔류 허용기준 설정과 소비자 안전을 위한 세척 및 취급 지침 마련에 과학적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 농촌진흥청 농약직권등록사업의 연구 개발비(RS-2021-RD009705) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Author Information and Contributions

Suhyeong Heo, Department of Biotechnology, College of Applied Life Science (SARI), Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Ph D student, <https://orcid.org/0000-0002-0274-480X>

Kwan Woo Jeon, Department of Biotechnology, College of Applied Life Science (SARI), Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Ph D student, <https://orcid.org/0000-0002-6733-3358>

Jiwon Kim, Department of Biotechnology and Subtropical/tropical Organism Gene Bank, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Postdoctoral researcher, <https://orcid.org/0009-0007-7185-7318>

Sojin Kim, Department of Biotechnology, College of Applied Life Science (SARI), Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Ph D student, <https://orcid.org/0009-0003-4359-8815>

Min Gun Kim, Department of Biotechnology, College of Applied Life Science (SARI), Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Ph D student, <https://orcid.org/0009->

0003-1384-5790

Chang Sook Kim, Department of Biotechnology, Subtropical/tropical Organism Gene Bank, and Agricultural and Biomaterial Safety Research Center, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Professor, <https://orcid.org/0000-0001-5593-5979>

Kyung-Hwan Boo, Department of Biotechnology, Subtropical/tropical Organism Gene Bank, and Agricultural and Biomaterial Safety Research Center, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9024-2999>

Research design; Kyung-Hwan Boo, Field trials; Suhyeong Heo, Kwan Woo Jeon, Jiwon Kim, Sojin Kim, Min Gun Kim, Instrument analysis; Suhyeong Heo, Kwan Woo Jeon, Writing-original draft; Su Hyeong Heo, Sojin Kim, Writing-review and editing; Jiwon Kim, Chang Sook Kim, Kyung-Hwan Boo

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

- An JM, Shin SJ, Kim MG, Hwang HR, Chang SY, et al., 2019. Residual characteristics of etofenprox, pyrifluquinazon, spirotetramat and sulfoxaflor in cow parsnip (*Heracleum moellendorffii* L.) of minor crop. *The Korean J. Pestic Sci.* 23(2):61-69.
- An MR, Keum YS, Lee SK, 2015. Comparative analysis of volatile flavor compounds in Taiwan apple mango and Philippines carabao mango. *Korean J. Food Sci. Technol.* 47(2):191-197.
- Bhattacharjee AK, 2013. Persistence behavior of imidacloprid and carbosulfan in mango (*Mangifera indica* L.). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 90:233-237.
- Chakra RN, Venkateswara RJ, 2008. Biological response of earthworm, *Eisenia foetida* (Savigny) to an organophosphorous pesticide, profenofos. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 71:574-582.
- Cho YS, Kang JB, Kim YH, Jeong JA, Huh JW, et al., 2012. A survey on pesticide residues of imported fruits circulated in Gyeonggido. *The Korean J. Pestic Sci.* 16(3):195-201.
- David PK, Kevin PG, Derek TC, Taylor AS, Stephen BH, et al., 2008. Effects on litter-dwelling earthworms and microbial decomposition of soil-applied imidacloprid for control of wood-boring insects. *Pest Manag Sci.* 64(2):112-118.
- Dem SB, Cobb JM, Mullins DE, 2007. Pesticide Residues in Soil and Water from Four Cotton Growing Areas of Mali, West Africa. *J. Agric. Food Environ. Sci.* 1(1):1-12.
- Gang GR, Mun SJ, Yang YS, Lee SM, Choi EN, et al., 2017. Monitoring of pesticide residues on dried agricultural products. *The Korean J. Pestic Sci.* 21(1):49-61.
- Hampson EC, Pond SM, 1988. Ultrastructure of canine lung during the proliferative phase of paraquat toxicity. *Br. J. Exp. Pathol.* 69(1):57-68.
- Han JL, Fang P, Xu XM, Li-Zheng XJ, Shen HT, et al., 2015. Study of the pesticides distribution in peel, pulp and paper bag and the safety of pear bagging. *Food Control* 54:338-346.
- Jung BK, Kim DG, Lee CY, Yi YJ, Kim MS, et al., 2024. Monitoring and risk assessment of 470 pesticides on fruits distributed in Gangnam and Gangseo districts in Seoul. *Korean J. Food Sci. Technol.* 56.3:374-385.
- Kang JW, Lee IC, 2022. Antioxidant and skin whitening effects of Jeju mango kernel extracts (*Mangifera indica* L. var. Irwin). *J. Korean Soc Food Sci Nutr.* 51(22):1266-1271.
- Kenneth S, Tyler GB, Robert JL, 2021. Examining the developmental toxicity of piperonyl butoxide as a Sonic hedgehog pathway inhibitor. *Chemosphere.* 2021 Feb;264(Pt 1):128414.
- Korea Consumer Agency (KCA), 2009. Pesticide safety status survey. Chungcheongbuk-do, Korea. (In Korean)
- Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), 2023. Korea National Health & Nutrition Examination Survey. <https://www.khidi.or.kr/kps/dhraStat/result2?menuId=&gubun=&year=2023> (Accessed 05. 30. 2025).
- Kim MG, Jeon KW, Kim JW, Heo SH, Kim SJ, et al., 2022. Annual meeting on the Korean society of pesticide science, Gyeongju, Korea. 4-7 Apr. p. 202.
- Kim YH, 1989. Environmental Chemical Test Methods and Environmental Toxicological Assessment of Chemicals. *Korean J. Environ. Agric.* 8(2):148-171.
- Kumar M, Saurabh V, Tomar M, Hasah M, Changan S, et al., 2021. Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Antioxidants* 10(2):299.
- Lee MG, Shim JH, Ko SH, 2010. Research trends on the development of scientific evidence on the domestic maximum residue limits of pesticides. *Korean J. Food Sci. Technol.* 43(2):41-66.
- Lee MG, Lee SR, 1997. Reduction factor and risk assessment of organophosphorus pesticides in Korean foods. *Korean J. Food Sci. Technol.* 29(2):240-248.
- Lee HD, Kyung KS, Kwon HY, Ihm YB, Kim JB, et al., 2004. Residue characteristics of hexaconazole and chlorothalonil in several fruits. *Korean J. Pestic. Sci.* 8(2):107-111.
- Maisuthisakul P, Gordon MH, 2009. Antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of mango seed kernel by product. *Food Chemistry.* 117(2):332-341.
- Masibo M, Qian H, 2008. Major mango polyphenols and their

- potential significance to human health. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 7(4):309-319.
- Masbou J, Grail C, Payraudeau S, Ruiz L, Sekhar M, et al., 2025. Dissipation of the insecticide profenofos in tropical agricultural soils (Berambadi catchment, South India): insight from compound-specific isotope analysis (CSIA). *J. Hazard. Mater.* 137428.
- Min KJ, HA YD, Seo S, Cha CG, Park JW, et al., 2000. Determination of Hydrolysis Rate Constants on Phosphamidon and Profenofos. *J. Food Hyg. Saf.* 15(2):144-150.
- Min KJ, Cha CG, 2000. Photodegradation of Phosphamidon and Profenofos. *J. Environ Health Sci.* 26(2):49-58.
- Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2024. Agricultural management entity registration information status service https://edu.agrix.go.kr/uni_docs7/biOlap/fixType.do?reportId=eqpt_oudor_item. (Accessed 05.30.2025)
- Ministry of Food and Drug Safety, 2017. Pesticides and Veterinary Drugs Information. <http://www.foodsafetykorea.go.kr>. (Accessed 05.30.2025).
- Ministry of Food and Drug Safety, 2024. Pesticides and Veterinary Drugs Information. <http://www.foodsafetykorea.go.kr>. (Accessed 05.30.2025).
- RDA, 2025. Registration standards for pesticides and raw materials, Jeonju, Korea. (In Korean)
- Romeh AA, Mekky TM, Ramadan RA, Hendawi MY, 2009. Dissipation of profenofos, imidacloprid and penconazole in tomato fruits and products. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 83:812-817.
- Sompon W, Onnicha K, Kamonrat P, Virapong P, 2015. Food safety in Thailand 2: Pesticide residues found in Chinese kale (*Brassica oleracea*), a commonly consumed vegetable in Asian countries. *Science of the Total Environment.* 532: 447-455.
- Tomlin CDS, 2006. The pesticide manual: a world compendium, BCPC, Hampshire, UK.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2016. Profenofos (PC code: 111401), Washington D.C., USA.
- Woo NR, Ko SH, Park YJ, 2013. Monitoring of pesticide residues in vegetables collected in Chungbuk, Korea. *Korean J. Food Nutr.* 26(4):865-878.
- Yoo DH, Lee IC, 2020. Antioxidant effect and iNOS, COX-2 expression inhibition on RAW 264.7 cell of *Mangifera indica* L. leaf. *J. Life Sci.* 30(9):783-790.

시설재배 망고 과실 중 profenofos 잔류 분포 특성

허수형^{1*} · 전관우^{1*} · 김지원^{1,2} · 김소진¹ · 김민건¹ · 김창숙^{1,2,3} · 부경환^{1,2,3*}

¹제주대학교 생명공학부, ²제주대학교 아열대·열대생물유전자은행센터,

³제주대학교 농생명소재안전성연구센터

요약 본 연구는 시설재배 망고에 살포한 profenofos의 과피 및 과육 내 잔류 특성을 규명하고, 농약 등록 및 식품 안전성 평가를 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다. 시험약제(deltamethrin + profenofos 유제, 0.6+15.0%)의 1,000배 희석액을 수확일 기준 7일전과 당일에 2회 처리한 후, 0일, 7일, 14일차에 수확한 망고 과실을 과피와 과육으로 분리하여 분석하였다. Profenofos는 GC-FPD로 분석하였으며, 정량한계는 0.01 mg/kg이었고, 회수율은 과피와 과육 모두 유효범위(70-120%)를 만족하였다. 평균 잔류량은 과피에서 0.84 mg/kg (0일차), 0.24 mg/kg (7일차), 0.01 mg/kg (14일차)로 확인되었으며, 과육에서는 모든 수확 시점에서 정량한계 미만으로 검출되었다. 안전성 평가 결과, 과피의 %ADI는 0일차 0.030%에서 14일차 0.00035%로 감소하였고, 과육은 모든 수확 시점에서 0.00035% 미만이었다. 결론적으로 profenofos는 대부분 과피에 잔류하고, 식용 부위인 과육에서는 검출되지 않아, 망고 섭취 시 인체 위해 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

색인어: 시설재배, 망고, 잔류농약, 프로페노포스