

Research Article



CrossMark

Open Access

## 전작물 재배를 위해 토양에 혼화처리된 Ethoprophos의 후작물 흡수이행

곽세연<sup>1</sup>, 이상협<sup>1</sup>, 김효영<sup>2</sup>, 신병곤<sup>2</sup>, 김장억<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 농업생명과학대학 응용생명과학부 환경생명화학전공, <sup>2</sup>국립농산물품질관리원 시험연구소 안전성분석과

### Uptake and Translocation of Ethoprophos Mixed with Soil for Cultivation of Preceding Crop into Succeeding Crop

Se-Yeon Kwak<sup>1</sup>, Sang-Hyeob Lee<sup>1</sup>, Hyo-Young Kim<sup>2</sup>, Byung-Gon Shin<sup>2</sup> and Jang-Eok Kim<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>Major in Environment and Life Chemistry, School of Applied Biosciences, College of Agriculture and Life Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, <sup>2</sup>Safety Analysis Division, Experiment Research Institute, National Agricultural Products Quality Management Service, Gimcheon 39660, Korea)

Received: 31 May 2021/ Revised: 14 June 2021/ Accepted: 17 June 2021

Copyright © 2021 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

ORCID

Se-Yeon Kwak

<https://orcid.org/0000-0002-5372-792X>

Jang-Eok Kim

<https://orcid.org/0000-0003-1412-3939>

### Abstract

**BACKGROUND:** Unintentional residual pesticide in soil derived from preceding crops and the transfer to succeeding crops was considered a critical barrier for positive list system (PLS). Thus, an uncertain risk is predicted for ethoprophos applied at cultivation of preceding crop (Korean cabbage) to succeeding crop (spinach).

**METHODS AND RESULTS:** Ethoprophos was treated on soil following the recommended dose and 5 times dose according to the safe use guidelines for Korean cabbage after seeding. On the 4 days after harvesting of preceding crop, spinach was sowed. The initial residual amounts of ethoprophos on soil (7.081-19.493 mg/kg) were decreased to 3.832-7.218 mg/kg until the harvest of Korean cabbage, and then finally decreased to 0.011-0.079 mg/kg after spinach cultivation. The uptake rates of ethoprophos from soil by Korean cabbage were 0.01-0.03% and distributed to root (0.150-0.903 mg/kg) and shoot (0.021-0.151 mg/kg), respectively. The residual amounts of uptake and trans-

location from preceding crop cultivated soil to spinach edible part were found to be below LOQ.

**CONCLUSION:** The plant back internal (PBI) for ethoprophos is not recommended during sequential cultivation of leafy vegetables, since the residual amounts of ethoprophos in spinach were less than MRL (0.02 mg/kg).

**Key words:** Ethoprophos, Preceding crop, Succeeding crop, Translocation, Uptake

### 서론

유기인계 살충제인 ethoprophos(*O*-ethyl *S,S*-dipropyl phosphorodithioate)는 곤충의 acetylcholine esterase(AchE) 작용을 억제하여 신경전달물질인 acetylcholine의 분해가 저해됨으로써 지속적인 자극전달이 신경계의 마비를 유발해 살충효과를 낸다[1]. 신경기능 저해작용을 하는 살충제는 토양에 서식하는 곤충이나 선충에도 광범위하게 작용하는 것으로 알려져 있다[2]. Korea Crop Protection Association (2021)에 따르면 이 농약은 국내에서는 단제와 혼합제의 형태로 토양에서 자라는 뿌리작물이나 가식부가 토양과 가까운 엽채류 및 엽경채류에 대해 거세미나방, 굽병이 및 선충 방제에 주로 사용되고 있다[3].

\*Corresponding author: Jang-Eok Kim  
Phone: +82-53-950-5720; Fax: +82-53-953-7233;  
E-mail: jekim@knu.ac.kr

서울 가락동 농수산물도매시장에서 2010년부터 2년 간 유통된 들깨잎 및 상추 중 검출된 농약은 61종으로 이 중 ethoprophos의 평균 농도는 엽채류 중 잔류허용기준(maximum residue limit, MRL)인 0.02 mg/kg을 초과한 0.192 mg/kg으로 나타났다[4]. 또한, Park 등 (2018)의 국내 유통농산물 잔류농약 부적합 현황 분석에 따르면 다빈도 부적합 검출된 농약 중 ethoprophos가 53건 검출되어 상위 8번째에 해당된다고 보고하였다[5]. 유기인계 농약의 경우 환경 중에서 신속하게 분해되어 잔류성이 적은 것으로 알려져 있으나[6, 7], 많은 사용량으로 인해 재배지 토양에 축적되어 작물 잔류문제를 일으킬 우려가 있기 때문에 토양 잔류 및 후작물 이행에 대한 연구가 필요하다.

우리나라는 안전한 농산물 생산을 위해 2019년 1월 1일부터 농약의 MRL이 설정되어 있지 않은 농산물에 대해 0.01 mg/kg을 일률 적용하는 농약 허용물질목록관리제도(positive list system, PLS)가 시행되었다[8]. 하지만, 우리나라의 농업은 시설재배 위주로 한정된 면적 내에서 연작 및 혼작과 같은 작부체계에 이루어지고 있기 때문에 기존 토양에 잔류하거나 전작물 재배 시 살포된 농약이 후작물로 흡수이행되는 등 비의도적 오염으로 인해 PLS제도에 위반될 우려가 있다. 실제로 우리나라에서 2011년 이후부터 품목등록이 제한된 유기염소계 살충제인 endosulfan이 국내 유통 농산물에서 여전히 검출되고 있으며[9, 10], 이는 신규 오염이 아닌 과거 사용된 농약의 잔류에 의한 것으로 토양잔류 농약이 작물체로 비의도적으로 흡수이행 된다는 것을 보여준다.

현재 미국과 유럽에서는 전작물을 재배하고 후작물을 식재하기까지의 기간인 후작물 식재일(plant back interval, PBI)을 설정하여 농약 제품 라벨에 나타냄으로써 비의도적 오염문제를 관리하고 있다[11]. 이때, PBI 설정을 위한 시험은 국제적 가이드라인에 준수하여 작물 식재 기간을 7-30일, 60-270일, 270-365일 3개의 회전간격으로 노지재배 조건에서 수행되고 있다(OECD, 2018). 우리나라에서도 이러한 비의도적 오염에 대한 안전관리 방안을 마련하기 위해 국내 작부체계 및 실제 농업 여건을 잘 반영하여 후작물 이행 정도를 구명하는 연구가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 재배기간이 짧아 후작물 이행우려가 크고, 현재 농가에서 재배되고 있는 작부체계 중 엽채류인 엇갈이배추를 전작물, 시금치를 후작물로 선정하여 전작물 재배 시 살포한 살충제 ethoprophos의 토양 중 잔류양상 및 전작물과 후작물 중 잔류양상을 조사하고, 이를 통해 후작물로의 이행 여부를 조사하여 안전성을 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 농약 및 시약

시험농약인 ethoprophos의 화학구조는 Fig. 1과 같으며, 표준품은 2,000 µg/mL로 조제된 AccuStandard® (New Haven, CT, USA)의 표준용액을, 농약 제품은 ethoprophos 5% 입제[㈜농협케미칼, 모캡]를 구입하여 사용하였다. 농약

잔류분석에 사용된 용매인 acetonitrile, water 및 methanol은 Honeywell Burdick & Jackson Inc. (Muskegon, MI, USA)의 HPLC grade로 구입하였다. Ammonium formate (>99% 순도)는 Sigma Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA), formic acid (>95% 순도)는 ㈜덕산(Seoul, Korea)에서, 추출 및 정제에 사용된 roQ™ QuEChERS extraction packets, EN method (4 g MgSO<sub>4</sub>, 1 g NaCl, 1 g NaCitrate, 0.5 g disodium citrate sesquihydrate) 및 roQ QuEChERS dSPE Kit (150 mg MgSO<sub>4</sub>, 25 mg PSA)는 Phenomenex® (Torrance, CA, USA)로부터 구입하여 사용하였다.

### 약제살포 및 후작물 이행 시험

엇갈이배추 및 시금치의 시험 포장은 경상북도 칠곡군 왜관읍 금남리에 위치한 비닐하우스 재배 포장을 임대하여 실험하였다. 전작물로 재배한 엇갈이배추의 품종은 겨우내숙음, 후작물로 재배한 시금치의 품종은 월동시금치였다. 시험 구획은 2.0 m × 5.0 m 크기로 하여 1 m의 완충구를 두고 3반복 배치하였으며, 10 cm × 10 cm의 재식밀도가 되도록 파종하였다. 토양살포용 농약인 ethoprophos 입제는 엇갈이배추 파종 5일 후 안전사용기준(KCPA, 2019)에 따라 기준량(6 kg/10a) 및 5배량(30 kg/10a) 두 수준으로 혼화처리하였다. 약제 살포일을 0일로 하여 0, 7, 14, 21 및 30일까지 표층 0-10 cm 깊이의 토양을 각 1 kg 이상 채취한 후 2 mm 체로 쳐 폴리 에틸렌백으로 밀봉하여 -20°C에서 냉동보관한 후 분석 시료로 사용하였다. 전작물인 엇갈이배추는 파종 후 37일차에 일시 수확하여 지하부와 지상부로 구분하고, 지하부에 묻어있는 토양입자를 제거한 후 각각 드라이아이스와 함께 균질화하여 -20°C 이하의 냉동고에 잔류분석 전까지 보관하였다.

후작물 시금치는 전작물 수확 4일 뒤 경운하여 같은 포장 및 구획에 연작하였다. 토양시료는 전작물 재배 시 채취 일자와 이어서 약제 살포 후 40, 50, 60, 63, 66, 69, 72 및 75일차에 채취하였다. 시금치는 파종 후 27일차부터 3일 간격으로 총 5회 채취하여 지하부와 지상부로 구분한 뒤 각각 드라이아이스와 함께 균질화하여 분석 시료로 이용하였다.

### 농약 잔류분석법

토양, 엇갈이배추 및 시금치 중 ethoprophos의 잔류농약 분석 방법은 식품의약품안전처 고시 제2016-148호의 농산물 등의 유해물질 분석법(MGL, 2016)을 참조 및 변형하여 적용하였다. 균질화된 시료 10 g을 정밀히 달아 50 mL 원심분리관에 넣고, 토양시료의 경우 water 10 mL를 첨가하여 15분

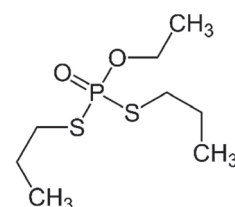


Fig. 1. Chemical structure of ethoprophos.

Table 1. Analytical MRM conditions of LC-MS/MS for the ethoprophos residues

MRM	Retention time	Ionization type	Precursor ion	Product ion	Q1 Pre bias(V)	Collision Energy(V)	Q3 Pre bias(V)
Ethoprophos	9.7	+	243.10	97.0	-30	-30	-17
			243.10	131.05	-30	-19	-27

간 흡윤화하였다. 작물 시료 및 흡윤화한 토양 시료에 대해 acetonitrile 10 mL를 첨가하여 가법계 진탕한 뒤, 원심분리관에 anhydrous magnesium sulfate 4.0 g, sodium chloride 1.0 g, sodium citrate 1.0 g, disodium citrate sesquihydrate 0.5 g을 넣고 2분간 강하게 진탕추출하였다. 그 후 원심분리(3,000 rpm/min, 5분)하여 acetonitrile층과 water층을 분리시킨 후 상층액 1 mL 취하여 25 mg PSA, 150 mg magnesium sulfate를 포함하는 dispersive SPE tube에 넣고 1분간 진탕 후 원심분리(10,000 rpm/min, 3분)한 다음 멤브레인 필터(0.2 μm, Nylon)로 여과하였다. 최종 시료 추출액은 Kinetex® 2.6 μm EVO C18 100Å [100 mm(L) x 2.1 mm (i.d.), 2.6 μm] column을 장착한 LC-MS/MS(Shimadzu Nexera UFLC 8045, Japan)에 10 μL씩 주입하여 분석하였다. 기기 분석 시 0.1% formic acid를 포함하는 water(용매 A)와 0.1% formic acid를 포함하는 methanol(용매 B)을 이동상 용매로 사용하여 gradient를 주었다. 이동상 농도구배 조건은 용매 A에 대해 0-2분(95%), 8분(30%), 17분(10%), 18-20분(95%)로 하였으며, 용출 속도는 0.3 mL/min로 유지하였다. 분석 농약 ethoprophos의 이온화 조건은 Table 1과 같이 하여 해당 분석 조건으로 나타난 chromatogram 상의 peak area를 매질보정 검량선과 비교하여 잔류량을 산출하였다.

**회수율 시험 및 매질보정 검량선 작성**

토양 및 작물 부위별 시료에 대한 분석농약의 회수율 시험은 각 시료 10 g에 ethoprophos(1.0 mg/kg)의 표준용액을 100 및 500 μL씩 첨가하여(n=3) 잔류량이 0.01 및 0.05 mg/kg이 되도록 한 다음 상기의 추출 및 정제 방법에 따라 전처리한 후 회수율을 산출하였다.

Ethoprophos 1.0 mg/kg 표준용액 100 μL중 1 mL를 vial에 분취 후 농축하여, 상기의 분석법을 통해 얻은 무처리 시료 추출액 1 mL로 전량 재용해하였다. 이렇게 조제된 0.1 mg/kg 매질보정 표준혼합용액과 무처리 시료용액을 일정량 혼합하여 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02 및 0.05 mg/kg 농도의 매질보정 검량선을 작성하였다.

**반감기 산출**

토양 중 ethoprophos의 반감기(*T*)는 일자별 잔류량 그래프로부터 지수감소식을 유도해냄으로써 감소상수(*k*)를 산출하였으며, first-order kinetics model을 적용하여 아래의 식에 따라 계산하였다[12, 13]. 아래 식 (1)에서 *C*<sub>0</sub>는 농약의 초기 농도(mg/kg), *t*는 시간(일)을 나타내기 때문에 *C*<sub>*t*</sub>는 *t*시

간 후 농약의 농도(mg/kg)를 나타낸다.

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$$

$$C_0 = C_t \cdot e^{kt} \tag{1}$$

$$T = \frac{\ln(2)}{k}$$

**결과 및 고찰**

**시험기간 중 작물 생육 및 환경 조건**

전작물인 엇갈이배추의 수확일에 채취한 시료의 부위별 평균 무게는 지하부인 뿌리의 경우 0.95±0.13 g이었으며, 지상부인 잎의 경우 53.04±0.19 g이었다. 각 부위별 평균 길이는 각 16.24±1.43 cm 및 26.94±1.74 cm이었다. 후작물인 시금치의 부위별 평균 무게는 Fig. 2와 같이 지하부의 경우 1차 수확일에 0.79 g에서 최종 수확일까지 2.61 g, 지상부의 경우 10.46 g에서 30.14 g으로 약 3배 증가하였다. 5회에 걸쳐 수확하는 동안 시금치의 부위별 평균 길이는 1.2-1.3배 증가하는 것으로 나타났다.

엇갈이배추 재배기간(2019년 4월 4일-2019년 5월 10일) 동안 시설 재배지 내 온도는 1.1-38.4°C로, 수확당일 평균 온도 및 습도는 20.3°C 및 23.0%이었다. 시금치 시설 재배지 내 온도는 8.9-47.6°C로 수확기간(2019년 6월 11일-2019년 6월 23일) 동안 평균온도 및 습도는 25.9°C 및 21.7%이었다.

**Ethoprophos의 잔류분석법 검증**

시험 토양 및 작물 부위별 시료 중 ethoprophos의 정량 분석을 위하여 매질보정 검량선을 작성한 결과, 각 무처리 시

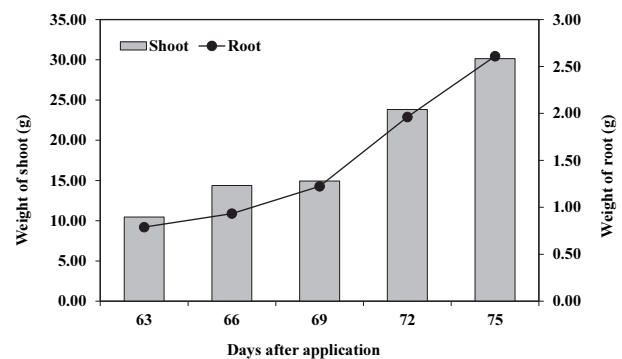


Fig. 2. Changes in weight of each compartment of spinach during cultivation period.

Table 2. Recoveries for ethoprophos in soil and each crop compartment

Sample	Fortification level (mg/kg)	Recovery (%)			Mean <sup>a)</sup> ± SD <sup>b)</sup>	LOQ <sup>c)</sup> (mg/kg)	
		1	2	3			
Preceding crop	Soil	0.01	101.0	87.8	95.6±6.9	0.001	
		0.05	115.0	97.5	105.4±8.9		
	Shoot	0.01	96.4	102.4	101.7±4.7		
		0.05	105.0	100.2	103.8±3.2		
	Root	0.01	87.0	102.5	89.3		92.9±8.4
		0.05	91.0	82.8	99.9		91.2±8.6
Succeeding crop	Soil	0.01	95.5	102.9	94.0	97.5±4.8	
		0.05	98.5	101.3	97.7	99.2±1.9	
	Shoot	0.01	90.3	85.6	88.7	88.2±2.4	
		0.05	93.0	94.8	84.5	90.8±5.5	
	Root	0.01	80.8	81.5	76.5	79.6±2.7	
		0.05	101.5	85.0	100.3	95.6±9.2	

<sup>a)</sup> Mean of triplication; <sup>b)</sup> Standard deviation; <sup>c)</sup> Limit of Quantification

료에 대한 검량선의 상관계수( $R^2$ )는 0.997-0.999로 양호한 직선성을 보였다. LC-MS/MS 분석 시 최소검출량(minimum detectable amount, MDA)은 0.01 ng, 분석법상의 정량한계(limit of quantification, LOQ)는 0.001 mg/kg이었다. LOQ의 10배(0.01 mg/kg) 및 50배(0.05 mg/kg) 수준으로 회수율시험을 수행한 결과는 Table 2와 같이 79.6-105.4%, 상대표준편차 10%이하로 나타나 잔류분석법 기준인 70-120% 및 상대표준편차 10%이내를 만족하였다. 분석 중 LC-MS/MS chromatogram상 간섭 peak는 존재하지 않았다.

**토양 중 ethoprophos의 잔류양상 및 반감기**

엇갈이배추와 시금치가 재배된 시험 토양은 모래 44.5%, 미사 44.0%, 점토 11.5%로 구성되어 유기물 함량이 6.9%, 전기전도도가 4.7 dS/m, pH가 6.2인 양토로써 본 시험작물인 엇갈이배추 및 시금치를 재배하는데 적합한 토양이었다. 전작물인 엇갈이배추를 파종한 후 기준량 및 5배량으로 혼화 처리한 ethoprophos 입제의 토양 중 초기 잔류량은 각 7.081±

0.802 mg/kg 및 19.493±0.887 mg/kg이었다. 이후 시간이 경과함에 따라 ethoprophos의 토양 중 잔류량은 초기 잔류량 대비 45.9-63.0% 감소하여 엇갈이배추의 최종 수확일에는 3.832±0.329 및 7.218±0.610 mg/kg 잔류되는 것으로 나타났다. 시간에 따른 토양 중 ethoprophos의 잔류량 변화는 Fig. 3(A)와 같이 기준량 처리구에 대해  $y=7.6138e^{-0.021x}$ 로 결정계수( $R^2$ )가 0.9261이었다. 또한, 5배량 처리구에 대한 감소회귀식은  $y=19.951e^{-0.036x}$ 로 도출되었으며  $R^2$ 은 0.9658로 나타났다. 이 때 감소회귀식에서 유도된 감소상수(k)를 first-order kinetics model식에 대입한 결과, 전작물 재배 기간 동안 ethoprophos의 토양 중 반감기는 기준량 처리구에서 33.0일, 5배량 처리구에서 19.3일로 산출되어 기준량 처리구에서 반감기가 더 긴 것으로 나타났다.

후작물인 시금치를 파종한 후 3일차에 채취한 ethoprophos의 첫 살포일 기준으로 40일차에 해당되는 토양 시료 중 ethoprophos의 잔류량은 기준량 처리구에 0.061±0.002 mg/kg, 5배량 처리구에 0.251±0.022 mg/kg으로 나타났다. 이는 전

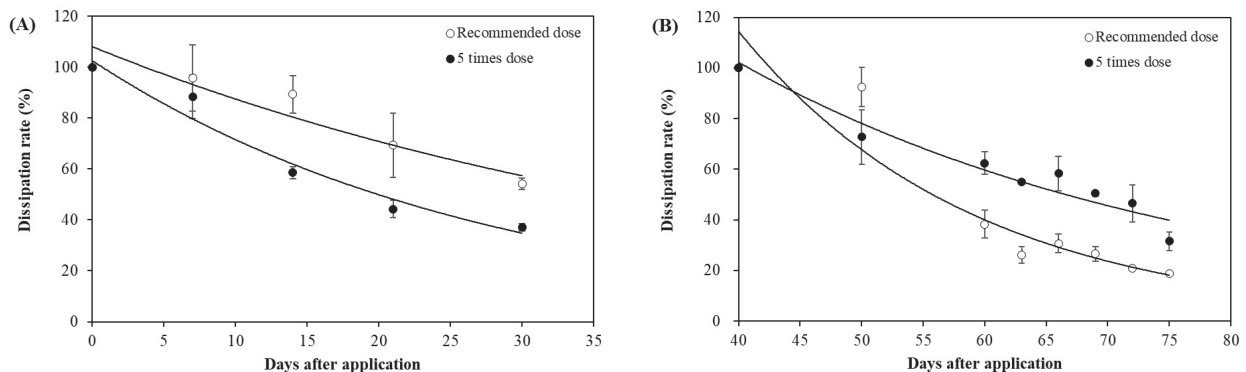


Fig. 3. Dissipation rate of ethoprophos in soils treated with concentration of recommended dose and 5 times dose during preceding(A) and succeeding(B) crop cultivation.



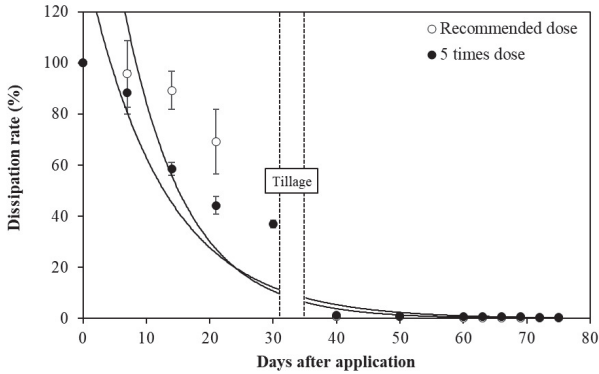


Fig. 4. Dissipation rate of ethoprophos in soils treated with concentration of recommended dose and 5 times dose at whole experimental period.

작물 수확 시 토양잔류량의 1.6-3.6% 수준에 해당되는 양으로, 후작물 파종을 위해 전작물인 엇갈이배추를 수확하면서 토양의 환경이 변화되어 나타난 결과로 보인다. 즉, 후작물을 재배하기 위하여 토양을 경운하고 토양을 정리하는데 4일이라는 시간이 걸렸음을 고려하였을 때, ethoprophos의 증기압이 78 mPa로 매우 높고 유기인계의 구조적 특성으로 분해가 잘된다는 점과 경운작업으로 인한 토양혼합 희석효과를 감안하면 가능한 경우라 사료된다[14, 15]. 후작물인 시금치를 재배하는 동안 토양 중 ethoprophos는 기준량 처리구에서 81.2%, 5배량 처리구에서 68.6% 감소하였으며, 시금치의 최종 수확일에는 0.011 및 0.079 mg/kg 잔류하는 것으로 나타났다. Ethoprophos의 토양 중에서의 소실양상은 Fig. 3 (B)와 같으며, 기준량( $y=0.5665e^{-0.053x}$ ,  $R^2=0.9315$ )과 5배량( $y=0.7533e^{-0.027x}$ ,  $R^2=0.8818$ )에 대해 감소회귀식 및 결정계수를 도출하였다. 후작물 재배 기간 중 토양 중 ethoprophos의 반감기는 기준량 처리구에서 13.1일, 5배량 처리구에서 25.7일로 산출되었다. 이는 전작물인 엇갈이배추 재배 시 산출된 반감기와 상반되는 결과라고 할 수 있다. 본 실험은 포장에서 진행된 시험으로 토양 유기물에 흡착 또는 탈착, 용탈, 토양 미생물에 의한 분해, 대기중으로 휘산, 광분해 등 다양한 물리 화학적 요인이 복합적으로 작용해 ethoprophos의 분해 및 소실에 영향을 줄 수 있기 때문에 농도에 따라 반감기는 다르게 나타날 수 있다고 사료된다.

Ethoprophos 살포 후 엇갈이배추와 시금치를 전작물과 후작물로 재배하는 전체기간(76일) 동안 실제 포장 내 토양 중 ethoprophos는 Fig. 4와 같이 99.6-99.8% 분해 및 소실되었으며, 반감기는 6.7-8.5일로 나타났다. 이러한 결과는 실내 시험 시 ethoprophos의 반감기는 4.8-21.1일, 포장시험 시 0.61-2.1일이라고 보고한 Lewis 등의 연구결과보다 길게 나타났다[16]. 이는 농약 분해 및 소실에 영향을 줄 수 있는 시험 포장의 토양 및 환경 조건의 차이에 의한 것으로 생각되며 본 연구에서도 포장시험 결과 상대적으로 짧은 반감기를 보였다. 이처럼 토양 중에서 phosphorodithioate계 살충제인 ethoprophos는 화학 구조적으로 ester기를 가지고 있기에 비교적 빠른 분해가 일어날 가능성이 있어 후작물로의 이행

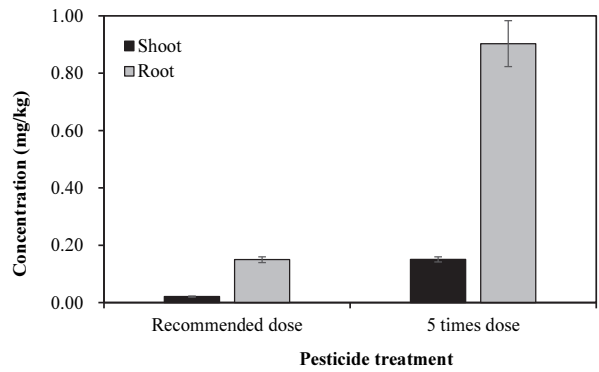


Fig. 5. Residual amounts of ethoprophos in each part of Korean cabbage at harvesting day.

가능성은 낮다고 할 수 있다[17]. 그러나 실제 사용 빈도와 주기에 따라 토양 내에 축적되는 정도는 다를 수 있기 때문에 후작물로의 이행에 유의해야 할 필요는 있다고 생각된다.

### 전작물 중 ethoprophos의 잔류량

Ethoprophos를 토양에 처리한 후 31일차에 전작물인 엇갈이배추를 일괄 수확하였으며, 지하부인 뿌리와 지상부인 잎으로 구분하여 Fig. 5와 같이 각각의 잔류량을 조사하였다. 지하부 중 잔류량은 기준량 처리 시  $0.150 \pm 0.010$  mg/kg, 5배량 처리 시  $0.903 \pm 0.080$  mg/kg이었다. 지상부 중 잔류량은 기준량 처리 시  $0.021 \pm 0.002$  mg/kg, 5배량 처리 시  $0.151 \pm 0.009$  mg/kg 검출되어 토양에 잔류되어 있는 ethoprophos가 엇갈이배추로 흡수이행 되었음을 알 수 있었다. 토양 중 농약의 초기 잔류절대량과 작물 부위별 잔류절대량의 비로써 흡수율을 산출해 보았을 때, 지하부로의 흡수율은 0.01% 미만이었으며, 지상부의 경우 0.01-0.03% 흡수되는 것으로 나타났다. 이때, 지상부로 흡수된 농약은 지하부를 통해 흡수되어 이행된 결과이며 상대적으로 지하부로의 흡수율 보다 지상부로의 이행율이 높기 때문에 이러한 결과가 도출된 것으로 사료된다.

엇갈이배추로 흡수이행 된 ethoprophos는 지상부에 비해 지하부에 6.0-7.1배 더 많이 잔류하는 것으로 나타났다. 하지만 지하부와 지상부의 중량 차이가 크기 때문에 각 잔류량( $\mu$ g/g)에 측정된 중량(g)을 곱하여 각 부위별 흡수된 농약의 절대량( $\mu$ g)을 산출하였다[18]. 그 결과 지하부는 0.143-0.599  $\mu$ g으로 흡수된 농약의 6.3-11.4%가 분포하였으며 지상부는 1.114-8.972  $\mu$ g(88.6-93.7%)으로 지상부에 더 많이 분포되는 것으로 나타났다.

### Ethoprophos의 후작물 흡수이행

후작물인 시금치는 약제 살포 후 63일차(수확기)부터 3일간격으로 총 5회 채취하여 지상부와 지하부에 대한 잔류량을 조사하였다. 기준량 처리구의 시금치 지하부 중 ethoprophos의 잔류량은 Fig. 6과 같이 63일차부터 72일차까지 정량한계(0.001 mg/kg)수준으로 검출되었고, 최종 수확일인 75일차에는 0.002 mg/kg 잔류하였다. 5배량 처리구에서는 0.001-0.003 mg/kg 잔류하였다. 가식부인 지상부에서는 ethopro-

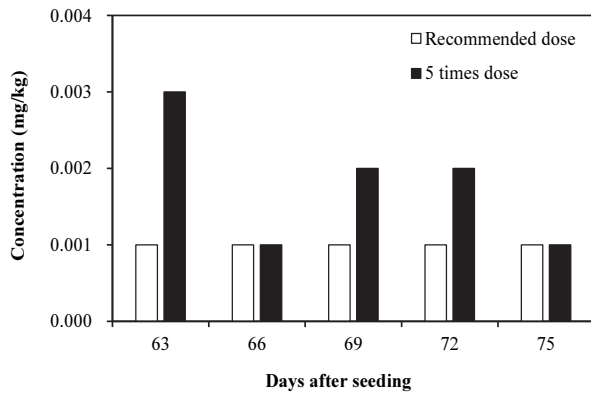


Fig. 6. Residual amounts of ethoprophos in root of succeeding crop during spinach cultivation.

phos 기준량 처리 시 정량한계 미만으로 검출되었으며, 5배량 처리 시 모든 수확일에 대해 정량한계 수준으로 검출되었다.

즉, 전작물 재배 시 살포된 ethoprophos는 후작물로 재배된 시금치로 0.001-0.025  $\mu\text{g}$  흡수이행 되는 것으로 나타났다. 비록 아주 미량이지만 비의도적으로 오염되었다고 할 수 있다. 그러나 현재 국내에 설정된 시금치 중 ethoprophos의 MRL인 0.02 mg/kg을 기준량 및 5배량 처리구 모두에서 초과하지 않았다.

본 연구 결과는 전작물 및 후작물로 엽채류를 재배 할 경우, 전작물 재배 시 살포된 ethoprophos는 후작물로 흡수이행되어 PLS에 위반될 우려가 없음을 의미하고 PBI설정의 필요성도 낮은 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 국내 농업 여건을 반영하여 실제 농가에서 재배하는 관행대로 수행된 본 연구 결과를 통해 비의도적 오염원이라 할 수 있는 전작물에 살포된 농약이 토양에 잔류되어 후작물로 흡수이행 된다는 것을 확인하였다. 따라서 작물을 연속 재배 할 시 후작물에 대한 비의도적 오염에 유의할 필요가 있다.

후작물에 대해 전작물에 살포된 농약의 잔류허용기준이 설정되어 있는 경우엔 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 단, 후작물에 대한 잔류허용기준이 설정되어 있지 않을 경우 PLS 기준인 0.01 mg/kg을 적용시키게 되면 문제가 될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 전작물 및 후작물을 연속 적으로 연작 재배 시, 가능한 두 작물 모두에 잔류허용기준이 설정되어 있는 농약의 사용을 제안할 필요가 있다. 또한 PBI기준 설정도 잔류성이 긴 농약들에 대해 검토하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

### Note

The authors declare no conflict of interest.

### Acknowledgement

This work was supported by a grant from the National Agricultural Products Quality Management Service of Korea in 2019.

### References

- Kim JE, Kim JH, Lee YD, Im CH, Hur JH, Jung YH, Kyung KS, Kim IS, Kim JH et al. (2020) Recent pesticides, 2nd edition. pp. 297-300, Sigma Press Inc., Korea.
- British Crop Production Council (2012) The pesticide manual: A world compendium, pp. 437-438. 16th edition, MacBean C., UK.
- Park BJ, Lee JH (2011) Worker exposure and volatilization pattern of cadusafos, ethoprophos and probenazole after applying granular type formulation on soil in greenhouse. Korean Journal of Environmental Agriculture, 30(2), 160-165. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2011.30.2.160>.
- Park WH, Hwang IS, Kim EJ, Cho TH, Hong CK, Lee JI, Choi SJ, Kim JA, Lee YJ et al. (2015) Pesticide residues survey and safety evaluation for perilla leaf & lettuce on the garak-dong agricultural & marine products market. The Korean Journal of Pesticide Science, 19(3), 151-160. <http://dx.doi.org/10.7585/kjps.2015.19.3.151>.
- Park JW, Seo JH, Lee DH, Nah GI, Cho SY, Bae MJ (2018) Evaluation of results in pesticide residues on incongruity commercial agricultural commodities using network analysis method. Korean Journal of Food Hygiene and Safety, 33(1), 23-30. <https://doi.org/10.13103/JFHS.2018.33.1.23>.
- Lemus R, Abdelghani A (2000) Chlorpyrifos: An unwelcome pesticide in our homes. Reviews on Environmental Health, 15(4), 421-433. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2000.15.4.421>.
- Kim SY, Baek HJ, Choi SJ, Kim JS, Lee CM, Kwon SW, Hahn BS, Kim DH, Yoon SH et al. (2017) Isolation and characterization of ethoprophos-degrading soil bacterium *Sphingobium* sp. EP60845. Journal of the Korean Society of International Agriculture, 29(3), 315-322. <https://doi.org/10.12719/KSIA.2017.29.3.315>.
- Kwak SY, Kang JG, Lee SH, Nam AJ, Lee DJ, Heo YJ, Kim JE (2020) Residual characteristics of insecticide sulfoxaflor and its metabolites in soil. The Korean Journal of Pesticide Science, 24(3), 312-320. <https://doi.org/10.7585/kjps.2020.24.3.312>.
- Hwang JI, Kwak SY, Lee SH, Kang MS, Ryu JS, Kang JG, Jung HH, Hong SH, Kim JE (2016) Establishment of safe management guideline based on uptake pattern of pesticide residue from soil by radish. Korean Journal of Environmental Agriculture, 35(4), 278-285.

- <http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2016.35.4.36>.
10. Oh KY, Choi GH, Bae JY, Lee DY, Lee SW, Kim JH (2020) Effect of soil organic matter content on plant uptake factor of ginseng for endosulfan. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 63(4), 401-406. <https://doi.org/10.3839/jabc.2020.052>.
  11. Son KA, Kim CS, Lee HS, Lee EY, Lee HD, Park SE, Lee JW, Hong SM, Cho BH et al. (2020) Survey on the pesticide residues in the soil after harvesting broccoli, head lettuce and lettuce. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 24(4), 361-373. <https://doi.org/10.7585/kjps.2020.24.4.361>.
  12. Lee SH, Kwak SY, Hwang JI, Kim HJ, Kim TH, Kim JE (2019) Correlation between physicochemical properties and biological half-life of triazole fungicides in perilla leaf. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 62(4), 407-415. <https://doi.org/10.3839/jabc.2019.056>.
  13. Kim HJ, Lee SH, Kwak SY, Kim TH, Kim JE (2019) Application of kinetic models for residual patterns of chlorantraniliprole and tetraconazole in perilla leaves. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 23(4), 297-303. <https://doi.org/10.7585/kjps.2019.23.4.297>.
  14. Korea Crop Protection Association (1982) The Bimonthly magazine for agrochemicals and plant protection, in: Shin WH, Pesticide residues can also be reduced by tillage. *Pesticide and Soil*, 3(12), pp. 4-11, Korea Crop Protection Association, Korea.
  15. Leitão S, Moreira-Santos M, Van den Brink PJ, Ribeiro R, José Cerejeira M, Sousa JP (2014) Ethoprophos fate on soil-water interface and effects on non-target terrestrial and aquatic biota under Mediterranean crop-based scenarios. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 103, 36-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.029>.
  16. Lewis KA, Tzilivakis J, Warner D, Green A (2016) An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(4), 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>.
  17. Karpouzas DG, Singh BK (2006) Microbial degradation of organophosphorus xenobiotics: metabolic pathways and molecular basis. *Advanced in Microbial Physiology*, 51, 119-225. [https://doi.org/10.1016/S0065-2911\(06\)51003-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2911(06)51003-3).
  18. Jeong SO, Hwang JI, Lee SH, Kim JE (2014) Uptake of boscalid and chlorfenapyr in soil into Korean cabbage. *The Korean Journal of Pesticide Science*, 18(4), 314-320. <http://dx.doi.org/10.7585/kjps.2014.18.4.314>.