

콩재배 포장 라이시메타를 이용한 alachlor, ethalfluralin, ethoprophos 및 pendimethalin의 유출량 평가

김찬섭* · 이희동 · 오병렬 · 이영득¹⁾

농촌진흥청 농업과학기술원 농약평가과, ¹⁾대구대학교 생명환경학부
(2006년 12월 5일 접수, 2006년 12월 20일 수리)

Runoff and Erosion of Alachlor, Ethalfluralin, Ethoprophos and Pendimethalin from Soybean Field Lysimeter

Chan-Sub Kim*, Hee-Dong Lee, Byung-Youl Oh, and Young-Deuk Lee¹⁾ (Pesticide Safety Division, National Institute of Agriculture Science and Technology, Rural Development Administration, Suwon, 441-707, Korea, ¹⁾Division of Life and Environmental Science, Daegu University, Kyungsan, 712-714, Korea)

ABSTRACT: The field lysimeter experiments were undertaken to investigate the runoff and erosion loss of four pesticides from sloped land by rainfall and to assess the influence of pesticide properties, environmental factors and agricultural practices on them. The pesticide losses from soybean planted field and bare field were measured using field lysimeters. Pesticide losses from a series of lysimeter plots of sloped land by rainfall ranged 0.1~0.6% for alachlor, 1.1~4.5% for ethalfluralin, 8~31% for pendimethalin and 0.03% for ethoprophos, which were 1/3~2.5 times to them in the simulated rainfall study. The erosion loss rates of pesticides from soybean-plots were 21~75% lower than the ones from bare soil plots. The effect of slope conditions was not great for runoff loss, but for erosion loss increased to maximum 4~12 times by sloping degree and slope length. The peak runoff concentration in soybean-plots and bare soil plots were 3~278 μgL^{-1} and 6~450 μgL^{-1} for alachlor, 1.1~11.4 μgL^{-1} and 0.9~16 μgL^{-1} for ethalfluralin, 7~42 μgL^{-1} and 6~66 μgL^{-1} for pendimethalin, and 2~53 μgL^{-1} and 0.1~113 μgL^{-1} for ethoprophos, respectively, on nine different slope degree and slope length plots. Therefore, the differences of the peak runoff concentration between bare soil plots and soybean-plots were not great.

Key Words: pesticide, runoff, erosion, alachlor, ethalfluralin, ethoprophos, pendimethalin

서 론

농약의 토양이나 수계에의 도달은 농약의 살포과정 중 토양으로의 직접 투하, 비산 또는 작물에 부착되었던 농약이 강우나 이슬 등에 의하여 씻겨 내림에 의하여 시작된다^{1,2)}. 이렇게 토양에 도달한 농약은 다양한 분해·대사과정을 겪게 되며, 토양입자에 흡착되거나 토양수에 용해된 형태로 존재하게 된다^{1,3,4)}. 토양에 잔류하는 농약은 물의 흐름에 따라 용탈되어 지하수를 오염시킬 수도 있고^{5,6)}, 강우의 강도가 심하여 강수량이 토양의 침투능력을 초과하는 경우에는 토양 표면유출에 의하여 이동하여 지표수계로 흘러들어가게 된다^{1,2,7)}. 농약의

잔류성과 흡착성에 의하여 지하수 오염가능성을 가늠할 수 있는 수직이동 현상^{5,6,8-13)}과 달리 지표유출은 물에 녹거나 부유 토양입자에 흡착된 두 가지 형태로 일어나게 된다^{1,2,7,14,15)}. 많은 연구결과에 의하여 상당한 정도로 지하수계 오염 가능성을 예측할 수 있는 선진외국³⁻⁶⁾의 경우에도 표면유출에 관한 연구는 훨씬 많은 영향인자로 인하여 실험방법, 예측모형 및 평가방법 등이 아직 충분히 정립되지 못한 상태라 할 수 있다^{1,2,7)}.

우리나라의 경우 시설재배 작물을 제외한 대부분의 밭작물이 경사지에서 재배되고, 농약의 사용이 많은 6~9월 사이에 강도 높은 강우가 집중되므로 침투수에 의한 농약의 용탈 가능성보다는 경작지의 표면을 흐르는 유출수에 의한 수계로의 이동 가능성이 높을 것으로 예상된다. 따라서 토양표면유출이 농약에 의한 수계오염의 또 다른 중요한 경로라는 인식

*연락처:

Tel: +82-31-290-0581 Fax: +82-31-290-0508
E-mail: chskim@rda.go.kr

이 확산되어 국내의 경우에도 실내인공강우, 모의포장 유출시험 등이 시도되고 있으나 다양한 환경조건을 반영한 경우는 극소수에 불과한 실정이다^{14,15}.

농약의 표면유출에 대한 영향인자는 농약의 특성, 환경적 요인 및 영농방법에 의한 영향 등으로 크게 나누어 볼 수 있다. 농약의 특성으로는 흡착성으로 표현되는 이동성^{16,17}과 환경적 요인으로는 강우의 시기, 강도 및 강우량을 포함하는 강우 양상과 유출이 일어나는 포장의 경사도, 경사의 길이 및 토양의 투수성 등을 들 수 있을 것이다¹⁸. 따라서 본 연구에서는 콩 재배 경사지 포장에서 lysimeter 실험을 수행하여 경사도와 경사장 및 작물의 재배 유무에 따른 농약의 표면유출 양상을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

시험에 사용된 농약은 시중 농약상에서 구입하였다. 제조제로는alachlor 5% 입체, ethalfluralin 2.5% 입체 및 pendimethalin 5% 입체를 사용하였고 살충제로는 ethoprophos 3% 입체를 사용하였다. 농약의 토양에 대한 흡착성에 크게 영향을 미치는 특성이 물에 대한 용해도는alachlor 170 mgL⁻¹, ethalfluralin 0.3 mgL⁻¹, pendimethalin 0.33 mgL⁻¹, ethoprophos 700 mgL⁻¹ 이었다¹⁹.

경사지 lysimeter 유출실험

포장에서의 유출실험은 농업과학기술원내의 경사지에 설치된 lysimeter 포장에서 실시하였다. 토양의 토성은 양토내지 사양토에 해당하였고 유기물 함량은 대략 1.8% 수준이었다. Lysimeter 포장은 경사도 10, 20 및 30%와 경사장 5, 10 및 15 m의 9 조합의 처리구로 나누어지고, 각 처리구는 폭 2 m의 콩재배 2개구 및 1개 나지구로 구성하였다. 각 구의 하단에는 폭 80 cm, 길이 100 cm, 깊이 45 cm의 1차 저수조와 폭 80 cm, 길이 80 cm, 깊이 90 cm의 2차 저수조가 설치되어 있어 유출수와 유실토양을 채취할 수 있었다.

1999년에는 5월 27일 경운 후 ethoprophos 3% 입체를 90 kg ha⁻¹ 수준으로 살포하고 콩을 파종한 후alachlor 5%

입체를 50 kg ha⁻¹의 수준으로 살포하였다. Alachlor의 분해소실을 우려하여 6월 15일 나지구에 한하여alachlor 5% 입체, ethalfluralin 2.5% 입체 및 pendimethalin 5% 입체를 각각 20 kg ha⁻¹, 20 kg ha⁻¹ 및 10 kg ha⁻¹ 수준으로 추가 살포하였다. 실험기간 중에 6월 16일 최초 강우를 시작으로 9월 27일까지 13회의 유출수를 채취하였으며 토양 유실은 7회 발생하였다.

2001년에는 6월 7일 경운정지작업을 한 후 다음날 오전 콩을 파종하였다. 6월 11일 ethalfluralin 2.5% 입체와 pendimethalin 5% 입체를 각각 30 kg ha⁻¹와 20 kg ha⁻¹ 수준으로 살포하였다. 재배기간 중에 6월 18일 최초 유출이 일어난 강우를 시작으로 8월 16일까지 8회의 유출수와 유실 토양을 채취하였다. 유출량의 측정과 시료채취는 가능한 한 강우가 끝난 당일에 실시하였으나 강우종료시점이 오후 늦은 시각인 경우에는 다음날 아침에 실시하였다. 저수조의 깊이를 측정하고 채수한 후 저수조 안의 물을 배출시키고 남은 유실토를 잘 섞은 다음 용기에 담아 계량하여 유실량을 측정하였다. 유실량이 많은 경우에는 저수조에 쌓인 깊이를 측정하여 무게로 환산하였다. 실험기간 중의 강우량을 Fig. 1로 나타내었다.

시료의 분석

유출수는 유리병에 담아 실험실로 운반하여 가능한 한 즉시 추출하였다. 시료 중 500 mL를 취하여 50 mL의 포화식염수를 넣고 50 mL의 dichloromethane으로 2회 분배하여 추출한 다음 감압조건에서 농축하여 5 mL의 n-hexane에 용해하여 분석하였다.

유실토양은 플라스틱통에 담아 실험실로 운반 후 일정량을 감압여과장치를 이용 수분을 일정한 수준으로 제거한 다음 분석용 시료로 사용하였다. 토양 50 g을 100 mL의 acetone으로 1시간 동안 진탕하여 추출한 다음 감압조건에서 여과하였다. 여과액에 증류수 500 mL와 50 mL의 포화식염수를 넣고 dichloromethane으로 유출수와 동일한 과정을 거쳐 2 mL의 n-hexane으로 용해하였다. 활성화된 Florisil 5 g과 그 위에 2 cm 두께로 anhydrous sodium sulfate를 충전하고 n-hexane으로 세정하여 준비한 크로마토그래피관에 hexane

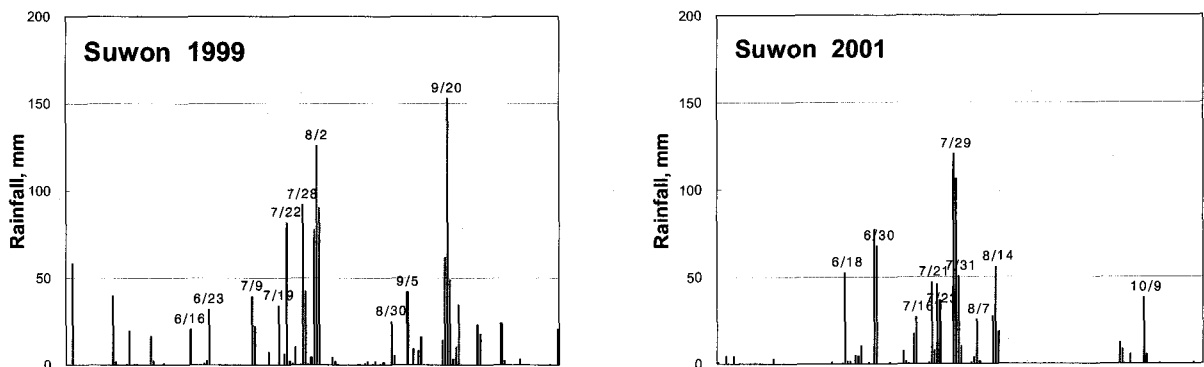


Fig. 1. Seasonal precipitation in Suwon in 1999 and 2001.

추출액을 가하여 정제과정을 수행하였다. Dichloromethane/*n*-hexane(20/80, v/v) 혼합용매 50 mL를 흘려 씻어 버린 후, 50 mL의 dichloromethane/*n*-hexane/acetonitrile(50/49.65/0.35, v/v/v) 혼합용매로 용출하여 ethalfluralin과 pendimethalin 분석에 사용하였고, 이어서 50 mL의 조성비를 달리한 동일성분(50/45/5, v/v/v) 혼합용매로 용출하여 alachlor와 ethoprophos의 분석에 사용하였다. 용출액은 감압조건에서 농축하여 5 mL의 *n*-hexane에 재용해하였다.

농약잔류분석은 ECD와 NPD가 장착된 HP 5890 series II 가스크로마토그래프를 사용하였다. 시료주입구의 온도는 230°C, 검출기의 온도는 ECD 300°C, NPD 270°C 이었고, 30 m 길이의 DB-5(내경 0.25 mm) 칼럼과 15 m 길이의 HP-5(내경 0.53 mm) 칼럼을 장착하여 승온 프로그램(60~270°C) 조건으로 분석하였다. Alachlor와 ethoprophos의 농도는 NPD 분석결과로 계산하였고, ethalfluralin과 pendimethalin의 농도는 ECD 분석결과로 산출하였다.

결과 및 고찰

Alachlor

Alachlor의 표면유출량에 대한 요약을 Table 1에 나타내었다. 콩을 재배하지 않은 나지구에서는 경사도 및 경사장 lysimeter별 유출수에 의한 alachlor의 유실량은 처리량의 0.1% 이하이었고 토양유실에 따른 유실량은 0.5% 이하로 전

체 유실량은 0.1~0.6% 수준이었다. 인공강우실험 결과에 비하여 lysimeter 포장성적이 1/10 수준으로 낮게 나타난 이유는 인공강우실험의 토심별 alachlor의 분포양상을 고려해보면 농약 처리 후 최초 유출이 일어난 경우까지의 시간경과에 따른 alachlor의 분해와 적당한 강우의 반복에 의한 수직이동 결과 표면유출이 일어날 수 있는 표토 부분에 존재하는 alachlor의 잔류량 감소에 의한 것일 것으로 사료된다²⁴⁾. 이것은 alachlor의 수용해도가 170 mgL⁻¹이고¹⁹⁾ 실험포장토양에서의 흡착배계수(Kd)가 1.5로²⁴⁾ 이동성이 상당한 농약으로 분류된다는 점과 일치한다. 한편 콩재배구에서는 재배기간 중 토양유실이 거의 발생하지 않았다. 따라서 콩재배구의 유실률은 유출수에 의한 부분만으로 나타내었는데 0.002~0.020% 수준으로 나지구의 1/50 수준이었다.

Alachlor의 유출농도는 물유출량이 미미했던 초기 유출시에는 나지구에서 최고 450 µgL⁻¹, 콩재배구에서 최고 280 µgL⁻¹으로 높게 측정되었으나, 전체구에서 유출이 발생한 7월 10일 강우시에는 2~66 µgL⁻¹이었고 그 다음 7월 22일 강우시에는 1~6 µgL⁻¹ 수준이었다. 미국 EPA²⁰⁾는 alachlor에 대한 재등록평가서에 미국의 강, 저수지 등 지표수 잔류조사 결과 최고 정점농도는 3.6~10 µgL⁻¹이었고 평균농도는 0.43~0.81 µgL⁻¹라고 보고한 바 있으며 본 실험결과는 이와 유사한 수준이거나 포장말단에서의 유출농도임을 감안하면 보다 낮은 수준이라고 생각되며 alachlor의 유출에 의한 생태위해성 평가에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Annual losses of alachlor through runoff and erosion from soil surface of lysimeter plot cultivated the soybean in 1999

Condition of lysimeter plot			Loss by rainfall				Total (%)
Slope (%)	SL (m)	Crop	Runoff		Erosion		
			C _{Max} (µgL ⁻¹)	Loss (%)	C _{Max} (mgkg ⁻¹)	Loss (%)	
10	5	Soybean	2.5	0.004	-	-	0.004
		Bare soil	6.3	0.022	0.23	0.091	0.113
	10	Soybean	17	0.003	-	-	0.003
		Bare soil	-	-	-	-	-
20	15	Soybean	52	0.002	-	-	0.002
		Bare soil	6.8	0.013	0.25	0.179	0.193
	5	Soybean	280	0.012	-	-	0.012
		Bare soil	19	0.078	0.29	0.056	0.135
30	10	Soybean	230	0.020	-	-	0.020
		Bare soil	450	0.106	0.37	0.534	0.640
	15	Soybean	150	0.009	-	-	0.009
		Bare soil	390	0.027	0.14	0.367	0.394
30	5	Soybean	5.4	0.006	-	-	0.006
		Bare soil	15	0.023	0.39	0.080	0.103
	10	Soybean	103	0.006	-	-	0.006
		Bare soil	130	0.061	0.19	0.380	0.441
15	Soybean	20	0.009	-	-	0.009	
	Bare soil	150	0.044	0.18	0.484	0.528	
Soybean total	Range		0.002~0.020				0.002~0.020
	Average		0.008				0.008
Bare soil total	Range		0.013~0.106			0.056~0.534	0.103~0.640
	Average		0.047			0.271	0.318

Ethoprophos

Ethoprophos의 표면유출량에 대한 요약은 Table 2에 나타내었다. 콩을 재배하지 않은 나지구에서는 경사도 및 경사장 lysimeter별 유출수에 의한 ethoprophos의 유실량은 처리량에 비하여 0.001% 수준이었으며 토양 유실에 따른 유실량은 0.03% 수준이었다. 인공강우실험 결과²⁴⁾에 비하여 lysimeter 포장 유실량이 1/6 정도로 낮게 나타났는데, 이는 수용해도가 700 mgL⁻¹이고¹⁹⁾ 실험포장토양에서의 흡착분배계수(Kd)가 1.2로²⁴⁾ 이동성이 큰 ethoprophos가 1999년 7월 22일 강우 이전까지의 표면유출이 일어나지 않을 정도의 몇 차례 강우에 의하여 하향 이동하고 농약살포로부터 본격적인 유출시기까지의 충분한 경과기간 동안에 분해되어 유출수의 영향권인 토양표면의 잔류량이 감소하였기 때문으로 생각된다. 콩재배구에서의 유출율은 alachlor의 경우와 마찬가지로 유출수만으로 계산하였는데 나지구와 같은 경향으로 처리량에 비하여 0.001% 수준이었다.

유출수 중의 ethoprophos의 농도는 최초 유출시에는 대부분의 처리구에서 21~113 µgL⁻¹으로 alachlor에 비하여 상당히 낮은 수준이었으며, 전체구에서 유출이 발생한 7월 10일 강우시에는 0.1~5 µgL⁻¹이었고 그 다음 7월 22일 강우시에는 < 0.1~4 µgL⁻¹ 수준이었다. EU의 ethoprophos에 대한 평가보고서(DAR)²¹⁾에 의하면 그리스와 이태리의 강과 호수 수 중 잔류조사 결과 검출수준은 0.05 µgL⁻¹ 이하이었다고 한다. 따라서 ethoprophos의 지표수계 서식생물에 대한 위해

성평가는 필요하지 않을 것으로 생각된다.

Ethalfuralin

Ethalfuralin의 표면유출량에 대한 요약은 Table 3에 나타내었고, 경사도별 유출수 및 유실토양 중 농도와 유실률은 Fig 2, 3과 같았다. 경사도 및 경사장별 ethalfuralin의 유출수에 의한 유실량은 나지구의 경우 1999년에는 처리량에 비하여 0.01% 미만이었으나 2001년에는 0.17~0.49%이었으며, 토양 유실에 따른 유실량은 1999년에는 1.0% 이하이었고 2001년에는 0.9~4.0% 수준이었다. 이러한 유실매체별 유실량의 차이는 ethalfuralin의 낮은 수용해도(0.3 mgL⁻¹)¹⁹⁾와 높은 토양흡착성(Kd=56)²⁴⁾에 따른 것으로 생각되며, 실험년도별 유실량의 차이는 강우양상에 의하여 농약의 유출이 크게 영향을 받는다는 것을 단적으로 나타내는 결과라고 생각된다. 전체 유실량은 1.1~4.5% 수준으로 나타나 인공강우 실험 결과에 비하여 lysimeter 포장성적이 1/3 정도로 낮게 나타났으나, 강우 양상이 실제 포장 조건에 근접한 강우 시나리오 3의 유실률 2.6~5.0%와는 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다²⁴⁾.

콩재배구의 유실률은 나지구의 유실률에 비하여 평균적으로 28% 정도 감소된 것으로 나타났다. 경사조건의 영향을 살펴보면 유출수의 경우에는 그 차이가 크지 않았으나 유실토양에 의한 유실률은 최대 10배 정도까지 증가하는 것으로 나타났다. 경사도가 10%에서 30%로 증가함에 따라 토양유실에

Table 2. Annual losses of ethoprophos through runoff and erosion from soil surface of lysimeter plot cultivated the soybean in 1999

Condition of lysimeter plot			Loss by rainfall				Total (%)
Slope (%)	SL (m)	Crop	Runoff		Erosion		
			C _{Max} (µgL ⁻¹)	Loss (%)	C _{Max} (mgkg ⁻¹)	Loss (%)	
10	5	Soybean	-	-	-	-	-
		Bare soil	0.1	< 0.001	0.027	0.005	0.005
	10	Soybean	31	0.001	-	-	0.001
		Bare soil	-	-	-	-	-
20	15	Soybean	-	-	-	-	-
		Bare soil	0.4	< 0.001	0.071	0.053	0.053
	5	Soybean	42	0.003	-	-	0.003
		Bare soil	0.7	< 0.001	0.052	0.007	0.007
30	10	Soybean	38	0.001	-	-	0.001
		Bare soil	21	0.001	0.019	0.027	0.028
	15	Soybean	53	< 0.001	-	-	< 0.001
		Bare soil	78	0.001	0.019	0.024	0.025
30	5	Soybean	-	-	-	-	-
		Bare soil	0.6	0.001	0.046	0.008	0.009
	10	Soybean	36	< 0.001	-	-	< 0.001
		Bare soil	36	0.002	0.026	0.052	0.054
15	Soybean	1.5	0.001	-	-	0.001	
	Bare soil	113	0.001	0.035	0.092	0.093	
Soybean total	Range			0.001~0.003		-	0.001~0.003
	Average			0.001		-	0.001
Bare soil total	Range			0.001~0.002		0.005~0.092	0.005~0.093
	Average			0.001		0.034	0.034

Table 3. Annual losses of ethalfuralin through runoff and erosion from soil surface of lysimeter plot cultivated the soybean in 2001

Condition of lysimeter plot			Loss by rainfall				Total (%)
Slope (%)	SL (m)	Crop	Runoff		Erosion		
			C_{Max} (μgL^{-1})	Loss (%)	C_{Max} (mgkg^{-1})	Loss (%)	
10	5	Soybean	5.2	0.26	0.56	0.46	0.72
		Bare soil	4.6	0.27	0.35	0.86	1.13
	10	Soybean	2.4	0.28	0.48	1.41	1.61
		Bare soil	7.1	0.20	0.63	2.80	3.08
	15	Soybean	7.7	0.24	0.61	1.27	1.51
		Bare soil	3.2	0.20	0.79	3.47	3.67
20	5	Soybean	11.4	0.42	0.79	1.16	1.58
		Bare soil	2.8	0.45	0.48	2.46	2.90
	10	Soybean	1.1	0.17	0.33	0.80	0.97
		Bare soil	1.2	0.21	0.39	1.39	1.60
	15	Soybean	6.2	0.25	0.40	2.15	2.40
		Bare soil	0.9	0.17	0.29	2.31	2.48
30	5	Soybean	5.1	0.31	0.58	1.11	1.42
		Bare soil	8.2	0.39	0.75	2.75	3.14
	10	Soybean	8.9	0.39	1.40	3.27	3.66
		Bare soil	9.5	0.49	0.68	4.00	4.49
	15	Soybean	10.0	0.33	1.69	4.67	5.00
		Bare soil	16.2	0.41	1.01	3.30	3.71
Soybean total	Range			0.17~0.42		0.46~4.67	0.72~5.00
	Average			0.29		1.81	2.10
Bare soil total	Range			0.17~0.49		0.86~4.00	1.13~4.49
	Average			0.31		2.59	2.91
Bare soil total (1999)	Range			< 0.01		0.03~1.03	0.03~1.03
	Average			0.002		0.42	0.42

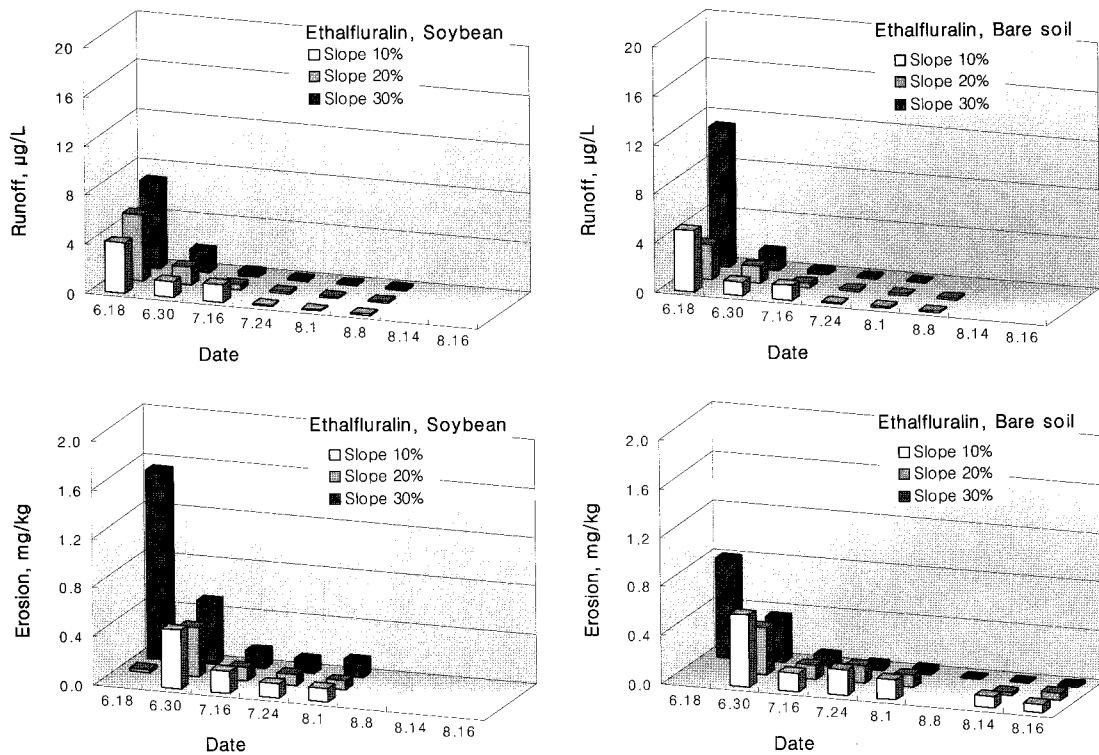


Fig. 2. Concentrations of ethalfuralin in runoff and on soil eroded from the soybean field lysimeter plots in the events of rainfall in 2001.

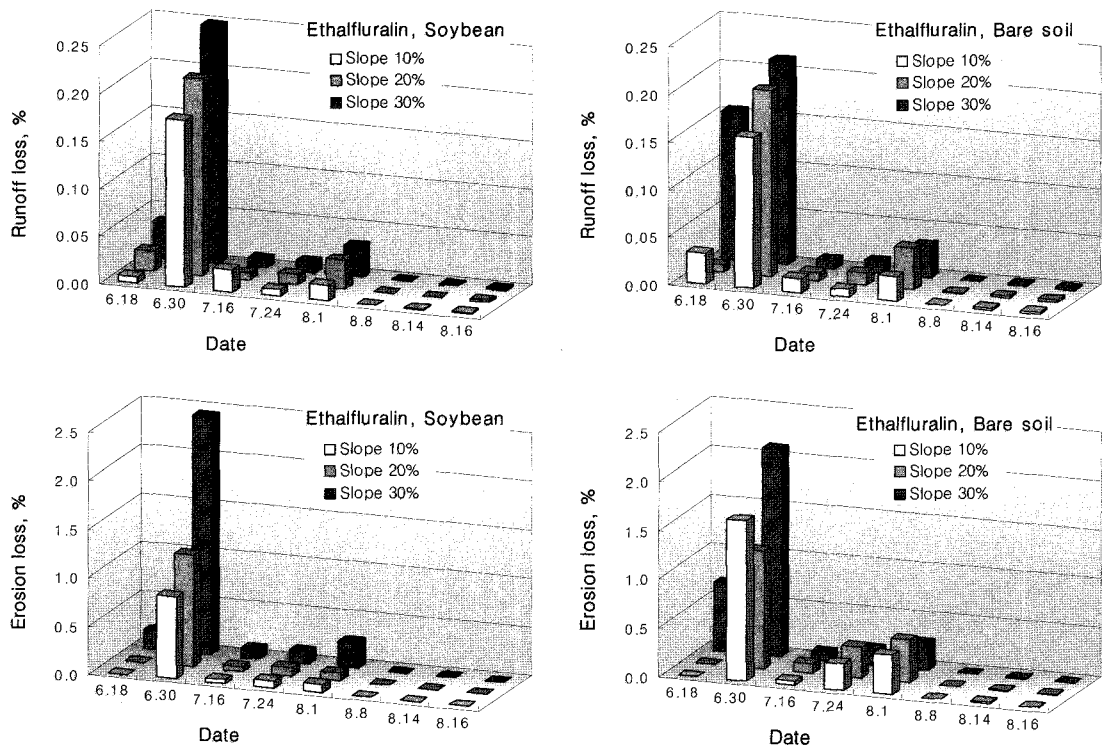


Fig. 3. Losses of ethalfluralin through runoff and erosion from the soybean field lysimeter plots in the events of rainfall in 2001.

따른 ethalfluralin의 유실률은 1~2배 증가하였으며, 경사장도 5 m에서 15 m로 길어짐에 따라 0.5~2배 증가하였다.

한편 유출수 중 ethalfluralin의 최고농도는 콩재배구 및 나지구 각각 $1.1\sim 11.4\ \mu\text{gL}^{-1}$ 및 $0.9\sim 16\ \mu\text{gL}^{-1}$ 수준으로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 대부분 최초의 유출이 일어날 때에 유출수 중 농약의 농도는 최고치를 나타내는데 최초의 유실이 콩의 생육 초기에 일어났기 때문으로 생각된다.

경사도별 유출농도와 유실률의 평균값을 유출강우시기별로 살펴보면 유출수와 유실토양 중 최고농도는 최초 유출강우 때인 6월 18일 채취시료에서 나타났지만 최대유실은 강우가 집중된 6월 30일 채취시료에서 나타났다. 그러나 경사도가 심한 30% 경사구의 경우에는 첫 번째 강우에서도 상당한 유출과 토양유실이 발생하였다.

Pendimethalin

Pendimethalin의 표면유출량에 대한 요약은 Table 4에 나타내었고 경사도별 유출수 및 유실토양 중 농도와 유실률은 Fig 4, 5와 같았다. 경사도 및 경사장별 pendimethalin의 유출수에 의한 유실량은 나지구의 경우 1999년에는 처리량에 비하여 0.2~0.5%이었고 2001년에는 1.1~2.6% 수준이었으며, 토양유실에 따른 유실량은 1999년에는 1.0~13%, 2001년에는 6.2~30% 수준이었다. 이러한 유실매체별 유실량

의 차이는 ethalfluralin의 경우와 마찬가지로 pendimethalin의 낮은 수용해도($0.33\ \text{mgL}^{-1}$)¹⁹⁾와 높은 토양흡착성($K_d=104$)²⁴⁾에 따른 것으로 생각되며, 실험년도별 유실량의 차이도 ethalfluralin의 경우와 마찬가지로 강우 양상이 농약의 유출에 크게 영향을 미친 결과로 생각된다. 전체 유실량은 8~31% 수준으로 나타나 인공강우 실험 결과에 비하여 lysimeter 포장 성적이 평균적으로 1.5배 높게 나타났다.

콩재배구의 유실률은 나지구의 유실률에 비하여 평균적으로 35% 감소된 것으로 나타났다. 경사조건의 영향을 살펴보면 유출수의 경우에는 그 차이가 크지 않았으나 유실토양에 의한 유실률은 최대 4배까지 증가하는 것으로 나타났다. 한편 유출수 중 pendimethalin의 최고농도는 콩재배구 및 나지구 각각 $7\sim 42\ \mu\text{gL}^{-1}$ 및 $6\sim 66\ \mu\text{gL}^{-1}$ 수준으로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

경사도별 유출농도와 유실률의 평균값을 유출강우시기별로 살펴보면 유출수 중 최고농도는 ethalfluralin의 경우와 마찬가지로 최초 유출강우 때인 6월 18일 채취시료에서 나타났지만, 두 번째 및 세 번째 강우에서의 유출농도도 $7\sim 8\ \mu\text{gL}^{-1}$ 전후로 상당히 높았고, 8월 중순의 여덟 번째 강우시기까지도 $1\ \mu\text{gL}^{-1}$ 수준으로 유지되었다. 토양흡착유실의 경우에는 이러한 경향이 보다 심하여 처음 3회 강우에 의한 유실농도는 $1.2\sim 2\ \text{mgkg}^{-1}$ 수준이었고 8월 초의 강우에서도 $0.4\sim 1.2$

Table 4. Annual losses of pendimethalin through runoff and erosion from soil surface of lysimeter plot cultivated the soybean in 2001

Condition of lysimeter plot			Loss by rainfall				Total (%)
Slope (%)	SL (m)	Crop	Runoff		Erosion		
			C_{Max} (μgL^{-1})	Loss (%)	C_{Max} (mgkg^{-1})	Loss (%)	
10	5	Soybean	22	1.6	5.2	3.5	5.1
		Bare soil	17	1.8	4.3	6.2	8.0
	10	Soybean	9	1.3	5.3	11.6	12.9
		Bare soil	30	1.8	6.8	21.4	23.2
	15	Soybean	38	1.5	6.5	9.9	11.4
		Bare soil	13	1.5	6.4	17.7	19.3
20	5	Soybean	41	2.6	8.4	9.5	12.1
		Bare soil	13	2.6	4.2	17.6	20.3
	10	Soybean	7	1.1	2.9	7.0	8.1
		Bare soil	9	1.5	4.7	10.6	12.1
	15	Soybean	26	1.4	2.8	12.2	13.6
		Bare soil	6	1.1	3.6	19.7	20.8
30	5	Soybean	20	1.8	5.8	8.5	10.3
		Bare soil	39	2.3	5.8	21.2	23.5
	10	Soybean	40	1.5	17.7	21.3	22.8
		Bare soil	31	1.9	5.7	29.5	31.4
	15	Soybean	42	1.3	7.4	24.9	26.2
		Bare soil	66	1.7	7.3	26.7	28.4
Soybean total		Range	1.1~2.6		3.5~24.9		5.1~26.2
		Average	1.6		12.0		13.6
Bare soil total		Range	1.1~2.6		6.2~29.5		8.0~31.4
		Average	1.8		19.0		20.8
Bare soil total (1999)		Range	0.2~0.5		1.0~13.1		1.5~13.4
		Average	0.3		6.0		6.3

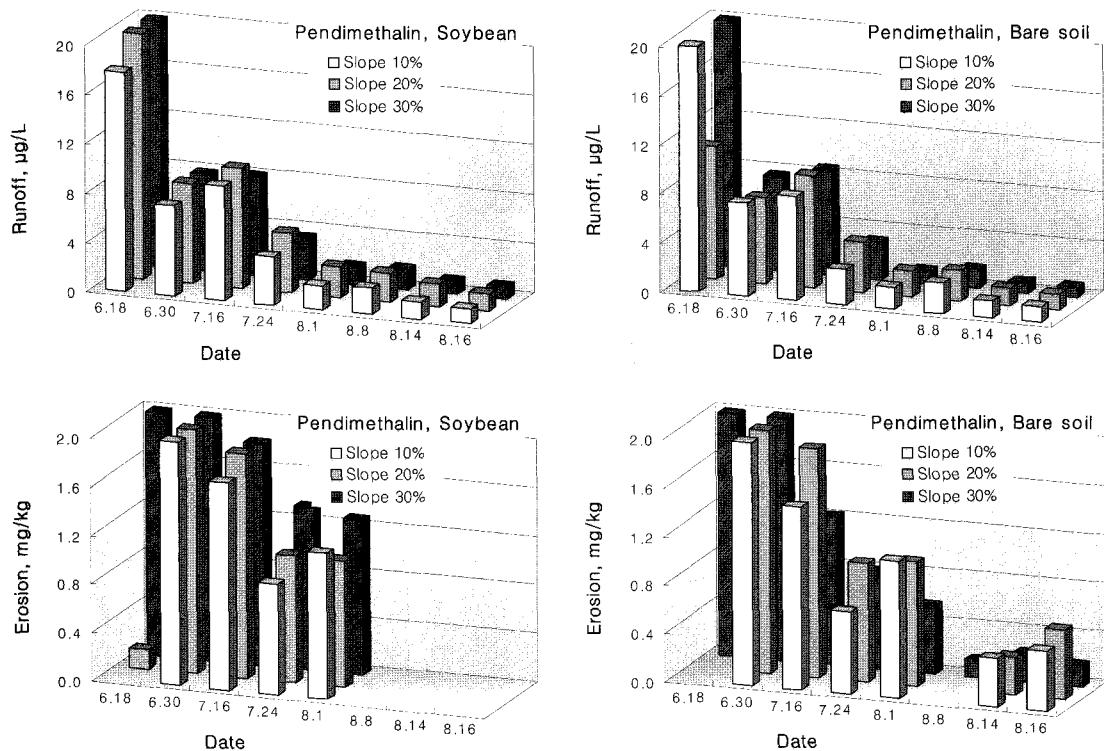


Fig. 4. Concentrations of pendimethalin in runoff and on soil eroded from the soybean field lysimeter plots in the events of rainfall in 2001.

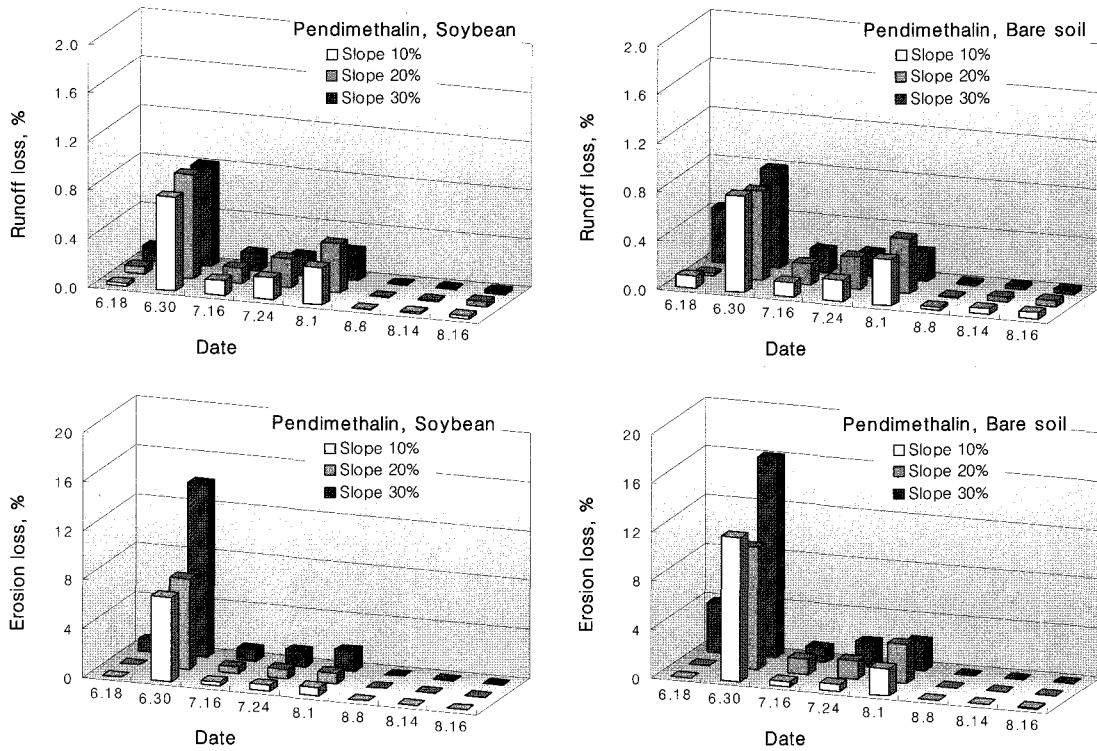


Fig. 5. Losses of pendimethalin through runoff and erosion from the soybean field lysimeter plots in the events of rainfall in 2001.

mgkg⁻¹ 수준으로 잔류성과 토양흡착성이 큰 pendimethalin의 특성을 잘 나타내었다. 미국 EPA²²⁾는 pendimethalin에 대한 재등록평가서에 미국의 13개 주에서 실시한 지표수 잔류조사 결과 < 0.01~17.6 μgL⁻¹이었다고 보고한바 있으며, Lee 등²³⁾이 골프장 잔디밭에서 실시한 인공강우 유출시험결과는 0.2~4.7 μgL⁻¹이었다. 따라서 본 실험결과도 다른 연구결과 등과 잘 부합한다고 볼 수 있어 pendimethalin의 생태위해성 평가시 환경 중 노출농도로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

강우에 의한 경사지 토양으로부터의 농약 유출양상을 파악하고 그에 대한 농약의 특성, 환경적 요인 및 영농방법 등의 영향 정도를 평가하기 위하여 콩 재배 경사지 포장에 설치된 포장 lysimeter에서의 경사도와 경사장 및 작물의 재배 유무에 따른 농약의 표면유출 양상을 파악하고자 하였다.

Lysimeter 포장유출실험 결과 경사도 및 경사장별 나지구의 유실량은 alachlor 0.1~0.6%, ethalfluralin 1.1~4.5%, ethoprophos 0.03% 및 pendimethalin 8~31% 수준이었으며, 인공강우실험의 유실율에 비하여 1/3~2.5배 수준으로 나타났다. 콩재배구의 유실율은 나지구의 유실율에 비하

여 평균적으로 21~75% 감소된 것으로 나타났다. 경사조건의 영향을 살펴보면 유출수의 경우에는 그 차이가 크지 않았으나 유실토양에 의한 유실율은 최대 4~12배까지 증가하는 것으로 나타났다. 한편 유출수 중 농약성분의 최고농도는 콩 재배구 및 나지구 각각 ethalfluralin 1.1~11.4 μgL⁻¹ 및 0.9~16 μgL⁻¹, pendimethalin 7~42 μgL⁻¹ 및 6~66 μgL⁻¹ 수준으로 작물재배 유무에 따른 유출수 중 농도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 농약의 살포지역 외부로의 유출은 기본적으로는 강우와 경사조건에 따른 물 유출량과 토양의 유실량에 의하여 결정되고 작물의 피복정도에 따라 감소하는 것으로 결론지을 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Leonard, R. A. (1990) Movement of pesticides into surface waters, *In Pesticides in the soil environment: processes, impacts and modeling*. H. H. Cheng, (Ed.), Soil Science Society of America, Madison, WI. 303-349.
2. Kim, S. S., Kim, T. H., Lee, S. M., Park, D. S., Zhu, Y. Z. and Hur, J. H. (2005) Mobility of pesticides in different slopes and soil collected

- from Gangwon alpine sloped-land under simulated rainfall conditions. *Korean J. Pestic. Sci.* 9(4), 316-329.
3. Jury, W. A., Focht, D. D. and Farmer, W. J. (1987) Evaluation of pesticide groundwater pollution potential from standard indices of soil-chemical adsorption and biodegradation. *J. Environ. Qual.* 16, 422-428.
 4. Boesten, J. J. T. I. and van der Linden, A. M. A. (1991) Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence. *J. Environ. Qual.* 20, 425-435.
 5. Gustafson, D. I. (1989) Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability. *Environ. Toxicol. Chem.* 8, 339-357.
 6. Jarvis, N. J., Hollis, J. M., Nicholls, P. H., Mayer T. and Evans, S. P. (1997) MACRO_DB : A decision-support tool for assessing pesticide fate and mobility in soils. *Environmental Modelling & Software* 12, 251-265.
 7. FOCUS (2004) FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC. pp 294.
 8. Moon, Y. H., Kim, Y. T., Kim, Y. S. and Han, S. K. (1993) Simulation and measurement of degradation and movement of insecticide ethoprophos in soil. *Korean J. Environ. Agric.* 12(3), 209-218.
 9. Hyun, H. N., Oh, S. S. and Yoo, S. H. (1995) Adsorption and movement of alachlor and chlorothalonil in the representative soil of Cheju island. *Korean J. Environ. Agric.* 14(2), 135-143.
 10. Kim, C. S., Lee, B. M., Ihm, Y. B. and Choi, J. H. (2002) Leaching potential of butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprothiolane and procymidone in soils as affected by adsorption characteristics. *Korean J. Pestic. Sci.* 6(4), 309-319.
 11. Kim, C. S., Park, B. J., Ihm, Y. B. and Ryu, G. H. (2005) Adsorption characteristics of organophosphorus and carbamate pesticides in four soils and the evaluation for their leaching potential using two screening models. *Korean J. Environ. Agric.* 24(4), 341-349.
 12. Kim, C. S., Park, K. H., Kim, J. B. and Choi, J. H. (2002) Leaching and mobility prediction of butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprothiolane and procymidone in soils. *Korean J. Pestic. Sci.* 6(4), 300-308.
 13. Kim, C. S., Ihm, Y. B., Lee, H. D. and Oh, B. Y. (2005) Leaching of organophosphorus and carbamate pesticides in soil column and prediction of their mobility using the convective mobility test model in soils. *Korean J. Environ. Agric.* 24(4), 350-357.
 14. Kim, K. (1997) Studies on pesticide runoff from soil surface by rainfall. Ph. D. Thesis, Seoul National University.
 15. Kim, K., Kim, J. H. and Park, C. K. (1997) Pesticide runoff from soil surface by rainfall. *Korean J. Environ. Agric.* 16(3), 274-284.
 16. McCall, P. J., Swann, R. L., Laskowski, D. A., Unger, S. M., Vrona, S. A. and Dishburger, H. J. (1980) Estimation of chemical mobility in soil from liquid chromatographic retention times. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 24, 190-195.
 17. Roberts, T. R. (1996) Assessing the environmental fate of agrochemicals. *J. Environ. Sci. Health.* B31, 325-335.
 18. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537.
 19. Tomlin, C. (ed.) (2003) The pesticide manual (13th ed.). British Crop Protection Council.
 20. U.S. EPA (1998) Reregistration Eligibility Decision for Alachlor. U.S. EPA Doc No. 738-R-98-020.
 21. EU EFSA (2004) Draft Assessment Report for Ethoprophos: Annex B. Environmental Fate and Behaviour.
 22. U.S. EPA (1997) Reregistration Eligibility Decision for Pendimethalin. U.S. EPA Doc No. 738-R-97-007.
 23. Lee, Y. D., Kim, H. J., Chung, J. B. and Jeong, B. Y. (2000) Loss of pendimethalin in runoff and leaching from turfgrass land under simulated rainfall. *J. Agric. Food Chem.* 48(11), 5376-5382.
 24. Kim, C. S., Ihm, Y. B., Oh, B. Y. and Lee, Y. D. (2006) Runoff and erosion of alachlor, ethalfuralin, ethoprophos and pendimethalin by rainfall simulation. *Korean J. Environ. Agric.* 25(4), (in press).