



시설 상추 중 Cyantraniliprole의 엽면잔류 특성 규명 및 농작업자 재진입 위해성 평가

김병준 · 양시영*

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 독성위해평가과

Determination of Dislodgeable Foliar Residue and Dissipation Rate of Cyantraniliprole in Lettuce for Worker Risk Assessment and Re-entry Interval Estimation

Byung Joon Kim and Si Young Yang*

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

(Received on December 19, 2025. Revised on January 4, 2026. Accepted on January 5, 2026)

Abstract In our study, We evaluated the dislodgeable foliar residue (DFR) and dissipation rate (DT_{50}) of cyantraniliprole formulations (5% dispersible concentrate, DC; 5% emulsifiable concentrate, EC) in greenhouse-grown lettuce. These parameters were analyzed to assess risk to workers and to estimate re-entry intervals (REI) to compare the impact of measured input values to that of default values. The pesticides were applied to lettuce at the recommended dilution rates. Following the application of pesticides, Samples were collected at 0, 1, 2, 3, 5, 7, and 10 days) and quantified by LC-MS/MS(liquid chromatography-mass spectrometry). Method validation showed recoveries above 90% with relative standard deviations $\leq 5\%$. Mean DFR values at day 0 were 0.950 and 0.919 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$ for DC and EC, respectively. By day 10, DFR decreased to 0.173 (DC) and 0.091 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$ (EC), with corresponding dissipation rates of 81.8% and 90.1%, respectively. The estimated DT_{50} values were 4.6 days for DC and 3.3 days for EC. Using the CropLife Europe OPEX calculator, we calculated % AOEL(acceptable operator exposure level) and REIs under three scenarios: no protective clothing, protective clothing without gloves, and protective clothing with gloves. When EFSA(european food safety authority) default values (DFR 3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$; DT_{50} 30 days) were applied, % AOEL values were 272.9%, 118.9%, and 29.3%, yielding REIs of 44, 8, and 0 days, respectively. In contrast, application of measured DFR and DT_{50} values resulted in % AOEL $< 100\%$ across all scenarios, with an REI of 0 days. Our study demonstrates that the use of empirical DFR and DT_{50} values improves the accuracy of assessments of risk to worker, making it pivotal to establish a framework that reflects the condition of domestic cultivation by constantly collecting and evaluating such data.

Key words: Cyantraniliprole, Dislodgeable foliar residue (DFR), Dissipation rate, Lettuce half-life, Risk assessment

서론

현대 농업에서 농약은 병해충과 잡초를 효과적으로 방제하여 작물의 수량과 품질을 향상시키는 핵심 수단으로 활용

되고 있다. 그러나 농약은 본질적으로 독성을 지닌 물질로서(Tahir and Anwar., 2012), 농약 노출에 대한 안전관리는 농업현장의 지속가능성과 직결되는 중요한 과제이다.

농작업자는 농약 살포 지역에 재진입하여 수확, 제초, 이식 등 재배 관리를 수행하는 인력으로 정의된다(EFSA, 2014; EFSA, 2022; Toumi et al., 2019). 농작업자는 농약을 직접 살포하는 사람이 아님에도 불구하고, 잔류 농약이 존재하는

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

작물 및 재배 환경에 반복 노출됨에 따라 잠재적인 건강 위험을 입을 수 있다(Amoatey et al., 2020; Xie et al., 2020). 따라서 농작업자 노출 특성을 반영한 위해성평가 기반의 안전관리가 필요하다.

농작업자의 주요 농약 노출 경로는 피부노출로 알려져 있으며, 농작업 중 작물 표면 잔류물과의 접촉에 의해 잔류 농약이 인체로 전이되는 과정이 핵심 노출 기전이다(Gunther et al., 1973; Ngo et al., 2009). 이때 엽면잔류량(dislodgeable foliar residue, DFR)은 피부로 전이될 수 있는 잔류 농약의 양을 나타내며, 소실 반감기(dissipation rate, DT_{50})는 시간 경과에 따른 잔류량 감속 속도를 의미한다. 따라서, DFR과 DT_{50} 은 농작업자 피부노출량 및 위해성평가 결과에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수로 간주된다(Badawy et al., 2023; Duporte et al., 2024; Kasiotis et al., 2017).

유럽식품안전청(EFSA)에서는 농작업자 위해성평가를 위한 기본값으로 DFR과 DT_{50} 을 각각 $3 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$ 와 30일로 제시하고 있다 (EFSA, 2014; EFSA, 2022). 그러나 최근 연구에서는 작물, 제형 및 재배환경에 따라 실측된 DFR 및 DT_{50} 이 EFSA의 기본값과 상이하게 나타날 수 있음이 보고되고 있다 (Duporté et al., 2024; Kasiotis et al., 2017; Kluxen et al., 2021; Shi et al., 2024). Duporté et al. (2024)는 사과나무 잎의 DFR 값은 $0.834 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$ 로 제시하였고 First-order kinetic를 사용한 DT_{50} 은 6.2일을 나타내었다. Kaiotis et al.(2017)는 토마토, 고추에서 DFR 값은 $0.0216\sim 0.5946 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$ 로 보고하였다. 또한, Shi et al.(2024)은 100건 이상의 기존 DFR 연구 데이터를 분석한 결과, EFSA에서 사용되는 DFR_0 기본값이 전체 데이터 분포의 약 92분위(percentile)에 해당함을 보고하였다. 이는 대부분의 실측 DFR 값이 EFSA default 값인 $3 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$ 보다 낮을 가능성이 높음을 의미하며, 현행 default 값이 보수적으로 설정되어 있음을 시사한다. 따라서, 현재 위해성평가 도입 초기단계에 있는 국내 농작업자 위해성평가 연구를 위해서는 국내 재배환경을 반영한 실측데이터의 축적과 함께 기본 입력값의 적정성에 대한 검토가 필요하다.

Cyantraniliprole은 곤충의 ryanodine receptor를 표적으로 하는 diamide 계열(IRAC 그룹 28)의 살충제로, 해충의 칼슘 항상성을 교란하여 근육 마비를 유발함으로써 살충효과 나타낸다(Thomas et al., 2013). Cyantraniliprole은 총채벌레 등 흡즙성 해충과 나방류 해충 방제를 위해 사용되며, 과수 및 엽채류 등 다양한 작물에 광범위하게 적용된다(RDA, 2025). 이러한 특성으로 인해 농작업자는 재배·관리 및 수확 과정에서 해당 농약성분에 반복적으로 노출될 가능성이 높다. 따라서 노출 관리 측면에서 잔류 및 노출 특성의 구명이 필요하다.

상추는 국내에서 시설 및 노지에서 널리 재배되는 대표적인 엽채류로, 잎 전체를 식용으로 사용한다. 국내 유통 농산물

잔류농약 모니터링 연구에서 상추는 반복적으로 조사되는 대표 엽채류 작물로 보고되고 있으며 유통 단계에서도 잔류 농약 관리가 필요한 중요 작물로 인식되고 있다(Han et al., 2012; Kim et al., 2013; Noh et al., 2011). 또한 상추는 수확, 정식, 관리작업 등이 수작업 중심으로 수행되는 특성상 작업자의 손과 팔, 신체 부위가 엽면과 직접 접촉할 가능성이 높아, 농작업자 피부노출이 상대적으로 크게 발생할 수 있는 작물로 평가된다(Yang et al., 2024).

따라서 본 연구에서는 상추를 대상으로 엽면잔류량 분석법을 확립하고 확립하고 이를 바탕으로 DFR, DT_{50} 설정 및 농작업자 재진입시간을 도출하고자 하였다. 또한 실측된 DFR 및 DT_{50} 을 적용한 평가결과를 EFSA의 기본값 적용 결과와 비교함으로써, 입력 변수에 따른 위해성평가 및 재진입시간 산정 결과의 차이를 정량적으로 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

시약, 표준물질 및 기기조건

시험 약제로는 cyantraniliprole 5% 분산성액제와 cyantraniliprole 5% 유제를 사용하였다. Cyantraniliprole 표준품은 Sigma-Aldrich(St. Louis, MO, USA)에서 analytical standard grade를 구매하여 사용하였다. Methanol과 distilled water는 Fisher Scientific(Waltham, MA, USA)의 HPLC grade를 사용하였으며, QuEChERS EN extraction kit는 Agilent(San Francisco, CA, USA) 제품을 사용하였다. 또한 dioctyl sulfosuccinate sodium salt(aerosol™ OT)는 Fisher Scientific(Waltham, MA, USA)의 제품을 사용하였다. 추출 장비는 VIBA X.30v(Collomix, Gaimersheim, Germany), 원심분리기는 Combi-514R(Hanil Scientific, Gimpo, Korea)을 사용하였다.

분석기기 조건

분석은 AB Sciex Triple Quad™ 4500 LC-MS/MS 시스템과(AB Sciex, Framingham, MA, USA)과 UPLC 시스템(Shimadzu SCL-40, Shimadzu, Kyoto, Japan)을 이용하여 수행하였다. 컬럼은 XSelect® CSH™ C18 ($2.5 \mu\text{m}$, $2.1 \times 100 \text{ mm}$, Waters, Miliford, MA, USA)을 사용하였다. 이동상은 (A) 0.1% formic acid 및 5 mM ammonium acetate가 함유된 물과 (B) 0.1% formic acid 및 5 mM ammonium acetate가 함유된 methanol로 구성하였으며, 이동상 및 기타 기기조건은 Table 1에 제시하였다.

상추 재배 조건 및 약제 처리

상추는 시설하우스($8.8 \times 7.0 \text{ m}$) 내 온실 베드($2.5 \times 0.9 \text{ m}$)에서 재배하였다. 종자는 청치마 상추(FarmHannong Co., Ltd., Seoul, Korea)를 사용하였다. 종자는 72구 모종 트레이에 상토

Table 1. Instrumental condition

| | | | | |
|-----------------------------------|--|------|-------|--------------------|
| Instrument | AB Sciex Triple Quad™ 4500 LC/MS with Shimadzu SCL-40 UPLC | | | |
| Column | Xselect® CSHTM C18 2.5 µm 2.1 × 100 mm | | | |
| Mobile phase A | 0.1% formic acid + 5 mM ammonium acetate in water | | | |
| Mobile phase B | 0.1% formic acid + 5 mM ammonium acetate in methanol | | | |
| | Time (min) | %A | %B | Flow rate (mL/min) |
| | Initial | 90.0 | 10.0 | 0.2 |
| Gradient | 2.0 | 40.0 | 60.0 | 0.2 |
| | 5.0 | 0 | 100.0 | 0.2 |
| | 7.0 | 0 | 100.0 | 0.2 |
| | 7.1 | 90 | 10.0 | 0.2 |
| | 10.0 | 90.0 | 10.0 | 0.2 |
| Column temp (°C) | 40 | | | |
| Ionization mode | ESI positive | | | |
| Ion spray voltage (V) | 5500 | | | |
| Curtain gas (L/hr) | 35 | | | |
| Source temp. (°C) | 400 | | | |
| MRM conditions | | | | |
| Compounds | Cyantraniliprole | | | |
| Retention time (min) | 4.84 | | | |
| Parent ion (m/z) | 472.9 | | | |
| Daughter ion (m/z) | 283.8 | | | |
| Declustering potential energy (V) | 95 | | | |
| Collision energy(V) | 24 | | | |

(Punong Co., Ltd., Gyeongju, Korea)를 충전한 후 파종하였다. 파종 약 30일 후 모종을 포트(11 × 10 cm)에 정식하였으며, 정식 후 약 40일이 경과한 시점에 포트당 잎 수가 5매 이상이고 잎의 크기가 충분한 개체를 선발하여 시험에 사용하였다. 시설 하우스 내 재배 온도는 14.1–20.3°C, 상대습도는 48–69%였다.

시험약제의 조제는 농약안전정보시스템의 정보를 참고하여 분산성액은 10 mL/20 L(2000배 희석), 유제는 20 mL/20 L(1000배 희석)로 희석하였다. 살포물량은 농촌진흥청 고시 [별표4]에 따라 1,200 L/ha를 기준으로 하였다. 본 연구에서는 상추 재배면적(9 m²)을 고려하여 1.1 L를 살포물량으로 하였다. 해당 시험약제를 backpack sprayer를 사용하여 작물 상단으로 30 cm 거리에서 잎 표면이 약액으로 균일하게 적셔 질 때까지 상추 잎에 경엽살포하였다. 농약 살포 후 분석 시료는 잎 표면의 살포액이 완전히 증발된 시점인 약제 살포 후 약 3시간 후에 수확하였다. 각 처리구에서 1포트를 1반복으로 설정하였으며, 처리구 가장자리의 포트는 제외하고 내부 구역에서 무작위로 포트를 선정하였다. 선정된 포트는 잎의 크기가 균일하고 시들지 않은 개체를 포함한 경우로 한정하였다. 각 수확 시점마다 3처리구에서 각각 1포트씩을

수확하여 일차당 총 3개 포트(n = 3)를 확보하였다. 시료 수확은 농약 살포 후 0, 1, 2, 3, 5, 7 및 10일차에 수행하였다. 시료 수확은 각 포트당 상추 잎 3–5개를 무작위로 선정하여 다음 잎 표면의 농약이 소실되지 않게 핀센을 활용하여 상추 잎을 고정한 후 상추 마디를 가위로 조심스럽게 절단하여 시료를 취하였다. 잎 표면적은 Fiji 소프트웨어(ImageJ, National Institutes of Health, USA)를 이용하여 측정하였다. 수확된 시료는 수확 당일 polyethylene 병에 담아 전처리하였다.

시료의 전처리 및 분석법 검증

상추 잎이 담긴 polyethylene 병에 aerosol OT solution 0.02% 용액 100 mL를 첨가한 후 240 rpm에서 20 min 진탕하여 1차 추출을 수행하였다. 추출 후 상등액 10 mL를 50 mL falcon tube로 옮겼으며, polyethylene 병에 남아 있는 추출액은 모두 제거하였다. 이후 일만 남아 있는 polyethylene 병에 aerosol OT solution 0.02% 용액 100 mL를 다시 첨가하여 동일한 조건(240 rpm, 20 min)에서 2차 추출을 수행하였고, 상등액 10 mL를 50 mL falcon tube로 옮겼다. 1차 및 2차 추출액이 담긴 falcon tube에 각각 acetonitrile 10 mL를

첨가한 후, 700 rpm에서 2 min 진탕하였다. 진탕 후 falcon tube를 -20°C에서 15 min 정치한 뒤 QuEChERS EN salt를 첨가하고 1 min 동안 격렬히 혼합하였다. 이후 4,000 rpm에서 10 min 동안 원심분리하였으며, 분리된 상등액을 기기 분석에 사용하였다.

농촌진흥청 고시 [별표4] 농약의 인축독성 시험성적서 검토기준에 따르면, cyantranilprole의 농작업자노출허용량은 0.036 mg/kg bw/day로 설정되어 있으며, 모화합물에 대해서만 제시되어 있다. 이에 따라 본 연구에서는 cyantranilprole 모화합물만을 분석 대상으로 하였다. 시료 전처리 및 분석법 검증에 위해 Codex Alimentarius Commission의 Guidelines on Performance Criteria for Methods of Analysis for the Determination of Pesticide Residues in Food and Feed, CXG 90-2017를 참고하여 LOQ와 5LOQ 수준에서 회수율 시험을 수행하였다(Codex Alimentarius, 2017). LOQ는 cyantranilprole 표준품을 분석하여 signal-to-noise ratio(S/N ratio)가 10 이상인 농도로 설정하였다. 상추 잎에 LOQ 및 5LOQ 수준으로 cyantranilprole을 처리하였고, 각 수준에서 5반복(n = 5) 실험을 수행하였다.

DFR 및 엽면잔류 DT₅₀ 산출

DFR은 엽면잔류량, 잎면적, 환산계수를 다음과 같은 식으로 적용하여 산출하였다. $DFR(\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}) = \text{잔류량}(\mu\text{g}) / \text{잎면적}(\text{cm}^2) \times \text{환산계수}$

여기서 잔류량은 추출액의 잔류농도($\mu\text{g}/\text{L}$) × 추출액 최종 부피(L)이며, 환산계수는 제품사용량(L/ha) × 품목의 유효 성분 함량(g/L)을 ha 당 유효성분 1 kg 사용한 값으로 환산한 계수(a.i.kg/ha)이다. 엽면 잔류량 감소는 다음과 같이 $C_t = C_0 \exp(-kt)$ 로 산출하였으며, 반감기(DT₅₀)는 $DT_{50} = \ln(2)/k$ 식을 이용하여 계산하였다. 여기서 C_t는 시간 t에서의 잔류량, C₀는 0일차 잔류량, k는 잔류 감소 속도 상수이다.

농작업자 위해성평가 및 재진입기간 산정

농작업자의 위해성 평가 및 재진입 평가는 CropLife

Europe에서 제공하는 OPEX calculator를 이용하여 수행하였다. 위해성평가는 DFR을 적용하여 농작업자 노출량을 산정한 뒤 AOEL 대비 백분율(% AOEL)로 위해성 여부를 판단하였다. 즉, % AOEL이 100% 이상인 경우 위해성 있음, 100% 미만의 경우 위해성 없음으로 판단하였다. 재진입 평가는 DFR과 DT₅₀을 함께 적용하여 시간 경과에 따른 농작업자 노출량 감소 사항을 반영하였다. 재진입 기간은 % AOEL이 100% 미만으로 낮아지는 시점으로 설정하였다.

한편, EFSA에서 제시한 DFR 및 DT₅₀ 기본값과 실험 결과값 적용에 따른 위해성평가 및 재진입 기한 설정의 차이를 알아보기 위해 EFSA의 기본값(DFR, 3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$; DT₅₀, 30일)을 적용하였을 때와 실제 도출된 결과값을 적용하여 위해성평가와 재진입 기한을 비교하였다.

결과 및 고찰

시료 전처리 조건 및 분석법 검증

농도별 cyantranilprole을 분석한 matrix matched 검량선의 결정계수(r^2)는 Table 2와 같이 1–50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 범위에서 0.99 이상의 직선성을 확인하였다. Cyantranilprole의 LOQ는 signal-to-noise ratio(S/N)가 10 이상인 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 로 조사되었다. LOQ와 5LOQ 수준에서 회수율은 86.1~98.0% 수준이었으며, 상대 표준편차는 5% 이하를 나타냈다. 이러한 결과는 농촌진흥청고시 제2024-5호 ‘잔류성 시험의 기준 및 방법’의 분석법 검증기준에 부합하였으며, 본 연구에서 수행한 시료 전처리 및 분석법은 충분한 정량 성능과 재현성이 확보되었다고 판단된다.

한편, 본 연구에서 추출용매로 aerosol OT solution을 사용하였다. Aerosol OT solution은 sodium dioctyl sulfosuccinate 성분의 음이온성 계면활성제로, 미국 EPA에서 DFR 추출용매로 사용하고 있는 성분이다(US EPA, 2012; US EPA 2014; US EPA 2015). 이는 계면활성성분을 활용하여 잎 조직의 손상을 최대한으로 줄이면서 잎표면 잔류물을 효과적으로 추출하기 위한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 시료

Table 2. Recovery and precision of the analytical method for cyantranilprole in lettuce

| Fortified Level | Extraction | Recovery(%) | | | | | Sum average (%) | CV | Calibration equation | r^2 |
|-----------------|-----------------|-------------|------|------|------|------|-----------------|-----|----------------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | |
| LOQ | 1 st | 82.7 | 83.0 | 86.2 | 80.4 | 86.3 | 96.3 | 2.1 | $y=2557x - 6182.1$ | 0.9998 |
| | 2 nd | 13.8 | 13.2 | 11.8 | 12.6 | 11.5 | | | | |
| | Sum | 96.5 | 96.2 | 98.0 | 93.0 | 97.8 | | | | |
| 5LOQ | 1 st | 79.9 | 83.8 | 85.7 | 75.7 | 82.2 | 91.6 | 4.1 | $y=2557x - 6182.1$ | 0.9998 |
| | 2 nd | 9.7 | 10.3 | 9.8 | 10.5 | 10.6 | | | | |
| | Sum | 89.6 | 94.1 | 95.6 | 86.1 | 92.6 | | | | |

Table 3. Comparison of extraction efficiency between aerosol OT solution concentration

| Aerosol OT solution (%) | Extraction | Recovery(%) | | |
|-------------------------|-----------------|-------------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 0.01 | 1 st | 55.6 | 52.8 | 65.2 |
| | 2 nd | 13.5 | 15.9 | 16.4 |
| | 3 rd | 6.3 | 4.2 | 7.8 |
| | Sum | 75.3 | 72.9 | 89.4 |
| 0.02 | 1 st | 92.8 | 88.2 | 87.8 |
| | 2 nd | 17.5 | 10.6 | 8.7 |
| | Sum | 110.3 | 98.8 | 96.5 |

전처리법의 확립을 위해 aerosol OT solution 농도에 따른 추출시간을 비교 분석하였다. 그 결과 aerosol OT solution 0.01%는 30 min, 3회 반복 추출하였을 경우 약 80% 수준의 회수율을 나타냈었다. 반면, aerosol OT solution 0.02%는 20 min, 2회 반복 추출하였을 경우 약 100%의 회수율이 관찰되었다(Table 3). 따라서 본 연구에서는 aerosol OT solution 0.02%를 최적추출 조건으로 정립하여 cyantraniliprole의 엽면잔류 소실특성 조사에 활용하였다.

Cyantraniliprole의 DFR 및 엽면잔류 소실특성

Cyantraniliprole 분산성액제와 유제의 DFR 0일차 결과는 Table 4에 제시하였다. Cyantraniliprole 분산성액제의 DFR 0일차 평균값은 0.950 µg/cm²/a.i.kg/ha 이었으며, Cyantraniliprole 유제의 DFR 0일차 평균값은 0.919 µg/cm²/a.i.kg/ha로 두 제형간 유의한 DFR 차이는 관찰되지 않았다(t-test, p = 0.935). 이러한 결과는 환경 조건이 제어된 온실 내에서 동일 작물을 대상으로 시험을 수행함에 따라, 제형적 특성보다는 재배 환경의 영향이 지배적으로 작용했기 때문으로 풀이된다. 기존 연구들을 살펴보면 DFR은 잎 표면 특성, 제형, 계면활성제, 농약 살포 후 조건에 따라 복합적으로 영향을 받는다고 보고되고 있다. Badawy et al.(2023)의 연구에서는 difenoconazole 10% 유제를 작물별로 적용하였을때 잎의 중

류와 표면특성에 따라 DFR 수준이 크게 달라질 수 있음을 보고하였다. 또한, Badawy et al.(2024)의 연구에서는 difenoconazole 10% 유제와 수화제의 DFR 수준을 비교한 결과, 강낭콩과 유채에서의 제형간 DFR은 유사했으나, 토마토에서는 제형간의 차이를 보고하였다. 이는 제형의 차이가 작물의 잎 표면 조건에 따라 제한적으로 발현될 수 있다는 것을 의미한다. Ossola and Farmer(2024)는 잎 표면의 큐티클과 epicuticular wax의 조성과 미세구조가 잎 표면의 소수성 및 표면 거칠기를 결정하며, Hu et al.(2024)은 이러한 잎 표면 특성이 농약 droplet의 접촉각과 거동을 좌우하여 부착 및 확산 특성에 영향을 미친다고 보고하였다. 따라서 토마토와 같이 잎 표면 구조와 소수성이 뚜렷한 작물에서는, 제형에 포함된 용매나 계면활성제의 물리화학적 특성 차이가 잎 표면과의 상호작용에 직접적으로 반영되어 DFR의 제형 간 차이로 나타날 가능성이 있다. 더불어 계면활성제 종류와 농약살포 후 조건(관수, 수관 습윤, 이슬 등)은 잎 표면 잔류물 상태(습윤, 건조, 결정화 등)를 변화시켜 DFR에 영향을 줄 수 있는 요인으로 보고되었다(Jeffries et al., 2016). 종합하면, DFR은 제형 자체의 차이뿐만 아니라 잎 표면의 물리·화학적 특성, 제형에 포함된 계면활성제 및 부가재(inert ingredients) 등 복합적인 요인에 의해 결정되는 지표로 판단된다. 본 연구에서 분산성액제와 유제 간 유의적인 차이가 관찰되지 않았으나, 이는 특정 작물과 실험 조건에 한정된 결과로, 제형 간 차이가 존재하지 않는다고 일반화하기에는 한계가 있다. 특히 작물이 달라질 경우 잎 표면 구조 및 소수성 특성이 변화함에 따라 제형의 거동과 잔류 특성 또한 달라질 수 있다. 따라서 국내 농업환경 조건과 주요 재배 작물을 반영하여, 다양한 작물과 제형, 살포 조건을 고려한 DFR 자료의 축적과 체계적인 연구가 향후 필요할 것으로 판단된다.

Cyantraniliprole의 엽면 잔류 소실특성은 Table 5와 Fig. 1에 제시하였다. 분산성액제 처리구의 DFR은 0일차 0.950 µg/cm²/a.i.kg/ha였으며, 10일차 0.173 µg/cm²/a.i.kg/ha로 감소하여 81.8%의 감소율을 나타냈다. 유제 처리구의 DFR은 0일차 0.919 µg/cm²/a.i.kg/ha에서 10일차 0.091 µg/cm²/a.i.kg/ha로 감소

Table 4. DFR and DT₅₀ of cyantraniliprole 5% DC and cyantraniliprole 5% EC

| Pesticide Product | Residue amount (µg) | Leaf area (cm ²) | Residue amount per leaf area (µg/cm ²) | Conversion factor ^{a)} | DFR (µg/cm ² /a.i.kg/ha) | Average DFR (µg/cm ² /a.i.kg/ha) |
|-------------------|---------------------|------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| DC | 11.3 | 387.0 | 0.029 | 33.3 | 0.975 | 0.950 |
| | 18.6 | 446.7 | 0.042 | | 1.386 | |
| | 5.4 | 368.6 | 0.015 | | 0.490 | |
| EC | 28.3 | 329.5 | 0.086 | 16.7 | 1.432 | 0.917 |
| | 19.2 | 515.7 | 0.037 | | 0.623 | |
| | 18.3 | 436.0 | 0.042 | | 0.701 | |

^{a)}Conversion factor = 1/application rate(L/ha) / dilution factor × active ingredient content rate (%) / 100

Table 5. DFR residue amount on each harvest day

| Day | Cyantraniliprole 5% DC ^{a)} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$) | Cyantarniliprole 5% EC ^{b)} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{a.i.kg}/\text{ha}$) |
|------------------|---|---|
| 0 | 0.950 | 0.919 |
| 1 | 0.639 | 0.542 |
| 2 | 0.645 | 0.459 |
| 3 | 0.378 | 0.438 |
| 5 | 0.351 | 0.286 |
| 7 | 0.322 | 0.185 |
| 10 | 0.173 | 0.091 |
| DT ₅₀ | 4.55 | 3.27 |

^{a)}Dispersible concentrate
^{b)}Emulsifiable concentrate

하여 90.1%의 감소율을 보였다. 경시적 잔류 감소에 1차 반응식(first-order kinetic model)을 적용한 결과, Cyantraniliprole의 엽면잔류 DT₅₀는 분산성액제 4.6일, 유제 3.3일로 산출되어 유제가 상대적으로 빠른 소실속도로 보였다.

본 연구에서 산출된 cyantraniliprole의 엽면잔류 DT₅₀은 작물잔류 연구에서 보고된 DT₅₀(양배추 3.5–4.2일, 청경채 3.0–5.4일, 멜론 4.4일)과 유사한 수준으로 관찰되었다(Kumar et al., 2021; Kwannimit et al., 2022; Zhu et al., 2025). 그러나 작물잔류 DT₅₀은 작물 표면과 내부에 존재하는 잔류량의 감소를 반영하는 반면, DFR 기반 DT₅₀은 잎 표면에서 작업자에게 전이 가능한 잔류물의 소실 특성을 반영한다는 점에서 차이를 보인다. Badawy et al.(2022)는 DFR의 감소가 반드시 화학적 분해나 식물체 내 대사에 의한 소실을 의미하는 것은 아니며, 잎 표면에 흡착하여 작업자에게 전이되지 않는 잔류물을 포함한다고 제시하였다. 즉, DFR은 잎 표면에 남아 있는 잔류물을 세척하여 농작업자에게 전이가능한 양을 측정하는 지표이며, 이 과정에서 잎 표면에 흡착, 고착, 결정화 등에 의해 강하게 부착된 잔류물은 농작업자에게 전이되지 않는 것으로 간주하고 있다.

이러한 점을 고려할 때, 엽면 잔류물의 감소는 표면 고착

및 큐티클층 흡착 등에 의한 비전이하 과정을 포함하므로, 작물 내부 잔류 소실 특성과 직접적으로 비교하는 데에는 한계가 있다. 따라서 엽면 DFR 소실 특성에 대한 이해를 확장하기 위해 향후 다양한 작물을 대상으로 한 추가 연구가 필요하다.

농작업자 위해성 및 재진입 기간

본 연구에서 도출한 DFR 및 DT₅₀ 값은 CropLife OPEX calculator에 입력되어 농작업자 위해성평가(% AOEL)와 재진입기간 산정에 활용되었으며, 그 결과는 Fig. 2와 Table 6에 제시하였다. 0–10일차에 실측한 DFR 값을 1차 반응식에 적용하여 엽면잔류 DT₅₀를 산출하였고, 도출된 DFR₀와 DT₅₀를 OPEX calculator에 입력함으로써 시간 경과에 따른 전신 노출량이 계산되었다. 산출된 전신노출량은 체중으로 보정한 후 AOEL과 비교하여 % AOEL(전신노출량/AOEL × 100)로 제시하였으며, 재진입기간은 시간 경과에 따른 % AOEL 양상을 확인하여 해당 값이 100% 이하로 감소하는 최소 시점을 기준으로 산정하였다.

농작업자 노출 시나리오는 (i) 보호복 미착용, (ii) 장갑을 제외한 보호복 착용, (iii) 장갑과 보호복을 모두 착용의 세 조건으로 구성하였다. EFSA 권장 기본값을 적용한 경우, 세 시나리오에서 % AOEL은 각각 272.9%, 118.9%, 29.3%로

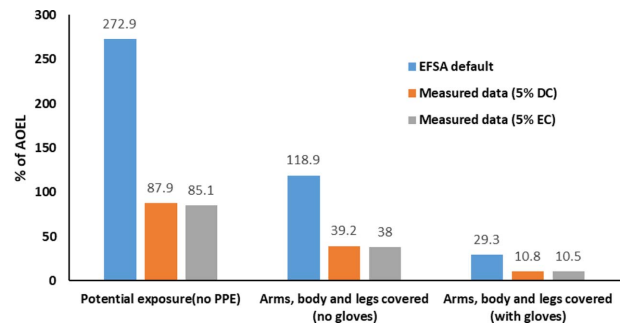


Fig. 2. Comparison of estimated % AOEL across exposure scenarios using EFSA defaults parameters versus measured DFR values for cyantraniliprole formulations (5% DC, dispersible concentrate; 5% EC, emulsifiable concentrate).

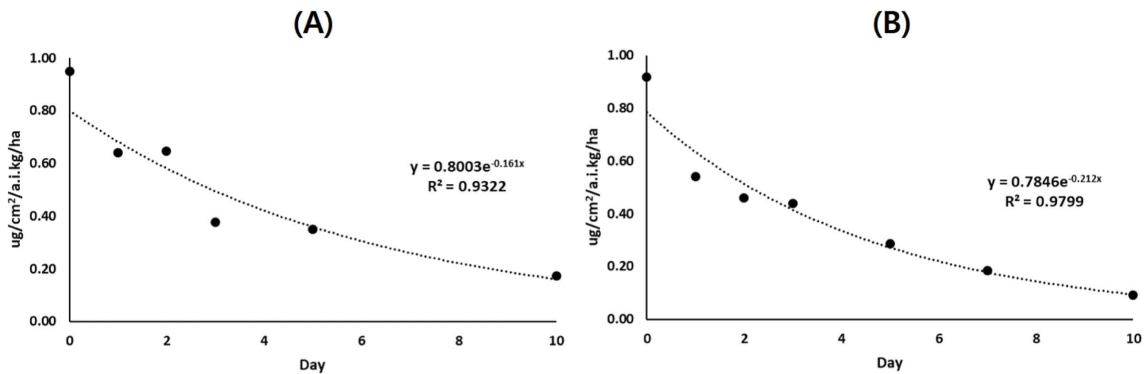


Fig. 1. Dissipation pattern of cyantraniliprole 5% dispersible concentrate (A), cyantraniliprole 5% emulsifiable concentrate (B).

Table 6. Re-entry intervals (REI) for cyantraniliprole in lettuce calculated by EFSA default of DFR and DT₅₀ values, DFR and DT₅₀ values obtained from cyantraniliprole 5% dispersible concentrate and cyantraniliprole 5% emulsifiable concentrate

| DATA | Potential exposure | PPE ^{a)} without glove | PPE ^{a)} with glove |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|
| EFSA default values | 44 | 8 | 0 |
| Cyantraniliprole 5% DC ^{b)} | 0 | 0 | 0 |
| Cyantraniliprole 5% EC ^{c)} | 0 | 0 | 0 |

^{a)}Personal protection equipment (arms, body and legs covered)

^{b)}Dispersible concentrate

^{c)}Emulsifiable concentrate

산출되었으며(Fig. 2), 이에 따른 재진입기간은 각각 44일, 8일 및 0일로 나타났다(Table 6). 반면, cyantraniliprole 5% 분산성액제 및 유제의 실측 DFR과 DT₅₀를 적용한 경우, 모든 시나리오에서 % AOEL은 100% 이하였고(Fig. 2), 재진입기간은 모두 0일로 평가되었다(Table 6). 이는 위해성 평가 모델에 입력되는 변수 설정값에 따라 평가 결과의 변동성이 매우 크다는 것을 시사한다. 이는 잔류 및 노출 수준이 작물 특성, 재배환경, 농약 살포 형태 등 다양한 요인의 영향을 받는다는 점을 고려할 때, 국내 재배환경의 특성을 충분히 반영한 실측 자료의 확보가 현실적인 농작업자 위해성평가를 위해 필수적임을 의미한다.

이러한 결과는 해외 농작업자 안전관리 제도에서 강조하는 실측 자료 기반의 정량적 노출 평가 접근법과도 맥을 같이 한다. 미국 환경보호청(U.S. EPA)의 Worker Protection Standard는 농작업자의 교육, 개인보호장비 착용, 재진입기간 설정 등을 법적으로 규정함으로써 농약 노출을 체계적으로 관리하고 있으며(U.S. EPA, 2014), 유럽연합(EU)의 EFSA 가이드라인 또한 작물 유형, 제형, DFR, 보호장비 착용 여부 등 다양한 변수를 고려한 모델 기반 평가를 통해 재진입기간 및 보호조치 설정을 권고하고 있다(EFSA, 2014; EFSA, 2022). 이러한 해외 사례는 농작업자 보호가 보수적인 기본값 적용이 아닌, 실제 재배환경을 반영한 정량적 노출 평가에 기반해야 함을 보여주며, 국내 재배환경 특성을 반영한 실측 DFR 자료의 확보가 현실적인 농작업자 위해성평가를 위해 필수적임을 시사한다.

국내에서는 농작업자의 농약 노출을 정량적으로 평가하기 위한 연구가 수행되어 왔으나, 실제 포장 조건과 작업 환경을 반영한 노출 측정의 중요성이 지속적으로 제기되고 있다(Kim et al., 2011). 또한 국내 연구에 따르면 농작업자의 개인보호장비 착용률은 전반적으로 낮으며, 보호장비의 종류 및 착용 방식에 따라 노출 저감 효과에 큰 차이가 나타나는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2019). 이러한 현황을 고려할 때, 농작업자 위해성평가의 신뢰성을 높이기 위해서는 실제

농작업 현장에서의 보호복 착용 실태와 보호율에 대한 조사가 필요하다. 보호복의 종류와 착용 방식에 따라 노출 저감 효과가 달라질 수 있으므로, 현장 기반 자료를 위해성평가에 반영하는 연구가 요구된다. 더 나아가 위해성평가는 노출 수준 산정에 그치지 않고, 농가에서 보호복 착용을 유도할 수 있는 제도적·교육적 지원으로 이어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 상추에서 cyantraniliprole의 엽면 잔류 특성을 규명하고, 실측된 일차별 엽면 잔류량을 기반으로 반감기를 산출하여 농작업자 위해성평가를 수행하였다. 이러한 접근은 작물 및 농약 특이적 DFR과 엽면잔류 DT₅₀ 자료의 축적이 농작업자 위해성평가 결과와 재진입기간 설정의 불확실성을 감소시키는 데 기여할 수 있음을 보여준다. 따라서 향후 다양한 작물과 농약을 대상으로 한 DFR 및 엽면 잔류 소실 특성에 대한 추가 연구가 필요하며 본 연구에서 제시한 실측 자료와 평가 절차는 향후 국내 농작업자 위해성평가 체계구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2025년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 ‘농약 노출 대상에 따른 농약 노출량 산정모델 개발(PJ01598603)’에서 지원받아 수행되었습니다.

Author Information and Contributions

Byung Joon Kim, Toxicity and Risk Assessment Division, Department of Agro-food safety, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, Researcher.

<https://orcid.org/0000-0002-5300-4246>

Si Young Yang, Toxicity and Risk Assessment Division, Department of Agro-food safety, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, Senior Researcher.

<https://orcid.org/0009-0000-7308-969X>

Research design; Byung Joon Kim, Si Young Yang, pretreatment analysis; Byung Joon Kim, Instrument analysis; Byung Joon Kim, original draft; Byung Joon Kim, Si Young Yang, writing-review and editing; Si Young Yang

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

Amoatey P, Al-Mayahi A, Omidvarborna H, Baawain MS,

- Sulaiman H, 2020. Occupational exposure to pesticides and associated health effects among greenhouse farm workers. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 27(18):22251-22270.
- Badawy MH, Murnane D, Lewis KA, Morgan N, 2022. Development of a new dislodgeable foliar residue analytical laboratory method for pesticides. *Ann. Work Expo. Health* 66(8):1070-1080. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac045>
- Badawy MH, Murnane D, Lewis KA, Morgan N, 2023. A new laboratory method to study the impact of leaf texture on pesticide dislodgeable foliar residues (DFR). *J. Environ. Sci. Health B.* 58(8):555-564.
- Badawy MH, Murnane D, Lewis KA, Morgan N, 2024. The effect of formulation composition and adjuvant type on difenoconazole dislodgeable foliar residue. *J. Environ. Sci. Health B.* 59(8):437-447.
- Codex Alimentarius, 2017. Guidelines on performance criteria for methods of analysis for the determination of pesticide residues in food and feed. CXG 90-2017. FAO/WHO, Rome, Italy.
- Duporté G, Barron E, Bureau M, Menach KL, Baldi I, et al., 2024. Dislodgeable foliar residue measurements and assessment of dermal exposure to captan for workers in apple orchards. *Environ. Sci. Technol.* 58(31):13605-13612.
- 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, 2022. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment of plant protection products. *EFSA J.* 20(1):e07032.
- Gunther FA, Westlate WE, Barkley JH, Winterlin W, Langbehn L, 1973. Establishing dislodgeable pesticide residues on leaf surfaces. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 9(4):243-249.
- Han SH, Park SK, Kim OH, Choi YH, Seoung HJ, et al., 2012. Monitoring of pesticide residues in commercial agricultural products in the northern area of Seoul, Korea. *The Korean J. Pestic. Sci.* 16(2):109-120.
- Hu B, Li H, Jiang Y, Tang P, Du L, 2024. Review of the interaction mechanism for droplets and foliage under sprinkler irrigation and water-fertilizer integration. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 17(5):1-13. doi:10.25165/j.ijabe.20241705.8892
- Jeffries MD, Gannon TW, Brosnan JT, Ahmed KA, Breeden GK, 2016. Factors influencing dislodgeable 2,4-D plant residues from hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* L. × *C. transvaalensis*) Athletic fields. *PLoS ONE.* 11(2):e0148992.
- Kasiotis KM, Tsakirakis AN, Glass CR, Charistou AN, Anastassiadou P, et al., 2017. Assessment of field re-entry exposure to pesticides: A dislodgeable foliar residue study. *Sci. Total Environ.* 596-597:178-186.
- Kim E, Lee HR, Choi H, Moon JK, Hong SS, et al., 2011. Methodology for quantitative monitoring of agricultural worker exposure to pesticide. *Korean J. Pestic. Sci.* 15(4):507-528.
- Kim HY, Lee SY, Kim CG, Choi EJ, Lee EJ, et al., 2013. A survey on the pesticide residues and risk assessment for agricultural products on the markets in Incheon area from 2010 to 2012. *Korean J. Environ. Agric.* 32(1):61-69.
- Kluxen FM, Felkers E, Baumann J, Morgan N, Wiemann C, et al., 2021. Compounded conservatism in European re-entry worker risk assessment of pesticides. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 121:104864.
- Kumar N, Narayanan N, Banergee T, Sharma RK, Gupta S, 2021. Quantification of field-incurred residues of cyantranilprole and IN-J9Z38 in cabbage/soil using QuEChERS/HPLC-PDA and dietary risk assessment. *Biomed. Chromatogr.* 35(12):e5213.
- Kwannimit T, Ruang-Rit K, Sirasunthorn N, 2022. Dissipation kinetics of cyantranilprole residues in melon grown in field trials using QuEChERS and HPLC-UV. *Asia-Pac. J. Sci. Technol.* 27(2):41
- Lee S, Paik MK, Lee MJ, Shin H, Jeong M, et al., 2019. Pesticide reduction effect of agricultural workers according to the wearing degree of personal protective equipment. *Korean J. Pestic. Sci.* 23(4):339-347.
- Ngo MA, O'Malley M, Maibach HI, 2009. Percutaneous absorption and exposure assessment of pesticides. *J. Appl. Toxicol.*, 30(2):91-114.
- Noh HH, Lee KH, Lee JY, Park HK, Park SH, et al., 2011. Characteristics of pesticide residues in leafy vegetables collected from wholesale and traditional markets in Cheongju. *Korean J. Pestic. Sci.* 15(4):453-462.
- Ossola R, Farmer D, 2024. The Chemical Landscape of Leaf Surfaces and Its Interaction with the Atmosphere. *Chemical Reviews*, 124(9):5764-5794. doi:10.1021/acs.chemrev.3c00763
- Rural Development Administration (RDA), 2025. Pesticide Safety Information System. <https://psis.rda.go.kr>
- Selby TP, Lahm GP, Stevenson TM, Hughes KA, Cordova D, et al., 2013. Discovery of cyantranilprole, a potent and selective anthranilic diamide ryanodine receptor activator with cross-spectrum insecticidal activity. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 23(23):6341-6345.
- Shi Y, Choudhury K, Sopko X, Adham S, Chikwana E, et al., 2024. In-silico prediction of dislodgeable foliar residues and regulatory implications for plant protection products. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 35(5):868-875.
- Tahir S, Anwar T, 2012. Assessment of pesticide exposure in female population living in cotton growing areas of Punjab, Pakistan. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 89(6):1138-1141.
- Toumi K, Joly L, Vleminckx C, Schiffers B, 2019. Exposure of workers to pesticide residues during re-entry activities: A review. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 25(8):2193-2215.
- US EPA, 2012. Dislodgeable Foliar Residue of Diflubenzuron on Orange Trees. Washington, DC, USA.
- U.S. EPA, 2014. 40 CFR Part 170-Worker protection standard 40. Washington, D.C., USA.
- US EPA, 2014. Determination of Dislodgeable Foliar Residues

on Peach Treated with Boscalid. Washington, DC, USA.
 US EPA, 2015. Thiram: Review of Determination of Dislodgeable Foliar Residues on Strawberry Foliage Treated with Thiram. Washington, DC, USA.
 Xie Y, Li J, Guo X, Zhao J, Yang B, et al., 2020. Health status among greenhouse workers exposed to different levels of pesticides: a genetic matching analysis. *Sci. Rep.* 10(1):8714.
 Yang SY, Jo YM, Lim JY, Shin JY, Hong SH, et al., 2024. Risk

assessment of pesticide exposure for agricultural worker cultivating lettuce and perilla using a pesticide exposure estimation model. *Korean J. Pestic. Sci.* 28(4):380-394.
 Zhu Y, Li R, Liu T, Li R, Fang F, et al., 2025. Insights into the fate and risk identification of Cyantraniliprole and Lufenuron based on pak choi (*Brassica rapa* L. subsp. *chinensis*). *Agronomy.* 15(10):2289.

시설 상추 중 Cyantraniliprole의 엽면잔류 특성 규명 및 농작업자 재진입 위해성 평가

김병준 · 양시영*

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 독성위해평가과

요약 본 연구는 시설재배 상추에서 cyantraniliprole 제형(5% 분산성액제, 5% 유제)의 엽면잔류량(dislodgeable foliar residue, DFR)과 소실 반감기(DT₅₀)를 산출하고, 이를 농작업자 위해성 평가 및 재진입 기간 산정에 적용하여 입력값 설정에 따른 영향을 정량적으로 분석하였다. 약제 살포 후 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10일차에 시료를 수확하여(n=3), 0.02% aerosol OT 용액으로 전처리한 후 LC-MS/MS로 정량 분석하였다. 분석법 검증 결과, 회수율은 90% 이상, 상대표준편차는 5%이하로 조사되었다. 0일차 DFR 평균은 분산성액제 0.950, 유제 0.919 µg/cm²/a.i.kg/ha였고, 10일차 DFR은 분산성액제 0.173, 유제 0.091 µg/cm²/a.i.kg/ha로 감소하여 각각 81.8% 및 90.1%의 감소율을 나타냈다. 산출된 DT₅₀은 분산성액제 4.6일, 유제 3.3일이었다. 산출값을 CropLife Europe OPEX calculator에 적용하여 보호구 착용 시나리오별로 위해도(% AOEL)와 재진입 기간을 평가한 결과, EFSA 기본값 적용 시 % AOEL은 272.9, 118.9, 29.3%였으며 재진입 기간은 각각 44, 8, 0일로 산출되었다. 반면, 실측값을 적용한 경우 모든 조건에서 % AOEL이 100% 이하로 평가되어 재진입 기간은 0일로 도출되었다. 본 연구는 실측 DFR 및 DT₅₀의 적용이 농작업자 위해성 평가의 현실성을 제고함을 입증하였으며, 향후 이러한 실측 자료의 지속적인 축적은 국내 여건에 부합하는 과학적인 평가 체계 구축의 핵심 기반이 될 것이다.

색인어: 사이안트라닐리프롤, 엽면잔류량, 소실속도, 반감기, 위해성평가