



라이시미터를 이용한 시설하우스 내에 살포한 농약의 휘산 양상

김단비 · 김택겸^{1*} · 권혜영 · 홍수명 · 박병준 · 임성진 · 이호섭 · 문병철농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부, ¹농촌진흥청 연구정책국

Volatilization of Sprayed Pesticides in Greenhouse using a Lysimeter

Danbi Kim, Taek-Kyum Kim^{1*}, HyeYong Kwon, Su-Myeong Hong, Byung-Jun Park,
Sung-Jin Lim, Hyo-Sub Lee, and Byeong-Cheol MoonDepartment of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agriculture Science,
Rural Development Administration, Wanju, Korea¹Research Policy Bureau, Rural Development Administration, Jeonju, Korea

(Received on October 11, 2016. Revised on October 31, 2016. Accepted on November 17, 2016)

Abstract In cultivation environment, various pesticides are used and some of them could be volatilized into the air. This could affect farmer's health and also cause environmental pollution. This study was carried out to investigate the volatilization of pesticides, and use the reference data for preventing farmer's pesticide intoxication and securing worker safety. The experiment was conducted in a greenhouse using a lysimeter which was of 1 m² area and 1.5 m depth filled with upland soil. The pesticides treated in lysimeter soil were ethoprophos (5.0% GR), diazinon (34.0% EC), alachlor (43.7% EC), metolachlor (40.0% EC), chlorpyrifos (2.0% GR), pendimethalin (31.7% EC), carbaryl (50.0% WP), napropamide (50% WP), tebuconazole (25.0% WP) and imidacloprid (2.0% GR). Each pesticide was treated at a concentration of 770.5 mg based on A.I (%). The recovery of pesticide ranged from 77.4 to 99.3%. The volatilized pesticides in air were collected by personal air sampler with PUF tube at 4 l/min flow rate. In addition, temperature and humidity were measured. The collected samples were extracted using acetone in a soxhlet apparatus for 8 hours. The extracted pesticides were resoluted with acetonitrile and diluted 5 times. It was analyzed with LC-MS/MS. For 720 hours experiment, the largest vaporization amount of each pesticide in air was ethoprophos 15.24 µg/m³, diazinon 5.14 µg/m³, pendimethalin 2.70 µg/m³, chlorpyrifos 1.76 µg/m³, alachlor 1.40 µg/m³, metolachlor 1.12 µg/m³, carbaryl 0.27 µg/m³, napropamide 0.22 µg/m³, tebuconazole 0.11 µg/m³ and imidacloprid 0.05 µg/m³. The R value (coefficient of correlation) between volatilization and vapor pressure of pesticides is higher than 0.99. Therefore, there is high correlation between volatilization and vapor pressure of pesticides.

Key words Greenhouse, lysimeter, pesticide, volatilization

서 론

현대 농업에 있어서 중요한 농자재인 농약은 살포된 후 다양한 경로를 통해 환경으로 이동하게 된다. 살포된 농약 중 농작물에 부착되지 않은 농약은 토양에 직접 낙하하거나 아니면 대기 중에 이동되며, 농작물, 토양, 수계에 존재하는 농약도 증발하여 대기 중으로 이동되기도 한다. 대기는 쉬지 않고 이동하므로 대기 중의 농약은 상당히 먼 거리까지

이동하는 특성이 있기 때문에(Jeong et al., 2004) 농약의 휘산이 대기의 오염에 많은 영향을 끼친다는 연구가 많이 보고되었다(Bedos et al., 2002). 농약이 토양에서 휘산되는 양에는 농약의 물리화학적 특성(증기압, 용해도, 흡착계수, 반응성 등), 토양 특성(수분 함량, 토양 온도, 유기물 함량, 토양 밀도, pH 등), 기상 조건(대기 온도, 습도), 살포량, 제형 등이 영향을 끼친다고 보고되었다(Yusa et al., 2009).

농작업자의 농약 노출 및 중독은 호흡, 피부 접촉을 통해 일어나는데 농약을 살포 할 때 뿐만이 아니라 살포 후 시설 재배지에 재출입함으로써도 발생한다. 대기 중의 농약은 휘

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

석되어 이동하지만 시설재배지와 같이 밀폐된 공간 내에서는 살포된 농약이 그 공간 내에 남아있으므로 농약이 고농도로 분포될 가능성이 있어 주의하여야 한다. 따라서 미국 EPA (40 CFR, 2011)에서는 농약 살포 후 재출입 허용 기간 (Restricted-Entry Intervals, REIs)을 정하고 농약에 REIs를 표기하도록 하고 있지만, 국내에서는 이러한 제도가 도입되어 있지 않고 이것에 대한 연구도 미흡하다.

국내의 시설하우스 재배면적이 2014년에 93,511 ha이고 단위면적당 농약사용량이 11.3 kg/ha 수준(Statistics Korea, 2016)으로 많은 농약이 사용되고 있다. 그러나 국내에서 시설재배지의 공기 중 농약의 분포 양상에 관해 보고된 연구는 별로 없다. Lee et al. (1997)이 농약의 휘산과 비산의 영향을 조사하기 위해 농약 살포 지역으로부터 일정 거리 별 배추의 잔류농약을 조사한 것과 Park and Lee (2011)가 시설재배지에 입제 살포 후 공기 중 휘산 양상을 조사한 정도의 수준이다.

본 연구는 라이시미터를 이용하여 다양한 물리화학적 특성을 가진 농약들의 시설하우스 공기 중 시간에 따른 휘산량의 변화를 파악하기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

시험 장소

본 시험은 국립농업과학원에 설치된 밭토양 온실형 라이시미터에서 3반복으로 진행되었다. 라이시미터는 9 m² 넓이와 5 m 높이의 유리 온실로 이루어져 있으며 각 온실의 하단에는 1 m² 넓이와 1.5 m 깊이의 비교란 중량식 라이시미터(UGT GmbH, Germany)가 설치되어 있다. 이 온실형 라이시미터는 밭토양 3개, 논토양 3개로 총 6개가 설치되어 있고 그 중 밭토양에서 3반복으로 실험을 수행하였다.

시험 재료

실험에 사용된 용매로는 acetonitrile (99.9%, Merck KGaA, Germany), fomic acid (≥98%, Sigma Aldrich, St. Louis, USA), acetone (99.8%, Merck KGaA, Germany), n-hexane (98%, Merck KGaA, Germany), diethyl ether (98-100%, Merck KGaA, Germany)을 이용하였다. 증류수 제조장치는 Milli-Q system (Millipore, Bedford, USA)을 사용하였다. 시료 추출은 soxhlet (Duran, Germany) 장치를 이용하였고 추출 후에 회전감압농축기를 이용하여 농축하였다. 공기 포집 흡착제는 22 mm 직경, 100 mm 길이의 polyurethane foam (PUF) tube (SKC, USA)를 사용하였고, PUF를 사용하기 전에 세척하여 사용하였다. PUF의 세척 용매로 n-hexane과 diethyl ether를 사용하여 soxhlet으로 10시간 동안 세척하였고, 사용하기 전까지 n-Hexane으로 세척한 알루미늄 호일에 보관하였다. 공기샘플러로는 PCXR8KD low

volume air sampler (SKC, USA)를 이용하였다. 온습도계는 MHB-382SD (Lutron, Taipei, Taiwan)를 이용하였다. 분석에 사용한 표준품은 ethoprophos (93.0%), diazinon (96.0%), alachlor (99.5%), metolachlor (97.5%), chlorpyrifos (99.5%), pendimethalin (98.5%), carbaryl (99.0%), napropamide (99.5%), tebuconazole (98.8%) imidacloprid (99.0%)로써 Dr. Ehrenstorfer (Germany)에서 구입하였다. 각각의 표준품은 acetonitrile을 이용하여 1,000 mg/L의 stock solution으로 제조하였으며, 이 10개의 stock solution을 하나로 혼합하고 acetonitrile로 재용해하여 10 mg/L의 혼합표준용액으로 제조하였다.

Dynamic retention efficiency

EPA의 Compendium Method TO-10A (1999)의 Dynamic retention efficiency를 참고하여 회수율 분석을 진행하였다. PUF에 혼합표준용액 2 mg/kg 100 µl을 spiking 한 후 air sampler와 연결하여 4 l/min의 유속으로 4시간 동안 흡입하였다. 그 후 200 ml acetone으로 8시간 동안 soxhlet 추출 후 회전감압농축기로 농축건고하고 5 ml acetonitrile으로 재용해 후 LC-MS/MS로 분석하였다.

농약 처리 및 공기 중 시료 포집

라이시미터 토양에 살포한 농약들은 밭작물 및 원예작물에 많이 사용하는 농약으로 물리화학적 특성이 다른 10가지의 농약으로 선정하였다. 선정한 농약들은 시중에 팔고 있는 제품으로 5.0% ethoprophos 입제, 34.0% diazinon 유제, 43.7% alachlor 유제, 40.0% metolachlor 유제, 2.0% chlorpyrifos 입제, 31.7% pendimethalin 유제, 50.0% carbaryl 수화제, 50.0% napropamide 수화제, 25.0% tebuconazole 수화제, 2.0% imidacloprid 입제였다. 각 농약은 라이시미터 1 m²에 원제 함량이 770.5 mg 수준으로 처리하였고, 이 농도는 토양 전체 무게의 0.5 mg/kg 수준이었다.

시료 포집 방법은 EPA의 Compendium Method TO-10A (1999)의 시료 포집 방법을 참고하여 라이시미터 밭토양에서 3반복으로 진행하였다. PUF tube와 low volume air sampler를 연결하여 지상 1.2 m의 높이에 설치하였다. 농약 살포 직후 오전 11시부터 오후 8시까지 9시간동안 포집하였으며, 포집 간격은 오전 11시부터 1시간동안(11-12시) 포집하였고 정오 12시부터는 2시간씩 4회(12-2시, 2-4시, 4-6시, 6-8시) 포집하였다. 그 후 24시간, 48시간, 120시간, 192시간, 360시간, 504시간, 720시간째에는 오전 11시부터 4시간 동안(11시-3시) 1회 포집하였다. 포집 시 한 개의 PUF tube 당 4 l/min의 유속으로 포집하였다. 포집 후에는 분석 시까지 밀봉 후 냉장 보관하였고 포집된 시료는 3일 이내에 200 ml acetone으로 8시간 동안 soxhlet 추출 후 회전감압농축기로 농축건고하고 5 ml acetonitrile으로 재용해 후 LC-MS/MS로 분석하였다.

Table 1. Physicochemical properties of pesticides

Pesticides	Formulation	Vapor pressure (mPa, 25°C)	Henry constant (atm·m ³ /mol)	Kow (logP)	Solubility in water (mg/L, 20°C)
Ethoprophos	Insecticide	46.50	1.62×10^{-7}	3.59	700.0
Diazinon	Insecticide	12.00	1.17×10^{-7}	3.81	40.0
Alachlor	Herbicide	5.50	8.32×10^{-9}	3.52	242.0 (25°C)
Metolachlor	Herbicide	4.20	9.00×10^{-9}	3.13	530.0
Chlorpyrifos	Insecticide	2.70	3.55×10^{-5}	4.96	1.4 (25°C)
Pendimethalin	Herbicide	1.94	8.56×10^{-7}	5.20	0.3
Carbaryl	Insecticide	4.10×10^{-2}	2.80×10^{-9}	2.36	120.0
Napropamide	Herbicide	2.30×10^{-2}	8.41×10^{-10}	3.36	73.0
Tebuconazole	Fungicide	3.10×10^{-3}	1.40×10^{-10}	3.70	36.0
Imidacloprid	Insecticide	9.00×10^{-7}	1.70×10^{-10}	0.57	0.6

Table 2. LC-MS/MS operating condition for analysis

Instrument	Agilent 1200 HPLC with Agilent 6410 triple-quadrupole		
Column	YMC-Pack Pro C18 RS 100×3 mm I.d. 3 μm		
Mobile phase	A : Water with 0.1% formic acid B : Acetonitrile with 0.1% formic acid		
Gradient table	Time (min)	A (%)	B (%)
	0	95	5
	2	30	70
	10	30	70
	15	10	90
	20	5	95
	23	95	5
	25	95	5
Flow rate	0.2 ml/min	Ionspray voltage	4,000 V
Column temp.	40°C	Nebulizer gas pressure	50 psi
Injection volume	10 μl	Gas flow	10 L/min
Ionization mode	ESI Positive	Gas temp.	350°C
Scan type	MRM	Run time	24 min

Table 3. LC-MS/MS MRM analytical condition of pesticides

Pesticides	Molecular Weight	Precursor ion (m/z)	Quantifier	Qualifier	Retention Time (min)	Ionization mode
Ethoprophos	242.3	243.1	131.0	215.1	10.1	Positive
Diazinon	304.3	305.1	169.1	153.1	12.9	Positive
Alachlor	269.8	270.1	238.0	161.9	10.7	Positive
Metolachlor	283.8	284.1	252.0	176.0	10.8	Positive
Chlorpyrifos	360.6	350.0	197.7	293.7	17.1	Positive
Pendimethalin	281.3	282.2	212.0	194.3	17.2	Positive
Carbaryl	201.2	202.2	145.2	127.1	8.0	Positive
Napropamide	271.4	272.2	171.0	129.0	9.9	Positive
Tebuconazole	307.8	308.2	70.2	125.2	9.7	Positive
Imidacloprid	255.7	256.1	209.1	175.2	6.8	Positive

기기분석

분석에 사용된 기기는 Agilent 6410 triple-quadrupole

mass spectrometer였다. 이동상은 0.1% formic acid를 함유한 water와 acetonitrile를 사용하여 positive mode에서 분석

Table 4. Dynamic recovery and LOQ of pesticides in PUF absorbent

Pesticides	Recovery (%)	LOQ (ng)	LOQ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of 4 hours sampling
Ethoprophos	89.6 \pm 1.1	0.005	0.005
Diazinon	77.4 \pm 0.3	0.001	0.001
Alachlor	82.4 \pm 0.9	0.005	0.005
Metolachlor	86.0 \pm 1.3	0.001	0.001
Chlorpyrifos	85.2 \pm 2.3	0.005	0.005
Pendimethalin	84.0 \pm 0.7	0.003	0.003
Carbaryl	83.7 \pm 1.0	0.003	0.003
Napropamide	80.1 \pm 1.6	0.001	0.001
Tebuconazole	90.2 \pm 0.2	0.003	0.003
Imidacloprid	99.3 \pm 1.6	0.001	0.001

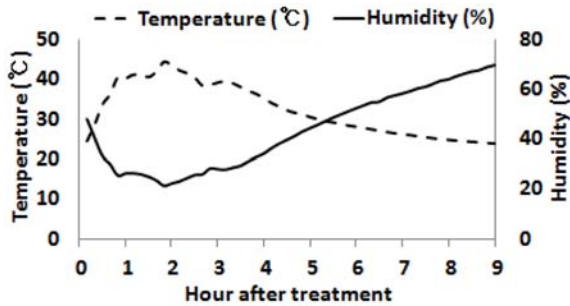


Fig. 1. Temperature and Humidity in lysimeter for 9 hours.

하였다. 데이터 처리는 Mass hunter® workstation data acquisition 프로그램을 사용하였다(Table 2, Table 3).

결과 및 고찰

Dynamic retention efficiency

EPA의 Compendium Method TO-10A (1999)의 Dynamic retention efficiency를 참고하여 회수율 분석을 진행하였다. 그 결과 10가지 농약의 회수율이 77.4-99.3% 범위의 회수율을 나타냈다. 표준편차는 모든 농약이 0.2-2.3의 범위로 양호한 결과를 나타내었다. 혼합표준용액을 이용하여 직선성을 조사한 결과 모든 농약의 결정계수 R² 값이 0.998 이상으로 양호하였다. 회수율 실험 결과와 직선성 조사를 바탕으로 기기상의 LOQ (ng)와 4 l/min의 유속으로 4시간 동안 공기 포집 시의 LOQ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 구하였다. LOQ는 S/N비가 10 이상인 농도로 정하였으며 그 값은 Table 4와 같았다.

실내 라이시미터에서 농약의 휘산 양상

살포 직후 9시간 동안의 변화

라이시미터 내의 온도와 습도의 변화는 Fig. 1과 같았다. 온도는 실험 시작 시간인 오전 11시부터 올라가서 오후 1시에 최고 온도였고 그 이후 조금씩 내려갔다. 습도는 오전 11시부터 내려가서 오후 1시에 최저점을 찍은 후 조금씩 올라

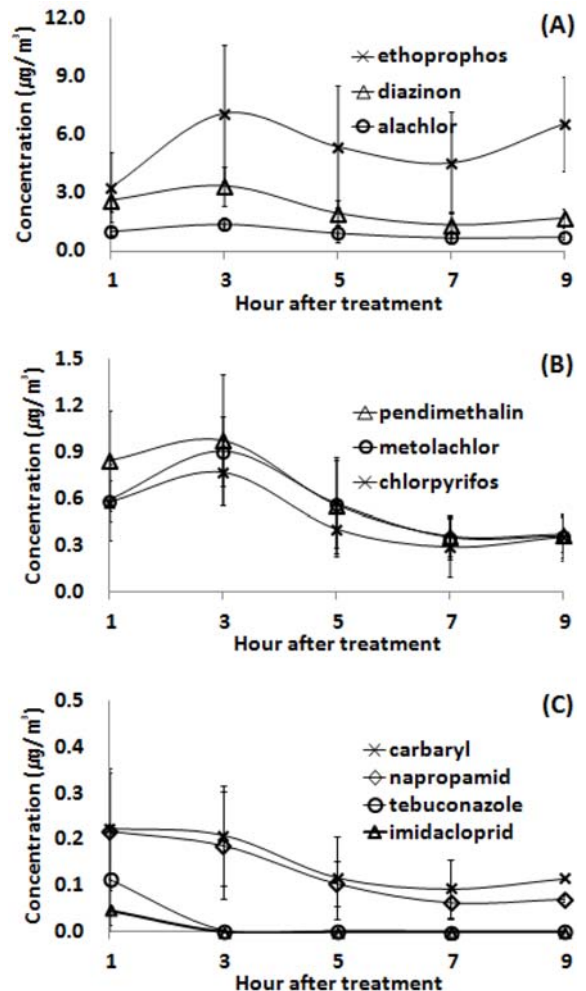


Fig. 2. Volatilization of pesticides in lysimeter for 9 hours: (A) The vapor pressure is higher than 5 mPa, (B) The vapor pressure range is 1-5 mPa, (C) The vapor pressure is lower than 1 mPa.

갔다. 살포 직후 9시간 동안의 10가지 농약의 휘산량 변화는 Fig. 2와 같았다. 휘산량 변화 패턴은 증기압에 따라 다르게 나타났으며 1 mPa를 기준으로 그 패턴이 차이를 보였

다. 증기압이 1 mPa 이상의 농약들은 오전 11시에서 오후 6시까지 라이시미터의 온도가 높아지고 습도가 내려감에 따라 공기 중 농도는 높아졌으며, 기온이 내려가고 습도가 올라감에 따라 공기 중 이 농약들의 농도는 낮아짐을 확인할 수 있었다(Fig. 2 (A), (B)). 특히 일조량이 많은 오후 12시와 2시 사이에 공기 중 농약들의 농도가 가장 높았으며 증기압이 가장 높은 ethoprophos의 경우 7.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 검출되었다. 그러므로 일조량이 많아 온도가 높아지는 시간대에는 공기중으로 휘산량이 많을 가능성이 높으므로 그 시간대에는 시설하우스에 출입을 하지 않는 것이 농업인의 건강을 위해 좋을 것으로 판단된다. 그러나 오후 6시에는 그 전 시간보다 온도가 내려갔음에도 이 농약들의 농도가 상승했는데 이것은 기압변화의 영향이 있었을 것으로 예상된다. 이는 차후에 air sampler, 온습도계, 기압측정기를 높이별로 설치하여 농약의 휘산량을 측정함으로써 온도와 습도 외에 기압의 영향까지 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 증기압이 1 mPa 이하의 carbaryl, napropamide, tebuconazole, imidacloprid는 낮동안의 온습도의 증감에 상관없이 살포 후 첫 포집 시에 가장 높은 농도를 보인 후 계속해서 낮아지다가 오후 6시에 이 농약들의 농도가 소폭 상승했다(Fig. 2 (C)). 본 실험에서 imidacloprid와 tebuconazole의 경우에는 공기 중으로 휘산량이 거의 없었는데 Segura Carretero et al. (2003)이 토마토를 키우는 온실에 imidacloprid를 살포 후 24시간째에 측정된 결과 0.06 mg/m^3 까지 검출되었다고 보고했다.

살포 후 24시간부터 720시간 동안의 변화

라이시미터에 농약 처리 후 24시간부터 720시간 동안의 10가지 농약의 휘산량 변화는 Fig. 3과 같았다. 휘산량은 ethoprophos, diazinon, pendimethalin, chlorpyrifos, alachlor, metolachlor, carbaryl, napropamide, tebuconazole, imidacloprid의 순으로 높은 공기 중 농도를 나타내었다. ethoprophos는 농약 처리 후 24시간째에 15.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, diazinon은 48시간째에 5.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pendimethalin은 48시간째에 2.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 농도를 나타내었다(Fig. 3 (A), (B)). chlorpyrifos는 48시간째에 1.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alachlor는 24시간째에 1.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, metolachlor는 120시간째에 1.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 농도를 나타내었다(Fig. 3 (A), (B)). carbaryl은 24시간째에 0.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, napropamide, tebuconazole, imidacloprid는 각각 1시간째에 0.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 농도를 나타내었다(Fig. 2 (C), Fig. 3 (C)). 최대 농도를 보인 후에도 증기압이 1 mPa 이상의 농약은 120-192시간까지도 공기 중에 많이 잔류함을 확인했다(Fig. 3 (A), (B)). 반면 carbaryl을 제외한 증기압이 1 mPa 이하의 농약은 살포 후 첫 포집 시에 가장 높은 농도를 보이고 그 후로 계속해서 낮아지는 농도를 보였다(Fig. 2 (C), Fig. 3 (C)). Park and Lee (2011)

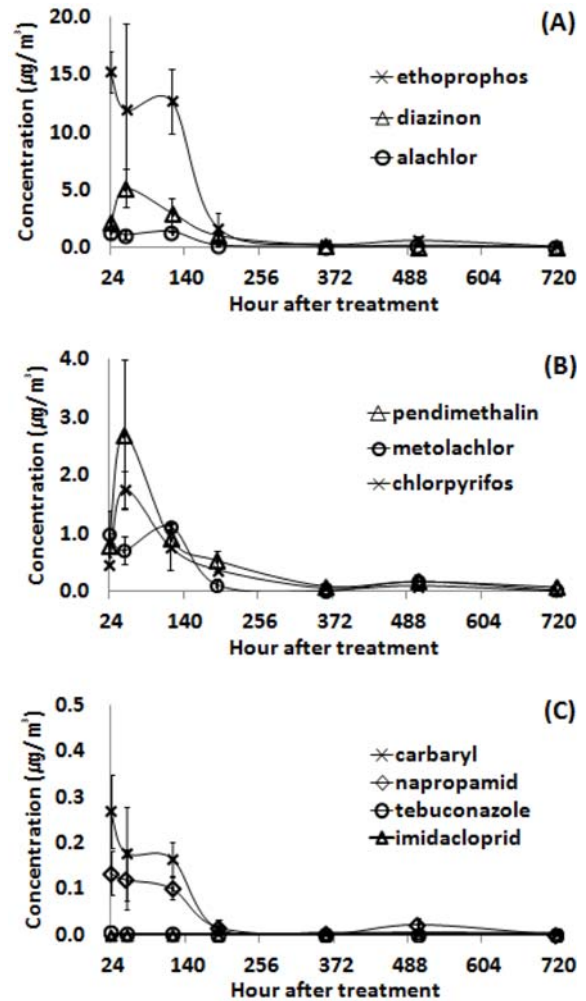


Fig. 3. Volatilization of pesticides from 24 hours to 720 hours: (A) The vapor pressure is higher than 5 mPa, (B) The vapor pressure range is 1-5 mPa, (C) The vapor pressure is lower than 1 mPa.

는 시설재배지에 cadusafos, ethoprophos, probenazole 입제 처리 후 공기 중 농약이 13-39시간 사이에 최대 잔류가 된다고 보고하였는데 본 실험에서도 대부분의 농약이 24-48시간 사이에 최대 잔류를 보여 비슷한 결과를 확인할 수 있었다. 그러나 Hatzilazarou et al. (2005)은 거베라의 수경재배 과정에서 diazinon 살포 후 2시간에 가장 높은 농도를 보였다고 하는데 본 실험보다 더 빠른 시간 내에 가장 높은 농도를 보인 이유는 물이 증발하면서 더 많은 양의 농약이 함께 휘산되었기 때문이라 생각한다. 시간이 지남에 따라 농약의 휘산량은 점점 낮아졌는데 Farmer et al. (1972)은 휘산량이 감소하는 이유는 토양의 농약 농도가 감소하기 때문이라고 보고하였다. 본 실험에서도 라이시미터 토양의 농약 농도가 감소함에 따라 농약의 휘산량이 감소했을 것으로 판단된다.

본 실험에서 농약의 공기 중 최대 잔류 순서는 증기압의 높낮음 순서와 거의 일치했다. Park and Lee (2011)는 증기

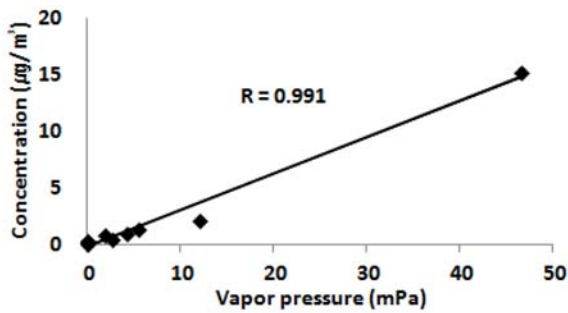


Fig. 4. R (Coefficient of correlation) between volatilization and vapor pressure of pesticides.

압이 높은 ethoprophos, cadusafos, probenazole의 순으로 휘산이 잘되었다고 보고했고, Farmer et al. (1972)도 증기압이 높은 Lindane, Dieldrin, DDT의 순으로 휘산이 잘되었다고 보고했다. 그래서 10가지 농약의 증기압과 농약 처리 후 24시간째 휘산량의 상관관계를 보았으며 그 결과는 Fig. 4와 같았다. 휘산량과 증기압 사이의 상관계수 R 값이 0.99 이상을 보여 휘산량과 증기압 사이에 높은 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

농약의 휘산량은 농작업자의 농약 중독과 관련지을 수 있었다. 공기 중의 잔류량이 낮은 수준의 농도라도 그 농약의 양이 독성이 강한 수준이라면 농작업자에게 피해를 가할 수 있기 때문에 농약 중독의 문제를 생각하게 되었다. 미국 EPA (2011, 40 CFR Part 156.208)에서는 농약의 독성 정도에 따라 농약 살포 후 재출입 허용 기간을 정하고 농약에 REIs를 라벨링하도록 하고 있다. 그러나 국내에서는 이러한 제도가 도입되어 있지 않은 상황이다. 따라서 농작업자의 농약 중독을 예방하기 위해 국내에서도 이러한 제도를 도입할 필요성이 있다. 이러한 제도를 도입하기 위해서는 앞으로 농약의 독성 정도와 휘산량의 상관관계를 구명하는 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01011701)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

Literature Cited

Bedos, C., P. Cellier, R. Calvet, E. Barriuso and B. Gabrielle

(2002) Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview, *Agronomie* 22(1):21-33.

EPA (1999) Determination Of Pesticides And Polychlorinated Biphenyls In Ambient Air Using Low Volume Polyurethane Foam (PUF) Sampling Followed By Gas Chromatographic/Multi-Detector Detection (GC/MD), Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air, Second Edition, Office of Research and Development; Publisher: Cincinnati, U.S.

EPA (2011) Code of Federal Regulations, Title 40, Protection of Environment, Parts 150 to 189, Special Edition, Office of the Federal Register; Publisher: Maryland, U.S. pp78-79.

Farmer, W. J., K. Igue, W. F. Spencer and J. P. Martin (1972) Volatility of Organochlorine Insecticides from Soil: I. Effect of Concentration, Temperature, Air Flow Rate, and Vapor Pressure, *Soil Science Society of America Journal* 36(3): 443-447.

Hatzilazarou, S. P., E. Charizopoulos, E. Papadopoulou-Mourkidou and A. S. Economou (2005) Persistence of chlorpyrifos, diazinon and dimethoate sprayed in the greenhouse environment during hydroponic cultivation of Gerbera, *Agronomy for Sustainable Development* 25(2): 193-199.

Jeong, Y. H., J. E. Kim, J. H. Kim, Y. D. Lee, C. H. Lim and J. H. Heo (2004) *New Pesticides*. Sigma press. Korea. pp350.

Lee, J. Y., I. K. Han, S. Y. Lee, I. H. Yeo and S. R. Lee (1997) Drift and Volatilization of Some Pesticides Sprayed on Chinese Cabbages, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 16(4):373-381.

Park, B. J. and J. H. Lee (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.

Segura Carretero, A., C. Cruces-Blanco, S. Perez Duran and A. Fernandez Gutierrez (2003) Determination of imidacloprid and its metabolite 6-chloronicotinic acid in greenhouse air by application of micellar electrokinetic capillary chromatography with solid-phase extraction, *Journal of Chromatography A* 1003(2003):189-195.

Statistics Korea (2016) cultivation area of facility crops 1979-2015, <http://kosis.kr/> Accessed 27 August 2016.

Yusa, V., C. Coscolla, W. Mellouki, A. Pastor and M. de la Guardia (2009) Sampling and analysis of pesticides in ambient air, *Journal of Chromatography A* 1216(15):2972-2983.

라이시미터를 이용한 시설하우스 내에 살포한 농약의 휘산 양상

김단비 · 김택겸^{1*} · 권혜영 · 홍수명 · 박병준 · 임성진 · 이효섭 · 문병철

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부, ¹농촌진흥청 연구정책국

요 약 본 연구는 시설하우스에 살포된 농약의 공기 중 시간에 따른 분포 양상을 파악하여 농작업자의 안전성을 확보하기 위한 기초자료로 제공하기 위해 수행하였다. 농작물에 많이 사용하는 물리화학적 성질이 다른 농약 10가지 성분을 선정하였으며 라이시미터 발토양에 살포 후 공기 중으로 휘산된 양상을 720시간 동안 조사하였다. PUF 흡착제와 low volume air sampler를 이용하여 공기 중 농약을 포집한 후 LC-MS/MS를 이용하여 공기 중의 농약을 분석하였다. 720시간 동안 대부분의 농약이 24-48시간 사이에 최대 잔류를 보였다. 증기압이 1 mPa 이상의 농약은 살포 후 120-192시간까지도 공기 중 높은 농도가 지속되는 양상을 보인 반면 증기압이 1 mPa 이하인 경우에는 살포 후 첫 포집 시에 가장 높은 농도를 보이고 그 후로 계속해서 낮아지는 농도를 보였다. 공기 중의 최대 농도는 ethoprophos, diazinon, pendimethalin, chlorpyrifos, alachlor, metolachlor, carbaryl, napropamide, tebuconazole, imidacloprid 순으로 증기압의 높낮음 순서와 거의 일치하여 증기압과 휘산량의 상관관계가 높음을 알 수 있었다.

색인어 시설하우스, 라이시미터, 농약, 휘산량