

Butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprothiolane 및 procymidone의 토양 중 용탈과 이동성 예측

김찬섭* · 박경훈 · 김진배 · 최주현

농업과학기술원 작물보호부 농약안전성과

요약 : 토주용탈실험으로 농약별 이동 양상을 파악하고, 흡착계수와 토양관련 매개변수를 이용하여 대류 이동성 모형(Convective mobility test model)으로 예측한 용탈 속도와 비교 평가하였다. 토양살충제 ethoprophos, 원예용 살균제 procymidone, 도열병약 iprobenfos와 isoprothiolane 및 수도용 제초제 butachlor를 대상농약으로 선정하고 토지이용 형태를 기준으로 논, 밭 및 산림토양으로 구분한 3종의 토양에 대하여 토주용탈실험을 수행하였다. 각 농약을 50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 수준으로 토주 상단에 처리하였을 때 토심 30 cm 이동 후 용탈되는 농약별 peak 농도는 ethoprophos 0.74~3.61 mg/L, iprobenfos 0.35~1.67 mg/L, procymidone 0.16~0.84 mg/L, isoprothiolane 0.16~0.67 mg/L, butachlor 0.15 mg/L 이하 수준이었고, peak 농도 출현까지 소요된 용탈수량은 ethoprophos 2~4 pore volume (PV), iprobenfos 3~10 PV, procymidone 5~13 PV, isoprothiolane 4~14 PV, butachlor 19~61 PV 수준이었다. 대류 이동성 모형에 의한 예측 결과, 이동소요시간은 표준조건에서 ethoprophos 9~18일, iprobenfos 17~35일, isoprothiolane 24~54일, procymidone 21~65일 및 butachlor 105~279일로 나타나 대류 이동성 모형 분류에 따르면 ethoprophos는 mobile~most mobile, iprobenfos, isoprothiolane 및 procymidone은 moderately mobile~mobile 그리고 butachlor는 slightly mobile 등급에 속하는 것으로 나타났다. 토주용탈실험과 동일한 조건으로 대류 이동성 모형에 의하여 이동소요시간을 예측한 결과는 대부분의 토양-농약 조합에서 잘 일치하여 이동소요시간의 예측에 대류 이동성 모형을 이용하는 것이 가능할 것으로 생각된다.(2002년 11월 10일 접수, 2002년 12월 13일 수리)

Key Words : pesticide, leaching, soil column, adsorption, convection time.

서 론

지하수 오염에 대한 관심이 높아짐에 따라 오염물질의 이동 (Beck 등 1996; Bottani 등, 1996)과 분해·대사에 대한 연구와 더불어 오염 가능성 여부에 대한 평가(Jury 등, 1987; Koerdel 등, 1991)를 위하여 오염물질의 환경 중 동태 예측에 관한 모형연구(Barry와 Sposito, 1988; Boesten과 van der Linden, 1991; Roth와 Jury, 1993; Bergstroem, 1996)가 80년대 이후 집중적으로 수행되어 왔다. 지하수의 오염은 토양에 투입된 화합물들의 이동에 의하게 됨으로 이러한 연구를 수행하기 위해서는 토양에서 오염물질과 토양입자 사이에 일어나는 물리, 화학 및 생물학적 과정에 대한 이해가 필수적이다. 그 과정 중에서도 화합물의 흡착특

성은 오염물질의 이동과 분해·대사를 결정하는 매우 중요한 인자 중 하나로 인식되고 있다. 충전 토주(soil column)를 이용한 용탈실험은 농약의 흡착특성을 반영함과 동시에 물질의 수직이동 현상을 파악함에 있어 쉽게 적용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 국내의 경우 농약의 국내 환경 중 행적에 대한 연구로는 흡착실험 (김과 김, 1990; 강, 1996; 이 등, 1998), 토주를 이용한 실내에서의 이동성 실험 (황 등, 1990; 현 등, 1995) 및 lysimeter (이와 오, 1993)를 사용한 연구가 일부 수행되어 왔으나 실험으로 얻어진 자료를 이용하는 예측연구 (문 등, 1993; 김 1996)는 거의 시도된 바 없다.

Jury 등 (1983)은 토양에 투하된 농약의 이동과 소실을 나타내는 수학적 화합물질 선발 모형을 개발하였는데 대류 이동성 모형은 그 모형체계의 일부이다. 그의 모형은 증기, 액상 그리고 흡착된 상간의 선

*연락처

Table 1. Physicochemical properties of soils used

Designation	pH (1:5, H ₂ O)	Organic carbon (%)	CEC (cmol/kg)	Particle size distribution ^{a)} (%)			Texture ^{a)}
				Sand	Silt	Clay	
Suwon 1	5.2	0.59	8.8	66.8	21.8	11.4	Sandy loam
Suwon 2	5.8	1.30	11.2	48.7	30.0	21.3	Loam
Suwon 3	4.5	0.51	13.8	38.6	27.9	33.5	Clay loam

^{a)}USDA classification.

형 평형분배, 순 1차 분해반응 및 휘발에 의한 대기로의 이동을 가정하고 있다. 후속 연구결과 Jury 등 (1984a)은 자신들의 모형에 의한 화합물의 이동성 분류체계를 제시하였다. 즉 35종 화합물에 대한 대류이동성, 확산이동성, 잔류성을 결정하는 적용시험을 수행하였고 (Jury 등, 1984b), 모형의 적합성을 지지하는 증거에 대하여 고찰한 바 있다 (Jury 등, 1984c).

본 연구에서는 실험대상 농약으로는 비이온성이며 물에 대한 용해도 범위가 다양한 유기인계 ethoprophos, iprobenfos 및 원예용 살균제 procymidone, 도열병약 isoprothiolane 및 수도용 제초제 butachlor를 선정하여 논, 밭 및 산림토양으로 구분된 3종의 토양을 대상으로 충전 토주를 사용한 용탈실험을 수행하였다. 흡착계수, 토양관련 매개변수를 이용하여 화합물의 용탈속도를 예측할 수 있는 대류 이동성 모델 (Convective mobility test model)에 의거, 이동소요시간을 계산하여 이동성을 구분하고 모델에 의한 이동속도와 실내 토주용탈실험을 수행하여 얻은 결과를 비교 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료

공시토양으로는 경기도 수원시 서둔동 소재 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장 및 구내 솔밭, 농업

과학기술원 관개시험 포장 (밭)에서 토양 깊이 20 cm까지의 표토를 채취하여 음건 후 2 mm 체를 통과시킨 토양을 토양흡착 및 이동성 실험에 사용하였다. 실험토양의 물리화학적 특성은 표 1과 같다. 토양의 pH는 초자전극법, 유기탄소함량은 Walkley-Black법, 양이온치환용량은 1 N ammonium acetate (pH 7.0) 포화법으로 측정하였다 (Page, 1982). 입경분석은 pipette 법으로 하였으며, USDA법에 따라 토성을 분류하였다 (Klute, 1986).

이동성실험 대상 농약으로는 농업과학기술원에서 수행한 시설재배지 토양 중 농약잔류량 조사(최 등, 1991) 결과 검출빈도가 가장 높았던 procymidone과 잔류농도가 상대적으로 높았던 ethoprophos를 선정하였고, 수도용 농약으로 사용량이 많은 농약성분 중 흡착성에 크게 영향을 미치는 성질인 물에 대한 용해도를 고려하여 도열병약인 iprobenfos와 isoprothiolane 및 제초제 butachlor를 실험용 농약으로 선정하였다. 농약의 물에 대한 용해도 (Tomlin, 1997)와 흡착실험에 의하여 얻은 흡착계수(김 등 1994)를 표 2에 나타내었다.

본 연구에 사용한 유기용매 중 acetone, benzene, hexane, methylene chloride, toluene은 미국 J. T. Baker사의 잔류분석용을 사용하였으며, isopropyl alcohol은 동양화학 특급을 사용하였고, calcium chloride 등 무기시약은 주로 일본 Junsei사의 특급을 사용하였다.

Table 2. Water solubilities and Freundlich coefficients of pesticides used

Pesticide	Water solubility (mg/L)	Freundlich coefficient					
		Sandy loam		Loam		Clay loam	
		K	1/n	K	1/n	K	1/n
Butachlor	20	11	0.96	19	0.95	7.9	1.01
Ethoprophos	700	0.53	0.92	0.95	0.86	0.35	0.97
Iprobenfos	430	1.6	0.87	2.2	0.87	0.98	0.94
Isoprothiolane	48	2.5	0.94	3.5	0.95	1.5	0.99
Procymidone	4.5	2.2	0.95	4.3	0.93	1.2	0.91

토주용탈실험

토주를 사용한 용탈실험에서는 PTFE 재질 stopcock 가 부착된 내경 5 cm × 길이 40 cm Pyrex 초자관을 사용하였다. 아래 부분에 glass wool을 깔고, 산처리된 sea sand 40 g을 채운 다음, 사양토, 양토 및 식양토를 각각 토심 10, 20, 30 cm가 되도록 용적밀도를 기준으로 충전 후 stopcock를 열고 토주의 하부로부터 모세관 현상에 의하여 물이 올라가도록 하면서 토양을 포화시켰다 (Sanchez-Martin 등, 1995). 토주 상단까지 물이 스며 나오게 한 후 토주의 안정화 및 유속 범위를 파악하기 위하여 상부로부터 0.01 M CaCl₂ 용액 2 L를 자연용출조건으로 흘렸다. 토양 25 g에 ethoprophos와 procymidone 1000 mg/L acetone용액 1 mL씩을 처리하고 유기용매를 날려보낸 후 토주 위에 추가 충전하고, 다시 그 위에 표면수로의 약제의 이동을 방지하기 위하여 토양 25 g과 sea sand 25 g을 채웠다. 토주의 최종 충전상태를 그림 1로 나타내었다.

용출액으로 0.01 M calcium chloride용액을 사용하여 47일간 용탈실험을 수행하였다. 용탈수는 분획수집기

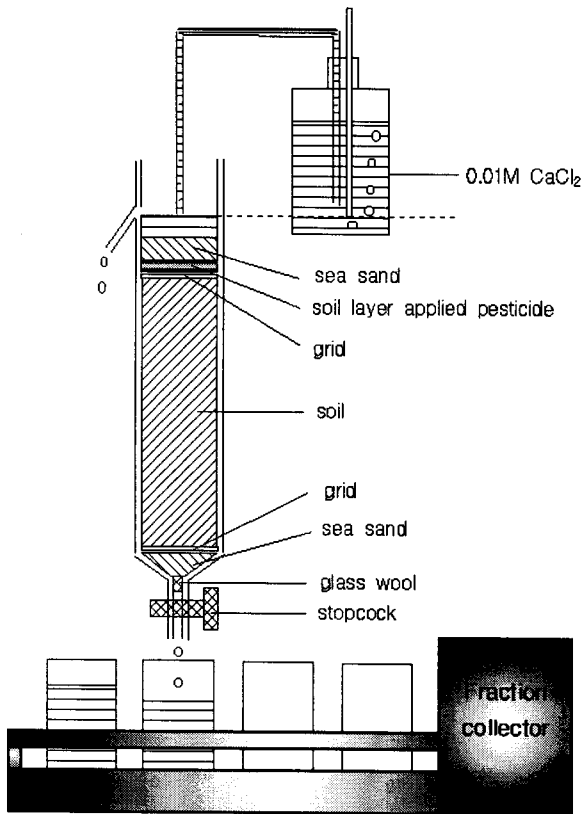


Fig. 1. A Schematic diagram of leaching experiment using soil column.

(Eldex사 Universal fraction collector, 미국)로 10-20 mL 단위로 수집, 기기분석하여 농약의 용탈농도를 측정하였다. 용탈실험 후 양토 10 cm, 20 cm 및 30 cm 토주를 2 cm 간격으로 채취하여 칭량하고 습토기준으로 25 g씩을 분석하여 농약 잔류량을 각 분획의 잔류량으로 환산하였다.

시료 분석

용탈수는 전처리조작의 편의성을 위하여 16 mL cap-tube를 이용 유기용매와 혼합한 후 마개를 막고 2분간 격렬하게 진탕 추출하고 층 분리가 충분히 된 후 유기용매층을 gas chromatograph (GC)로 분석하였다. 그러나 회수율이 낮은 농약의 경우에는 분액여두를 이용, dichloromethane으로 2회 분배추출하였고, 용탈수 중 농도가 낮은 경우에는 다량의 용탈수를 취하여 분액여두를 이용, dichloromethane으로 분배추출하고 감압농축 후 hexane으로 재용해하여 기기분석하였다. 용탈실험 후 토양 중 농약 잔류량은 acetone 추출, dichloromethane 분배 후 감압농축하여 hexane으로 재용해하여 기기분석을 실시하였다. 필요한 경우에는 추가로 Florisil chromatography 정제를 실시하였다.

Ethoprophos와 iprobenfos는 염광광도검출기가 장착된 일본 Hitachi사의 모델 G3000 GC를 사용하였고 butachlor, isoprothiolane 및 procymidone은 전자포획검출기를 장착한 미국 Varian사의 모델 Vista 6000 GC 또는 HP사의 모델 HP5890 series II GC를 사용하여 분석하였다.

대류이동성 모형에 의한 이동성 평가

Jury 등 (1983, 1984a,b)이 제안한 화합물의 이동성 평가방법인 대류이동성 모형은 토양의 전용적밀도와 유기탄소함량이 매개변수로 도입되어 토양 특성을 반영하며, 화합물의 이동성을 토양 중 이동거리와 water flux에 따른 이동소요시간 (t_c)으로 나타낼 수 있다.

$$t_c = (\rho_b f_{oc} K_{oc} + \theta_v + a K_H) l / J_w$$

여기서 f_{oc} 는 유기탄소 함량, a 는 토양의 용적 기준 공기 함량,

K_H 는 Henry 상수, l 은 이동거리, J_w 는 water flux이다.

토주실험 조건 및 Jury 등 (1984b)의 표준조건에서의 대류 이동성 모형에 의한 이동소요시간을 구하고,

Table 3. Soil bulk densities and porosities in soil column and total leachate volume during soil column experiment for 47 days

Soil	Column length(cm)	Bulk density (g/mL)	Porosity (%)	Pore volume (mL)	Leachate	
					Total volume(mL)	No. of PV ^{a)}
SL	10	1.54	38.5	75.6	6101	80.5
	20	1.47	35.2	138	8015	58.0
	30	1.48	34.8	205	6946	33.8
L	10	1.41	42.9	84.3	5520	65.3
	20	1.49	41.0	161	4284	26.5
	30	1.46	40.0	235	3985	16.9
CL	10	1.31	47.7	93.6	5915	63.0
	20	1.33	45.3	178	7795	43.7
	30	1.36	45.5	268	10162	37.9

^{a)}No. of PV = [Leachate-15mL(volume attributed by bottom sea sand)]/Pore volume.

토주실험에서 공극용적 단위로 얻어진 이동속도를 시간으로 환산하여 예측의 정확도를 비교하였다.

결과 및 고찰

토심별 용탈

사양토, 양토 및 식양토의 토주 길이를 각각 10, 20 및 30 cm로 하여 47일간 총 용탈수량을 4000~10000 mL (강수량 기준으로 2000~5000 mm 수준에 해당) 범위에서 흐르게 하여 얻은 각 토주별 용적밀도, 공

극율, 공극부피 및 pore volume (PV)로 나타낸 용탈수량은 표 3과 같다. 또한 동일한 용출조건에서 ethoprophos 등 5종 농약의 용탈수에 의한 이동 및 누적 용탈량을 표 4~6으로 나타내었다. 농약의 이동속도는 토심 10 cm의 공극부피를 기준으로 하여 거리별 이동양상을 나타내도록 표준화한 PV로 나타내었다. 모든 토양-농약 조합에서 농약의 출현에 소요되는 이동시간은 토주 길이가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 것으로 보아, 임의의 단위거리를 이동하는데 걸리는 속도를 알 수 있다면 거리별 이동시간을

Table 4. Maximum concentrations and recoveries of five pesticides measured in leachates with depth of 10, 20 and 30 cm sandy loam columns

Pesticide	Column length (cm)	Leachate		
		$C_{L,max}(\mu\text{g/mL})$	$PV_{Cmax}(V/V_{0,10}^a)$	$\Sigma M_i/M_0$
Ethoprophos	10	6.98	2.4	0.892
	20	2.52	6.2	0.891
	30	2.58	7.8	0.923
Iprobenfos	10	2.91	4.1	0.816
	20	1.63	10	0.779
	30	1.06	16	0.725
Procymidone	10	1.15	11	0.828
	20	0.68	19	0.822
	30	0.50	22	0.801
Isoprothiolane	10	1.15	7.1	0.518
	20	0.61	15	0.504
	30	0.43	28	0.484
Butachlor	10	0.10	33	0.230
	20	-	-	-
	30	-	-	-

^{a)} $V_{0,10}$ is the pore volume reduced to 10 cm depth column.

Table 5. Maximum concentrations and recoveries of five pesticides measured in leachates with depth of 10, 20 and 30 cm clay loam columns

Pesticide	Column length (cm)	Leachate		
		$C_{L,max}(\mu\text{g/mL})$	$PV_{Cmax}(V/V_{0,10}^a)$	$\Sigma M_L/M_0$
Ethoprophos	10	6.98	1.5	0.895
	20	6.55	3.8	0.958
	30	3.61	6.2	0.957
Iprobenfos	10	4.65	2.3	0.865
	20	3.05	5.5	0.872
	30	1.67	9.7	0.834
Procymidone	10	1.65	6.7	0.958
	20	1.08	10	0.875
	30	0.84	14	0.905
Isoprothiolane	10	1.44	4.2	0.453
	20	1.00	8.6	0.517
	30	0.67	13	0.514
Butachlor	10	0.57	15	0.747
	20	0.21	37	0.623
	30	0.15	57	0.583

^a $V_{0,10}$ is the pore volume reduced to 10 cm depth column.

Table 6. Maximum concentrations and recoveries of five pesticides measured in leachates and soil fractions with depth of 10, 20 and 30 cm loam columns

Pesticide	Column length(cm)	Leachate			Soil fractions with depth			$\Sigma M_T/M_0$
		$C_{L,max}(\mu\text{g/mL})$	$PV_{Cmax}(V/V_{0,10}^a)$	$\Sigma M_L/M_0$	$C_{S,max}(\mu\text{g/g})$	$D_{Cmax}(\text{cm})$	$\Sigma M_S/M_0$	
Ethoprophos	10	4.10	3.2	0.868	-	-	0.019	0.887
	20	2.48	7.1	0.736	-	-	0.034	0.770
	30	0.74	12	0.607	-	-	0.053	0.660
Iprobenfos	10	1.88	6.6	0.775	-	-	0.028	0.803
	20	1.07	15	0.685	0.77	14-16	0.062	0.747
	30	0.35	29	0.516	0.32	26-28	0.175	0.691
Procymidone	10	0.83	13	0.793	0.10	6-8	0.028	0.821
	20	0.45	25	0.591	1.60	14-16	0.104	0.695
	30	0.16	39	0.257	5.14	20-22	0.430	0.687
Isoprothiolane	10	0.77	11	0.517	0.05	8-10	0.015	0.532
	20	0.43	23	0.451	0.19	16-18	0.066	0.517
	30	0.16	43	0.240	0.54	26-28	0.290	0.530
Butachlor	10	0.03	≥ 61	0.046	0.35	2-4	0.122	0.168
	20	-	-	-	0.68	2-4	0.186	0.186
	30	-	-	-	0.70	0-2	0.166	0.166

^a $V_{0,10}$ is the pore volume reduced to 10 cm depth column.

예측할 수 있을 것으로 짐작되었다.

이동속도와 용탈 및 토주내 잔류농도

Ethoprophos의 경우 사양토와 식양토에서는 이동거리의 증가에 따른 용탈수 중 정점농도 (peak)의 감소

경향이 명확하지 않았으나 양토에서는 용탈수 중 peak 농도가 토심 10 cm일 때 4.1mg/L, 20 cm일 때 2.48mg/L, 30 cm일 때 0.74mg/L로 측정되어 이동거리 증가에 따른 용탈수 중 peak 농도 감소경향이 비교적 뚜렷하였다. Ethoprophos는 procymidone에 비하여 토양

에 의한 흡착성이 상대적으로 낮아 초기에 대부분 용탈되고 짧은 시간동안에 용탈수 중의 농도 변화가 매우 클 것이므로 용탈수 분획 채취 간격을 짧게 하여 분석하였다면 보다 정확한 농도 변화를 감지할 수 있었을 것으로 생각된다(이 시기의 용탈수 채취는 0.3~0.5 PV 간격이었다). 농약의 이동속도를 PV 단위로 나타내면 세 토양 모두 토심에 비례하여 peak일 때의 PV 값이 증가함을 알 수 있는데 토양별로는 유기물 함량이 매우 낮은 식양토에서 평균 1.9 PV로 가장 빨리 이동하고 사양토의 2.7 PV, 양토의 3.8 PV의 순이었다. 한편 누적용탈량(M_L)은 처리량(M_0) 대비 식양토 89.5~95.8%, 사양토 89.1~92.3%, 양토 60.7~73.6% 범위이었으며 양토에서 누적용탈량이 상대적으로 낮은 것은 토양 중에 머무름시간이 길어 분해과정에 오래 노출되었기 때문이라 생각된다. 이러한 판단은 용탈실험 종료 후 토심별 잔류량 분석에 의하여 확인되었는데 농약의 이동이 가장 느린 양토의 경우 토심 잔류량(M_S)이 처리량(M_0)의 1.9~5.3% 수준으로 용탈량 및 토심잔류량을 합한 회수율은 66.0~88.7%이었다.

Procymidone의 경우도 이동거리 증가에 따른 용탈수 중 peak 농도의 감소 추세가 확인하여 토심의 증가에 따라 사양토에서는 1.15, 0.68, 0.50 mg/L, 식양토에서는 1.65, 1.08, 0.84 mg/L, 그리고 양토에서는 0.83, 0.45, 0.16 mg/L으로 감소하였다. Procymidone의 peak 농도값은 ethoprophos의 16.5~27.0% 수준에 불과하였다. Procymidone의 토양별 평균이동속도는 사양토 8.7 PV, 식양토 5.1 PV 및 양토 13 PV으로 나타났다. 이것은 ethoprophos에 비하여 procymidone의 이동시간이 2.7~3.3배 정도 더 소요된다는 것을 의미한다. 그리고 procymidone의 누적용탈량은 사양토 80.1~82.8%

및 식양토 87.5~95.8%에 비하여 양토는 25.7~79.3%로 나타나 상당량의 procymidone이 토양 중에 잔류할 것으로 예상되었다. 토심별 토양 분석결과 10 cm 토주에는 처리량 대비 2.8%, 20 cm 토주에는 10.4% 그리고 30 cm 토주에는 43.0%의 procymidone이 잔류하는 것으로 나타났다. 토양 중 peak 농도는 20 cm 토주의 경우 14~16 cm 토층에서 1.60 mg/kg 농도로 나타났다고 30 cm 토주의 경우에는 20~22 cm 토층에서 5.14 mg/kg 농도로 나타났다. 누적용탈량, 출현곡선(미제시) 및 토층별 잔류농도로 판단결과 30 cm 토주의 경우에는 용탈수에서는 peak 농도에 도달하지 못한 것으로 판단되었다.

Iprobenfos의 용탈수 중 peak 농도는 30 cm 토주의 경우 사양토 1.1 mg/L, 식양토 1.7 mg/L 및 양토 0.35 mg/L 수준이었다. Ipobenfos의 토양별 평균이동속도는 사양토 5.0 PV, 식양토 2.9 PV 및 양토 8.4 PV으로 나타났다. 그리고 누적용탈량을 살펴보면 사양토 72.5~81.6%, 식양토 83.4~87.2% 및 양토는 51.6~77.5% 이었고 세 토양의 토심 잔류량은 처리량의 2.8~17.5%이었다. Isoprothiolane은 검출농도와 이동속도가 procymidone과 비슷한 양상이었으나 토심 잔류량이 30%에 달했던 30 cm 양토 토주를 제외하면 모든 용탈조건에서 누적용탈량은 50% 내외 수준이었다. Butachlor의 경우는 식양토에서 peak 농도 0.15~0.57 mg/L, 평균이동속도 18 PV이었으나 사양토나 양토에서의 용탈은 거의 관찰되지 않았다. 용탈실험 후 양토에서 토심별 butachlor의 잔류량을 측정된 결과 용탈수량이 가장 많았던 10 cm 토주의 경우에도 약제 처리한 상단부위부터 토주의 하단까지 0.2-0.4 mg/kg 수준으로 고르게 분포하였으며, 20 cm와 30 cm 토주의 경우에도 분포범위는 10-12 cm까지로 유사하였으

Table 7. Convection time and mobility class of pesticides calculated from Koc, organic carbon content, bulk density, and water content in soils at standard conditions^{a)}

Pesticide	SL		L		CL	
	t_c (day)	class ^{b)}	t_c (day)	class	t_c (day)	class
Ethoprophos	12	4 or 5	18	4	9	5
Iprobenfos	28	4	35	3	17	4
Procymidone	37	3	65	3	21	4
Isoprothiolane	42	3	54	3	24	4
Butachlor	176	2	279	1 or 2	105	2 or 3

^{a)}Standard condition: moving distance 10 cm, water flux 1 cm/day.

^{b)}Classification : 1 (immobile), 2 (slightly mobile), 3 (moderately mobile), 4 (mobile), 5 (most mobile).

Table 8. Comparison of convection times in days of five pesticides measured and predicted by convection mobility test model at same conditions used in soil column test

Pesticide	Soil depth (cm)	SL		L		CL	
		M	P(CM) ^{a)}	M	P(CM)	M	P(CM)
Ethoprophos	10	1.4	1.9	2.3	3.0	1.3	1.5
	20	2.5	2.7	6.3	8.0	2.0	2.2
	30	3.6	4.6	11	13	2.6	2.6
Iprobenfos	10	2.4	4.4	4.8	6.0	1.7	2.8
	20	4.1	6.3	13	16	3.0	4.2
	30	7.4	11	27	26	4.0	4.9
Procymidone	10	6.4	5.8	9.4	11	5.0	3.3
	20	7.7	8.4	22	30	5.4	5.0
	30	10	15	36	47	5.8	5.9
Isoprothiolane	10	4.1	6.5	7.9	9.2	3.1	3.8
	20	6.1	9.4	20	25	4.6	5.8
	30	13	16	40	39	5.4	6.9
Butachlor	10	19	27	>44	48	11	17
	20		40		130	20	26
	30		69		205	24	30

^{a)}P(CM) : convection time predicted by convection mobility test model.

나, 각각 토심 2-4 cm 및 0-2 cm 분획에서 최고농도를 나타내었으며, 그 농도는 0.7 mg/kg 수준이었고 토양 중 잔류량은 17~19% 수준이었다.

대류이동성 모형 예측 결과와의 비교 평가

Jury 등 (1984a)은 이동성 평가에 있어 화합물과 토양의 특성을 반영하는 모형을 대류, 확산에 의한 이동성, 휘발 및 잔류성 각각에 대하여 제시하였다. 그 중 농약의 토양중 이동성과 가장 관계가 깊은 대류이동성 모형은 표준화된 이동거리와 water flux 조건에서의 대류이동시간의 비교로 화합물간 이동성의 상대적 비교가 가능하다. Jury 등 (1984b)이 사용한 표준조건의 실험에서 사용된 토양-농약별 대류이동시간을 표 7에 나타내고, Jury 등 (1984b)이 제안한 기준에 따라 이동성을 분류하였다. 토양의 특성이 반영됨에 따라 대부분 농약의 용탈 가능성의 토양별 순서가 토주 실험 결과와 같은 경향으로 나타나, 식양토의 경우가 가장 이동성이 커서 이동소요시간이 가장 적고, 양토에서의 이동성이 가장 작아서 이동소요시간이 큰 것으로 나타났다.

실제 토주 용탈실험에 적용된 조건에 따른 이동소요시간을 표 8로 나타내었다. 실험에 사용된 전 농약의 이동소요시간은 표준조건을 적용하였을 때와 경향

은 동일하였으나, 이동소요시간은 water flux의 증가에 따라 반비례의 관계를 나타내는 대류이동성 모형의 단순성에 따라 동일한 양상으로 줄어들었다. Ethoprophos 등 5종 농약의 이동실험에 의한 이동속도와 대류이동성 모형에 의한 예측결과를 토양별로 비교하면, 사양토의 경우 ethoprophos, iprobenfos, procymidone, isoprothiolane, butachlor의 10 cm 토주에서의 이동소요시간 실측치는 각각 1.4, 2.4, 6.4, 4.1, 19일이었고 예측치는 각각 1.9, 4.4, 5.8, 6.5, 27일로 나타나 대부분 예측에 의한 이동속도가 약간 느린 것으로 나타났다. 토주 20 cm와 30 cm의 비교결과도 10 cm 토주의 결과와 마찬가지로 실측치에 비하여 1/2배 정도 느리게 예측되었다. 양토의 경우 ethoprophos, iprobenfos, procymidone, isoprothiolane, butachlor의 10 cm 토주에서의 이동소요시간 실측치는 각각 2.3, 4.8, 9.4, 7.9, 44일이었고 예측치는 각각 3.0, 6.0, 11, 9.2, 48일로 나타나 사양토의 경우와 같은 경향이었다. 토주 20 cm와 30 cm의 비교결과도 10 cm 토주에서의 결과와 같은 경향이었으며, 이동예측 결과는 30 cm 토주에서 가장 잘 부합되었다. 식양토에서는 ethoprophos, iprobenfos, procymidone, isoprothiolane, butachlor의 10 cm 토주에서의 이동소요시간 실측치는 각각 1.3, 1.7, 5.0, 3.1, 11일이었고 예측치는 각각 1.5,

2.8, 3.0, 3.8, 17일로 나타나 procymidone을 제외하면 예측에 의한 이동속도가 약간 느린 것으로 나타났다. 토주 20 cm와 30 cm의 비교결과도 10 cm 토주의 결과와 마찬가지로 느리게 이동하는 것으로 예측되었다. Procymidone에서 10 cm 토주의 이동속도는 타 농약과는 달리 실측치에 비하여 상당히 빠르게 예측되었으나 이동거리가 증가함에 따라 실측치에 근접하였다가 30 cm 토주에서는 다른 농약과 마찬가지로 느리게 예측되는 현상을 나타내었는데 이것은 농약 처리부에 존재하는 농약이 procymidone의 낮은 수용해도로 인하여 충분히 용해되지 못하여 발생하는 이동 지연 현상으로 설명할 수 있다. 농약이 이동하여감에 따라 지연효과의 영향이 줄어들게 되어 긴 토주에서는 다른 농약과 같은 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 이동소요시간 예측 결과와 실측치와 비교할 때 대류이동성 모형은 이동속도에 대한 간이예측 수단으로는 적절하다고 판단된다. 그러나 대류이동성 모형은 이동거리 및 경과 시간에 따른 화합물의 농도변화에 대한 예측 수단은 제공하지 못하고 있어 농도변화를 예측할 수 있는 간편 모형이 필요할 것으로 생각된다.

인용문헌

- Barry, D. A., and G. Sposito (1988) Application of the convection-dispersion model to solute transport in finite soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:3~9.
- Beck, A. J., H. Stolting, G. L. Harris, K. R. Howse, and K. C. Jones (1996) Leaching of recently applied and aged residues of the herbicides atrazine and isoproturon through a large, structured clay soil core. *Chemosphere* 33:1297~1305.
- Bergstroem, L. (1996) Model predictions and field measurements of chlorsulfuron leaching under non-steady-state flow conditions. *Pestic. Sci.* 48:37~45.
- Boesten, J. J. T. I., and A. M. A. van der Linden (1991) Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence. *J. Environ. Qual.* 20:425~435.
- Bottani, P., J. Keizer, and E. Funari (1996) Leaching indices of some major triazine metabolites. *Chemosphere* 32:1401~1411.
- Jury, W. A., W. F. Spencer, and W. J. Farmer (1983) Behavior assessment model for trace organics in soil: I. Model description. *J. Environ. Qual.* 12:558~564.
- Jury, W. A., W. J. Farmer, and W. F. Spencer (1984a) Behavior assessment model for trace organics in soil: II. Chemical classification and parameter sensitivity. *J. Environ. Qual.* 13:567~572.
- Jury, W. A., W. F. Spencer, and W. J. Farmer (1984b) Behavior assessment model for trace organics in soil: III. Application of screening model. *J. Environ. Qual.* 13:573~579.
- Jury, W. A., W. F. Spencer, and W. J. Farmer (1984c) Behavior assessment model for trace organics in soil: IV. Review of experimental evidence. *J. Environ. Qual.* 13:580~586.
- Jury, W. A., D. D. Focht, and W. J. Farmer (1987) Evaluation of pesticide groundwater pollution potential from standard indices of soil-chemical adsorption and biodegradation. *J. Environ. Qual.* 16:422~428.
- Klute, A. (1986) Method of soil analysis. Part 1 - Physical and mineralogical methods. 2nd ed. American Society of America and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Koedel, W., M. Herrchen, and W. Klein (1991) Experimental assessment of pesticide leaching using undisturbed lysimeters. *Pestic. Sci.* 31:337~348.
- Page, A. L. (1982) Method of soil analysis. 2nd ed. American Society of America and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Roth, K., and W. A. Jury (1993) Modeling the transport of solutes to groundwater using transfer functions. *J. Environ. Qual.* 22:487~493.
- Sanchez-Martin, M. J., T. Crisanto, L. F. Lorenzo, M. Arienzo, and M. Sanchez-Camazano (1995) Influence of leaching rates on ¹⁴C-metolachlor mobility. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 54:562~569.
- Tomlin, C.(ed.) (1997) The pesticide manual (11th ed.). British Crop Protection Council. UK.
- 강종국 (1996) 토양중 살충제 endosulfan의 흡탈착 특성에 관한 연구. 전남대학교 박사학위논문
- 김균, 김용화 (1990) 제초제 butachlor의 토양흡착. 한

- 국환경농학회지 9:105~111.
- 김정호 (1996) 토양중 trifluralin의 용탈. 한국환경농학회지 15:464~471.
- 김찬섭, 이진광, 최주현 (1994) 토양 중 농약의 행방에 관한 연구. 농약연구소 시험연구보고서.
- 마상용, 문영희, 양환승 (1987) 식물체 및 토양중에 있어서 제초제 pretilachlor의 이동특성. 한국농화학회지 30:351~356.
- 이석준, 김병하, 김장억 (1998) 제초제 paraquat의 토양 중 흡·탈착 특성. 농약과학회지 2:70~78.
- 이재구, 오경석 (1993) Carbofuran, bentazon 및 TCBA 잔류물의 토양중 용탈. 한국환경농학회지 12:9~17.
- 최주현, 김찬섭, 정영호 (1991) 시설재배지 토양 중 농약잔류량 조사. 농약연구소 시험연구보고서.
- 황인택, 구석진, 홍경식, 조광연 (1990) 제초제의 토양 중 수직 이동성 검토. 한국잡초학회지 10:30~36.
- 현해남, 오상실, 류순호 (1995) 제주도 대표 토양에서 alachlor와 chlorothalonil의 흡착과 이동 연구. 한국환경농학회지 14:135~143.

Leaching and mobility prediction of butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprothiolane and procymidone in soils

Chan-Sub Kim*, Kyung-Hun Park, Jin-Bae Kim and Ju-Hyeon Choi(National Institute of Agriculture Science and Technology, Suwon, 441-707, Korea.)

Abstract : This study was conducted to investigate the downward mobility of pesticides using soil columns and to compare the experimental results with predicted values from Convective mobility test model. Five pesticides including ethoprophos, procymidone, iprobenfos, isoprothiolane, and butachlor were subjected to soil column leaching test for three types of cultivation soils. The concentrations of ethoprophos, iprobenfos, procymidone, isoprothiolane and butachlor leached from soil column of 30 cm depth ranged 0.74~3.61 mg/L, 0.36~1.67 mg/L, 0.16~0.84 mg/L, 0.16~0.67 mg/L and lower than 0.15 mg/L, respectively. Elution volume to reach the peak of ethoprophos, iprobenfos, procymidone, isoprothiolane and butachlor in the leachate ranged 2~4 PV, 3~10 PV, 5~13 PV, 4~14 PV and 19~61 PV, respectively. Convection times predicted by Convective mobility test model at standard conditions were 9~18 days for ethoprophos, 17~35 days for iprobenfos, 24~54 days for isoprothiolane, 21~65 days for procymidone and 105~279 days for butachlor. Based on these convection times, ethoprophos was classified as mobile or most mobile, isoprothiolane and procymidone as moderately mobile or mobile and butachlor as slightly mobile. On the same conditions, convection times from the model were coincided with those from soil column test in most of the soil-pesticide combinations applied. Therefore, Convective mobility test model could be applied to predict convection times of pesticides.

*Corresponding author(Fax : +82-31-290-0521, E-mail : chskim@rda.go.kr)