

인공강우와 콩재배 포장 라이시메타를 이용한 endosulfan의 유출량 평가

김찬섭* · 이희동 · 임양빈 · 임건재

농업과학기술원 농약평가과

(2007년 12월 5일 접수, 2007년 12월 24일 수리)

Runoff of Endosulfan by Rainfall Simulation and from Soybean-grown Field Lysimeter

Chan-Sub Kim*, Hee-Dong Lee, Yang-Bin Ihm, and Geon-Jae Im (Pesticide Safety Division, National Institute of Agriculture Science and Technology, Rural Development Administration, Suwon, 441-707, Korea)

ABSTRACT: Three different experiments were carried out to investigate the runoff and erosion losses of endosulfan from sloped-field by rainfall. The mobility of endosulfan and which phase it was transported by were examined in adsorption study, the influence of rainfall pattern and slope degree on the pesticide loss were evaluated in simulated rainfall study, and the pesticide losses from soybean-grown field comparing with bare soil were measured in field lysimeter study. Adsorption parameter (K) of endosulfan ranged from 77 to 131 by adsorption method and K values by the desorption method were higher than those by the adsorption method. By the SSLRC's classification for pesticide mobility endosulfan was classified as non-mobile class ($K_{oc} > 4,000$). Runoff and erosion loss of endosulfan by three rainfall scenarios ranged from 3.4 to 5.6% and from 4.4 to 15.6% of the amount treated. Endosulfan residues were mainly remained at the top 5 cm of soil depth after the simulated rainfall study. Pesticide loss in case of 30%-slope degree ranged from 0.6 to 0.9 times higher than those in case of 10%-slope degree. The difference of pesticide runoff loss was related with its concentration in runoff water and the difference of pesticide erosion loss would related closely with the quantity of soil eroded. Endosulfan losses from a series of lysimeter plots in sloped land by rainfall ranged from 5 to 35% of the amount treated. The erosion rate of endosulfan from soybean-plots was 66% of that from bare soil plots. The effect of slope conditions was not great for runoff loss, but was great for erosion loss as increasing to maximum 4~12 times with slope degree and slope length. The peak runoff concentration of endosulfan in soybean-plots and bare soil plots ranged from 8 to 10 and from 7 to 9 $\mu\text{g L}^{-1}$ on nine plots with different slope degree and slope length. Therefore the difference of the peak runoff concentrations between bare soil plots and soybean-plots were not great.

Key Words: runoff, erosion, adsorption, endosulfan, lysimeter

서 론

농약은 살포과정 중 토양으로의 직접 투하, 비산 또는 작물에 부착되었던 농약이 강우나 이슬 등에 의하여 씻겨 내림에 의하여 토양이나 수계에 도달된다.^{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)} 강수량이 토양의 침투능력을 초과하는

경우에는 토양 표면유출에 의하여 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)} 그러나 농약에 의한 수계오염의 중요한 경로인 표면유출에 대한 연구 결과는 국내의 경우 극소수^{14,15)}에 불과하며, 외국의 경우에도 표면유출에 관한 연구는 훨씬 많은 영향인자로 인하여 실험방법, 예측모형 및 평가방법 등이 아직 충분히 정립되지 못한 상태이다.^{1,7)}

우리나라에서는 시설재배 작물을 제외한 대부분의 밭작물이 경사지에서 재배되고 6~9월 사이에 강우 집중시기와 농약 사용시기가 겹쳐지게 되므로 집중강우에 의하여 농약이 수계로 유출될 가능성이 높을 것으로 예상된다. 특히, 밭토양

*연락처:

Tel: +82-31-290-0581 Fax: +82-31-290-0508

E-mail: chskim@rda.go.kr

에 직접 살포되는 농약의 경우 단위면적당 사용량이 많고 작물체에 의한 차단효과가 적어 강우에 의하여 농경지로부터 벗어날 가능성이 희석살포농약에 비하여 높다고 생각된다. 따라서 발작물 파종시기에 사용되는 농약 중 토양잔류성, 농약 사용량과 수용해도를 고려하여 농경지 외부로의 유출이 우려되는 endosulfan을 포장유출시험 대상농약으로 선정하였다.

Endosulfan은 비식용작물재배지의 땅강아지와 거세미나방, 애바구미 등의 방제를 위하여 파종 전 또는 이식 전에 토양에 골, 구덩이 또는 토양전면 처리용으로 사용된다. 단위면적당 살포량은 3% 분제의 경우 최대 60 kg ha^{-1} 까지이고 유효성분 기준으로는 1.8 kg ha^{-1} 이 된다.¹⁶⁾ Endosulfan의 최근 5년간 평균 출하량은 유효성분량으로 3% 분제가 95,926 kg이고, 35% 유제가 182,323 kg이었다.¹⁷⁾

표면 유출에 영향을 미치는 농약의 특성으로는 흡착성^{18,19)}과 잔류성이 중요하고, 기후 요인으로는 강우의 시기, 강도 및 강우량 등 강우 양상, 토양 요인으로는 유출이 일어나는 포장의 경사도, 경사의 길이 및 토양의 투수성 등을 들 수 있다.²⁰⁾

따라서 본 연구에서는 흡착실험으로 농약의 이동 가능성과 이동형태를 파악하고, 인공강우 유출실험으로 강우양상 및 경사도의 영향 정도를 살펴본 후 콩 재배 포장 lysimeter에서 작물 재배에 따른 농약의 유실 양상 차이를 파악하는 일련의 실험과정을 수행하여 농약의 표면유출 양상을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

시험에 사용된 농약은 endosulfan 3% 분제(상표명 지오틱스)로 시중 농약상에서 구입하였다. Endosulfan의 물에 대한 용해도는 이성질체별로 약간의 차이가 있는데 alpha-form은 0.32 mg L^{-1} , beta-form은 0.33 mg L^{-1} 이고 토양잔류 반감기는 주 대사산물을 포함하여 5~8개월이다.²¹⁾

인공강우유출 실험토양으로는 농업과학기술원의 경사지 lysimeter 시험포장(수원시 서둔동 소재)에서 표층 20 cm까지 채취한 토양을 체질이 가능할 정도로 음건 후 5 mm체를 통과시켜 사용하였고 흡착실험에는 같은 토양을 충분히 풍건시킨 후 2 mm체를 통과시켜 사용하였다. 실험에 사용된 토양의 토성은 사양토에 해당하였고 유기물 함량은 1.86%이었다.

농약잔류분석은 ECD가 장착된 HP 5890 Series II 가스 크로마토그래프(Hewlett Packard, USA)를 사용하였다. 시료주입구의 온도는 230°C , 검출기의 온도는 300°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 ($60\sim 270^\circ\text{C}$) 조건으로 분석하였다.

흡탈착실험

Endosulfan은 수용해도가 낮아 토양대 용액비를 1대 10으로 하여 0.1 mg L^{-1} 단일 수준으로 흡착 및 탈착 실험을 실시하였다. 토양흡착실험은 OECD²²⁾와 EPA²³⁾ 시험기준에 따

라 토양에 농약처리용액을 가하고 12시간 동안 진탕하여 평형에 도달한 후 원심분리를 실시하여 상정액을 분석하였고, 탈착실험의 경우는 유기용매에 녹인 농약을 토양에 혼화처리한 후 유기용매가 휘발되도록 일정시간 방치한 후 0.01 M CaCl_2 용액을 가하고 흡착실험 방법과 동일한 과정으로 실험하였다. 초기처리농도에서 측정된 용액 중의 농도를 감하여 토양에 대한 흡착농도를 계산하는 batch 실험법의 단점을 보완하기 위하여 동일한 과정을 거친 별도의 토양/용액 전체의 농약량을 분석하였다. 이 결과로부터 평형도달시간 중의 분해율을 구하여 토양에 흡착된 농약농도 계산치를 보정하였다.⁹⁾

인공강우 유출실험

인공강우실험을 위하여 가로 30 cm, 세로 100 cm, 높이 25 cm의 stainless steel box를 제작하였는데, 하단부에는 물과 공기가 통과할 수 있도록 직경 5 mm의 구멍을 95~100개 만들었다. 그 위에 거즈를 두 겹으로 깔아 토양이 빠져나가지 못하도록 한 후 모래를 2 cm 높이로 채우고, 실험 토양 채취포장에서 측정된 토양의 전용적밀도(1.24 kg L^{-1})에 맞추어 토양을 다져서 전체 높이가 20 cm가 되도록 채웠다. 수조를 이용하여 하단부로부터 물을 채워 토양표면까지 포화시킨 후 토양이 안정화되도록 실외에 방치하였다.

실험 직전에 토양 표면을 잘 고른 후 토양 표면에 endosulfan 3% 분제를 고르게 살포하고 시약스푼을 사용하여 토심 1 cm 이내에 섞이도록 잘 골라 주었다. 시험구당 농약 살포량은 1.5 g 으로 발작물의 표준사용량 수준이었다.

실험에 사용한 인공강우 장치는 일본 Daiki사에서 제작한 DIK-6000 모델이었으며, 지상 2.3 m의 높이에 설치된 8열의 수도관에 부착된 needle을 통하여 인공강우가 형성되며 수압조절과 needle의 진동정도를 제어할 수 있었다. 강우조건은 강우강도 및 지속시간에 따른 영향을 평가하기 위하여 3 수준의 처리를 두었다. 5월부터 10월 사이의 강우 양상을 고려하여 세우조건으로 3 mm hr^{-1} 에서 10시간 강우, 호우조건으로 20 mm hr^{-1} 에서 10시간 강우 및 폭우조건으로 50 mm hr^{-1} 에서 2시간 강우를 가정하였다. 강우 직전의 토양수분상태에 의한 영향을 파악하기 위하여 건조상태와 포장용수량상태의 2 수준으로 구분하여 실험을 실시하였다.

토양수분상태 및 강우양상에 따른 표면유출 영향을 파악하기 위하여 강우 시나리오를 작성하였다. 시나리오 1의 경우는 파종기에 충분히 비가 오는 경우를 가상하였는데, 습윤상태의 포장에 파종 및 농약살포가 끝난 후 20 mm hr^{-1} 의 강우가 10시간 지속되고 9일 경과 후에 50 mm hr^{-1} 의 강도로 2시간 비가 오고 다시 4주가 지난 후에 50 mm hr^{-1} 의 강도로 2시간 비가 오는 경우를 가정하였다. 시나리오 2의 경우는 건조상태가 계속되다가 파종 후 호우가 오는 조건으로 토양이 건조상태에서 파종 및 농약살포가 이루어지고 그 후 시나리오 1과 같은 양상의 강우가 오는 경우를 가정하였다. 시나리오 3은 건조상태가 계속되다가 적당한 비가 오는 경우를 가상하였는데 농약살포 후 3 mm hr^{-1} 의 강우가 10시간

지속되어 표면유출은 일어나지 않고 수분의 수직이동이 일어난 다음 9일 후 및 그 다음 4주 후에 시나리오 1, 2와 동일한 강도의 폭우(50 mm hr⁻¹에서 2시간)가 2 차례 오는 경우를 가상하였다. 강우 시나리오에서 2, 3차 강우를 폭우로 처리한 것은 농약간의 유출 양상의 상대적 비교를 위함이었다. 표면 유출의 영향인자 중 포장의 경사도의 영향을 평가하기 위하여 경사도 10%와 30%의 처리구를 두었다.

경사지 lysimeter 유출실험

포장에서의 유출실험은 농업과학기술원내의 경사지에 설치된 lysimeter를 이용하였다. 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 2 구 및 1 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.

2001년 6월 7일 경운 후 endosulfan 3% 분제를 50 kg ha⁻¹ 수준으로 살포하고 정지작업을 한 후 다음날 오전 콩을 파종하였다. 재배기간 중에 6월 18일 최초 유출이 일어난 강우를 시작으로 8월 16일까지 8회의 유출수와 유실토양을 채취하였으며, 시험기간 중 강우내역은 Fig. 1과 같다.

유출량의 측정과 시료채취는 가능한 한 강우가 끝난 당일에 실시하였으나 강우중요시점이 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.

시료의 추출 및 정제

유출수는 유리병에 담아 실험실로 운반하여 가능한 한 즉시 추출하였다. 시료 중 500 mL를 취하여 50 mL의 포화식

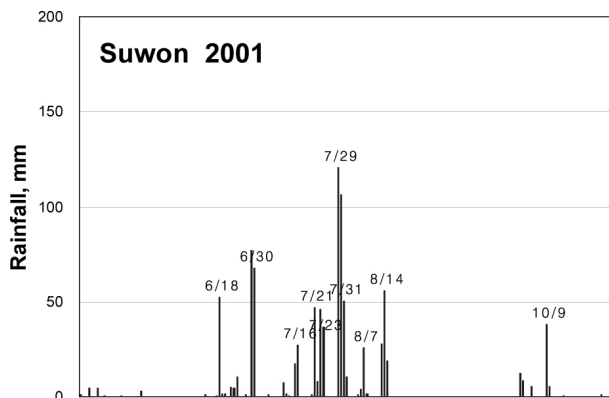


Fig. 1. Seasonal precipitation during the experimental period.

염수를 넣고 50 mL의 dichloromethane으로 2회 분배하여 추출한 다음 감압조건에서 농축하여 5 mL의 n-hexane에 용해하여 분석하였다.

유실토양은 플라스틱통에 담아 실험실로 운반 후 일정량을 감압여과장치를 이용하여 수분을 일정한 수준으로 제거한 다음 분석용 시료로 사용하였다. 토양 50 g을 100 mL의 acetone으로 1시간 동안 진탕하여 추출한 다음 감압조건에서 여과한 후 여과액에 증류수 500 mL와 50 mL의 포화식염수를 넣고 dichloromethane으로 유출수 분석과 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 n-hexane에 녹인 추출액을 가하여 정제과정을 수행하였다. Dichloromethane/n-hexane (20/80, v/v) 혼합용매 50 mL를 흘려 씻어 버리고 50 mL의 dichloromethane/n-hexane/acetoneitrile (50/49.65/0.35, v/v/v) 혼합용매로 용출하였으며, 용출액은 감압조건에서 농축하여 5 mL의 n-hexane에 재용해한 후 endosulfan의 분석에 사용하였다.

결과 및 고찰

토양흡착반응 속도

수용도가 낮은 endosulfan의 실험토양에 대한 흡착반응 평형시간을 정하기 위하여 반응시간별 토양용액 중 농도를 측정된 결과는 Fig. 2와 같았다. 반응 초기 2시간까지는 용액 중의 농도가 급격하게 줄어들어 토양 흡착량이 증가하는 것으로 나타났으나 그 후로는 흡착량의 증가가 매우 완만한 것으로 나타났고, 반응 12시간 후부터는 용액 중의 농도가 상당히 줄어드는 것으로 나타났다. 흡착반응계 전체의 12시간 반응 후 회수율과 24시간 후 회수율은 α-endosulfan의 경우 각각 87.0%와 83.8%이었으며, β-endosulfan의 경우 각각 90.1%와 85.5%이었고, endosulfan sulfate의 경우 각

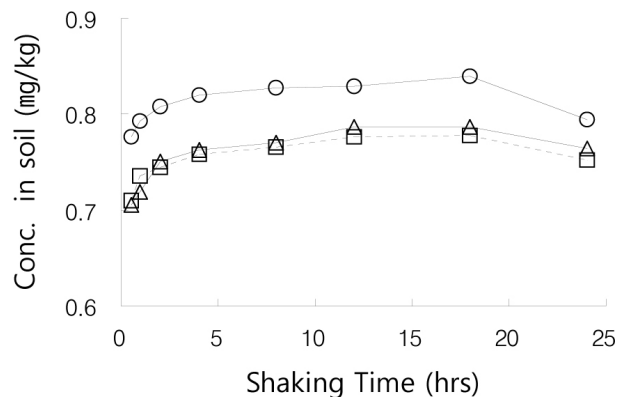


Fig. 2. Changes of the concentration of α-endosulfan, β-endosulfan and endosulfan sulfate adsorbed to soil with shaking time. Δ-Δ, α-endosulfan; ○-○, β-endosulfan; and □-□, endosulfan sulfate.

각 89.3%와 86.5%이었다. 따라서 12시간 경과 후에는 농약의 소실이 상당한 정도로 일어나는 것으로 판단하였다. 한편 반응시간이 증가함에 따라 흡착분배계수는 18시간까지 계속 증가하는 것으로 나타났으나, 흡착농도로 표현되는 토양에 의한 흡착량은 12~18시간에 최고에 도달하였으므로 경시적 분해를 증가경향을 고려하여 반응시간을 12시간으로 결정하였다.

흡착계수

실험농약의 토양에 대한 흡착성 수준을 흡탈착실험에 의한 흡착분배계수와 유기탄소기준 흡착분배계수 (K_{oc})로 Table 1에 나타내었다. Endosulfan의 흡착계수 측정방법 의존성을 $K_{des/ads}$ 값을 계산하여 평가하였는데 $K_{des/ads}$ 값이 α -endosulfan 1.07, β -endosulfan 1.12, endosulfan sulfate 1.05로 나

타나 흡착실험방법의 영향을 크게 받는 ethalfluralin 및 pendimethalin²⁴⁾과 달리 실험방법간의 차이가 거의 없었다.

K_{oc} 값은 α -endosulfan 7,800~8,600, β -endosulfan 10,800~12,100 및 endosulfan sulfate 7,100~7,200으로 미국 농약 재등록평가보고서에 평균값으로 제시된 α -endosulfan 10,600, β -endosulfan 13,600과 거의 대등한 수준이었다.²⁵⁾ 영국 SSLRC의 이동성 분류기준¹⁹⁾으로 판단하면 endosulfan은 K_{oc} 4,000을 초과하여 non-mobile 등급으로 나타났다. McCall 등¹⁸⁾의 이동성 범위를 적용하면 가장 이동성이 적은 immobile ($K_{oc} > 5,000$) 등급에 해당하였다.

인공강우에 의한 표면유출

강우 시나리오별 각 인공강우 처리구의 endosulfan 유출을 Table 2에 나타내었다. 유출수에 의한 endosulfan의 유

Table 1. Summary on adsorption coefficient of endosulfan on the soil used in the runoff study

Pesticide	Initial conc. in solution (mg kg ⁻¹)	Adsorption		Desorption	
		K_d	K_{oc}	K_d	K_{oc}
α -Endosulfan	0.1	84	7,800	93	8,600
β -Endosulfan	0.1	117	10,800	131	12,100
Endosulfan sulfate	0.1	77	7,100	78	7,200

Table 2. Loss of endosulfan by runoff and erosion from soil surface by rainfall simulation and residue distribution within soil profile after the simulation

Rainfall	Slope (%)	Loss by rainfall			Residue in soil	
		Event	Runoff (%)	Erosion (%)	Depth (cm)	Residue (%)
Scenario I	10	Total	5.04	5.64	Total	68.3
		1st	0.87	0.56	0~5	67.2
		2nd	2.34	4.34	5~10	1.0
		3rd	1.83	0.74	10~15	0.2
	30	Total	4.95	15.64	Total	55.8
		1st	1.31	0.58	0~5	53.9
2nd		1.97	11.49	5~10	1.5	
Scenario II	10	Total	5.62	4.92	Total	71.5
		1st	0.52	0.32	0~5	69.3
		2nd	2.95	3.92	5~10	1.4
		3rd	2.15	0.69	10~15	0.7
	30	Total	5.22	12.72	Total	39.8
		1st	0.67	0.79	0~5	39.8
2nd		2.92	8.91	5~10	0.1	
Scenario III	10	Total	3.42	4.44	Total	45.4
		1st	-	-	0~5	45.2
		2nd	1.07	2.52	5~10	0.2
		3rd	2.35	1.92	10~15	-
	30	Total	4.11	8.28	Total	35.6
		1st	-	-	0~5	35.0
2nd		2.32	4.91	5~10	0.6	
Scenario total	Range	Total	3.42~5.62	4.44~15.64	Total	35.6~71.5
	Average	Total	4.73	8.61	Total	52.7

실은 처리량의 3.4~5.6% 수준이었고 유실토양에 의한 부분이 4.4~15.6% 수준이었다. 유출수에 의한 유실에 비하여 유실토양에 의한 기여도가 평균적으로 0.8배 정도 높은 것으로 나타나 Kim 등²⁴⁾이 보고한 ethalfluralin 및 pendimethalin의 경우와 같이 수용해도가 적고 흡착성이 큰 약제의 특성이 잘 반영된 것으로 판단된다. 강우 시기별로는 1차 강우의 농약 유실량이 전체 유실량의 8~13% 수준으로 2차와 3차 강우의 유실량에 비하여 훨씬 적었다. Endosulfan의 3차 강우 유실량은 강우 시나리오 1과 2의 경우 2차 강우 유실량의 40% 내외의 수준에 달하였으며, 1차 강우에 유출이 일어나지 않았던 강우 시나리오 3의 경우에는 3차 강우 유실량이 2차 강우 유실량과 대등한 것으로 나타나 강우 양상과 토양수분 상태에 따라 유실정도가 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

농약의 수직이동과 표면유출의 관계를 파악하기 위하여 3차 강우 후 농약의 잔류량과 토심별 분포를 살펴 본 결과 전체 잔류량은 처리량 대비 36~72%이었다. 토심별로는 표층에서 토심 5 cm 범위 내에 거의 대부분이 분포하였으나, 강우 시나리오 1과 2의 경우에는 토심 10 cm 이하에서도 처리량의 0.2~0.7% 수준으로 검출되었다. 강우 시나리오 및 경사

도별 잔류율을 살펴보면 경사도가 클수록 유실량의 증가에 따라 잔류량이 적어지고 강우직전의 토양수분 상태에 영향을 받는 것으로 나타났다. 토양이 건조하여서 유출수에 의한 탈착 또는 토양유실이 일어나는 표토 부위에 보다 높은 농도로 농약이 잔류하는 경우에는 유실 정도가 심하여지는 경향이였다.

유실에 대한 경사도의 영향을 살펴보면 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.6~0.9배 증가하였는데, 유출수에 의한 유실분은 경사도별로 차이가 거의 없었으며, 유실토양에 의한 유실분은 경사도별 토양 유실량이 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 0.9~1.8배 증가한 것은 경사도 10%구에 비하여 경사도 30%구의 토양 유실량이 1.3~3.4배 많았기 때문인 것으로 생각되었다.

경사지 포장에서의 농약의 표면유출

경사도 및 경사장 lysimeter별 endosulfan의 유실량을 Table 3과 Fig 3, 4로 나타내었다. 유출수에 의한 유실량은 나지구의 경우 2.3~3.3% 수준이었으며 토양 유실에 따른 유실량은 7~30% 수준이었다. 전체 유실량은 10~33% 수준으로 나타나 인공강우실험 유실량 8~21%에 비하여 lysimeter

Table 3. Annual loss of endosulfan by runoff and erosion from soil surface of lysimeter plot cultivated with soybean in 2001

Lysimeter plot			Loss by rainfall				Total
Slope (%)	SL* (m)	Cultivation	Runoff		Erosion		
			Conc. _{max} (µg L ⁻¹)	Loss (%)	Conc. _{max} (µg L ⁻¹)	Loss (%)	
10	5	Yes	9.3	2.2	4.3	2.7	4.9
		No	8.5	2.9	5.0	7.4	10.3
	10	Yes	8.1	1.9	3.9	9.9	11.8
		No	7.4	2.9	8.2	30.4	33.3
	15	Yes	9.0	2.2	4.4	8.4	10.6
		No	8.1	2.8	4.9	16.2	19.0
20	5	Yes	9.3	2.9	9.1	10.1	13.0
		No	8.7	3.1	4.2	16.1	19.1
	10	Yes	7.7	2.0	2.3	5.5	7.5
		No	7.6	2.7	4.6	12.2	14.9
	15	Yes	8.8	2.4	2.5	10.4	12.8
		No	6.5	2.3	3.1	18.2	20.6
30	5	Yes	8.2	2.4	7.0	8.4	10.8
		No	8.8	3.3	6.9	23.0	26.3
	10	Yes	8.5	2.5	5.5	23.1	25.6
		No	7.4	2.9	3.8	26.0	28.9
	15	Yes	10.3	2.2	5.2	33.0	35.2
		No	9.4	2.6	4.0	25.0	27.5
Cultivation total		Range	1.9~2.9		2.7~33.0		4.9~35.2
		Average	2.3		12.4		14.7
No cultivation total		Range	2.3~3.3		7.4~30.4		10.3~33.3
		Average	2.8		19.4		22.2

*Slope length.

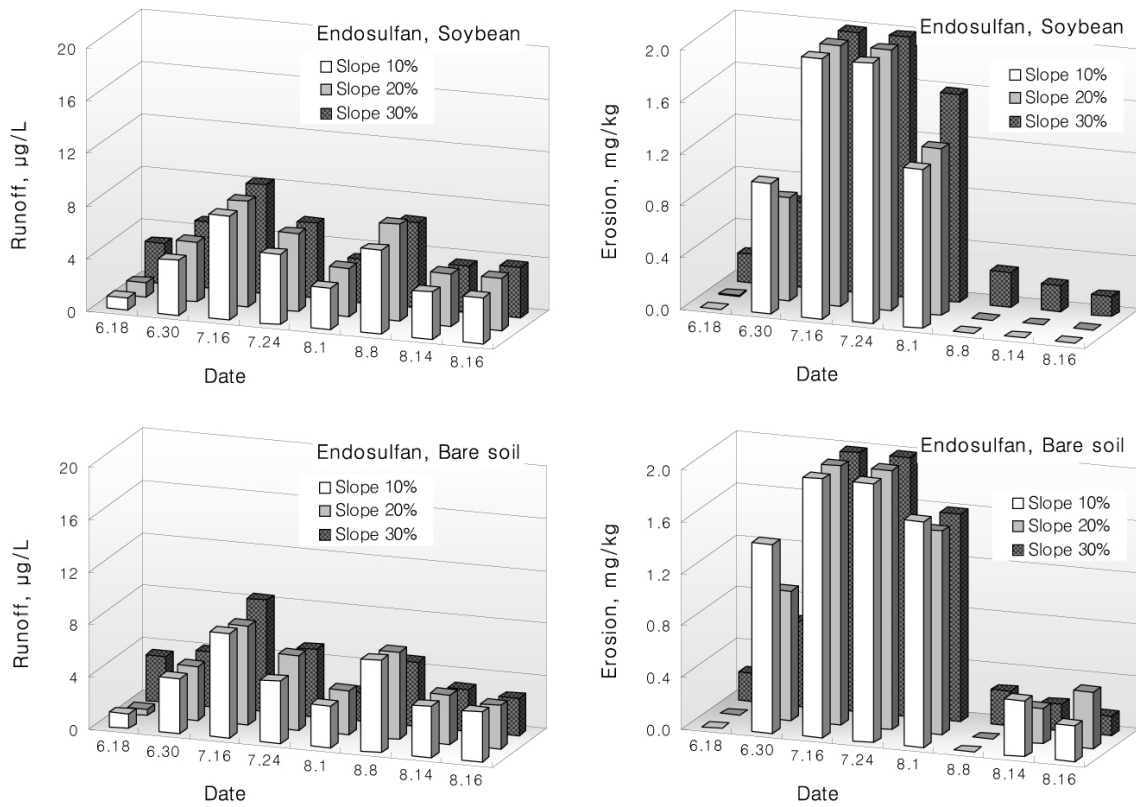


Fig. 3. Concentrations of endosulfan in runoff and on soil eroded from the soybean-grown field lysimeter in the events of rainfall in 2001.

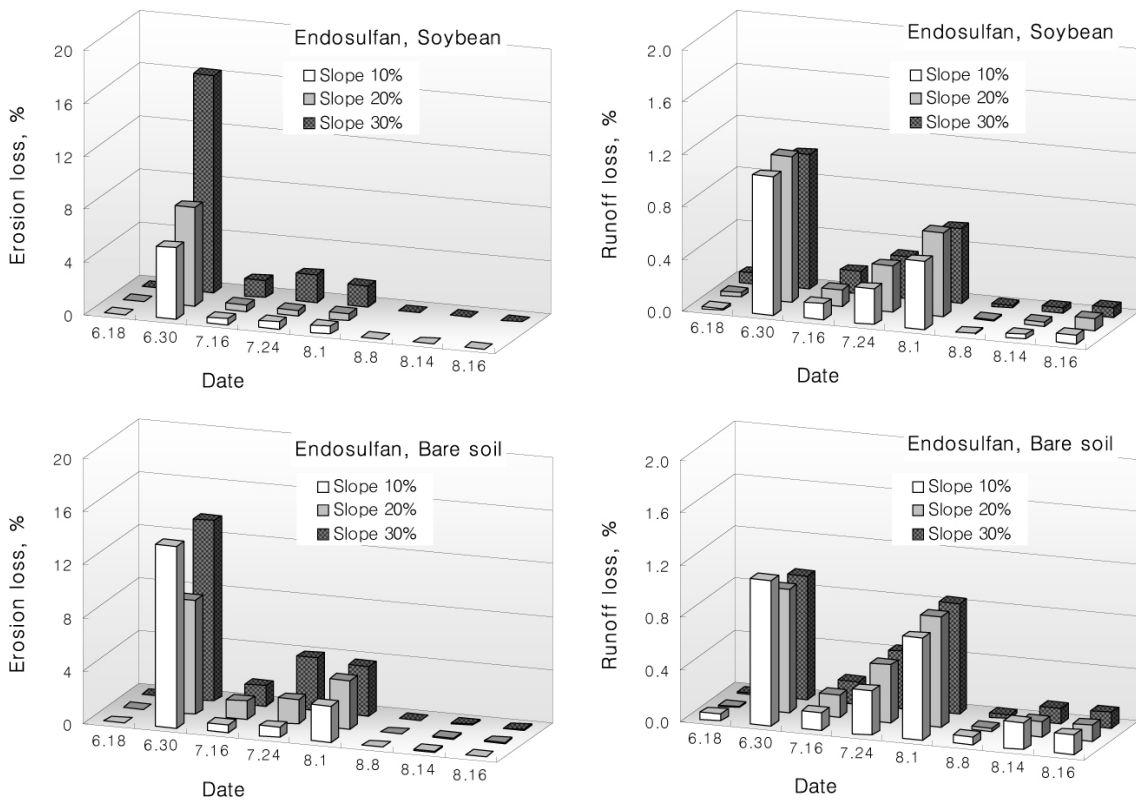


Fig. 4. Losses of endosulfan by runoff and erosion from the soybean field lysimeter in the events of rainfall in 2001.

포장성적이 66% 정도 높게 나타났다.

콩재배구의 유실율은 나지구의 유실율에 비하여 평균적으로 34% 정도 감소된 것으로 나타났다. 경사조건의 영향을 살펴보면 유출수의 경우에는 차이가 크지 않았으나 유실토양에 의한 유실율은 최대 12배 정도까지 증가하는 것으로 나타났다. 경사도가 10%에서 30%로 증가함에 따라 토양유실에 따른 endosulfan의 유실율은 72% 정도 증가하였으며, 경사장도 5 m에서 15 m로 길어짐에 따라 49% 정도 증가하였다.

한편 유출수 중 endosulfan의 최고농도는 콩재배구 및 나지구 각각 $8\sim 10 \mu\text{g L}^{-1}$ 및 $7\sim 9 \mu\text{g L}^{-1}$ 수준으로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 대부분 최초의 유출이 일어날 때 유출수 중 농약의 농도는 최고치를 나타내는데 최초의 유실이 콩의 생육 초기에 일어났기 때문으로 생각된다.

요 약

강우에 의한 경사지 토양으로부터의 농약 유출양상을 파악하고 그에 대한 농약의 특성, 환경적 요인 및 영농방법 등의 영향 정도를 평가하기 위하여 토양흡착실험과 인공강우유출 실험 및 콩 재배 lysimeter 포장에서 유출실험을 수행하였다.

Endosulfan의 흡착법에 의한 흡착계수 (K)는 77~131이었으며, 탈착법에 의한 K값이 흡착법으로 구한 값보다 높았다. 영국 SSLRC의 이동성 분류기준에 의하면 endosulfan은 K_{oc} 4,000을 초과하여 non-mobile 등급에 속하였다.

인공강우 처리구의 유출수 및 유실토양에 의한 endosulfan의 유실율은 3.4~5.6% 및 4.4~15.6%이었다. 인공강우실험 후 토심별 분포를 살펴 본 결과 대부분의 endosulfan 잔류분은 토심 5 cm 이내에 잔류하였다. 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 각 농약의 유실량이 0.6~0.9배 많았는데 유출수에 의한 농약의 유실량 차이는 유출수 중 농도 차이로 볼 수 있으며, 유실토양에 의한 농약 유실량 차이는 토양 유실량과 관계되는 것으로 생각되었다.

Lysimeter 포장유출실험 결과 경사도 및 경사장별 endosulfan 유실량은 살포량 대비 5~35% 수준이었다. 콩재배구의 유실율은 나지구의 유실율에 비하여 평균 66% 수준이었다. 경사조건의 영향을 살펴보면 유출수의 경우에는 그 차이가 크지 않았으나 유실토양에 의한 유실율은 경사도와 경사장 증가에 따라 4~12배까지 증가하는 것으로 나타났다. 한편 유출수 중 농약성분의 최고농도는 콩재배구 및 나지구 각각 $8\sim 10 \mu\text{g L}^{-1}$ 및 $7\sim 9 \mu\text{g L}^{-1}$ 수준으로 작물 재배 여부에 따른 유출수 중 농도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

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. Korea Crop Protection Association. (2007) Agrochemicals year book.
 17. Korea Crop Protection Association. (2007) Agrochemicals use guide book.
 18. 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.
 19. Roberts, T. R. (1996) Assessing the environmental fate of agrochemicals. *J. Environ. Sci. Health.* B31, 325-335.
 20. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537.
 21. Tomlin, C. (ed.) (2003) The pesticide manual (13th ed.). British Crop Protection Council.
 22. OECD. (1993) Test guideline 106 Adsorption/desorption. In *OECD guidelines for testing of chemicals.*
 23. US EPA. (1994) Sediment and adsorption isotherm. In *Code of federal regulation 40 part 790 to end*, 157-161.
 24. Kim, C. S., Ihm, Y. B., Lee, Y. D. and Oh, B. Y. (2006) Runoff and erosion of alachlor, ethalfluralin, ethoprophos and pendimethalin by rainfall simulation. *Korean J. Environ. Agric.* 25(4), 306-315.
 25. US EPA. (2002) Reregistration eligibility decision for endosulfan. US EPA Doc No. 738-R-02-013.
-