

## 인공강우에 의한 alachlor, ethalfluralin, ethoprophos 및 pendimethalin의 토양표면 유출

김찬섭\* · 임양빈 · 이영득<sup>1)</sup> · 오병렬

농촌진흥청 농업과학기술원 농약평가과, <sup>1)</sup>대구대학교 생명환경학부  
(2006년 12월 5일 접수, 2006년 12월 21일 수리)

### Runoff and Erosion of Alachlor, Ethalfluralin, Ethoprophos and Pendimethalin by Rainfall Simulation

Chan-Sub Kim\*, Yang-Bin Ihm, Young-Deuk Lee<sup>1)</sup>, and Byung-Youl Oh (Pesticide Safety Division, National Institute of Agriculture Science and Technology Rural Development Administration, Suwon, 441-707, Korea, <sup>1)</sup>Division of Life and Environmental Science, Daegu University, Kyungsan, 712-714, Korea)

**ABSTRACT:** Two different experiments, adsorption/desorption and runoff by rainfall simulation of four pesticides, such as alachlor, ethalfluralin, ethoprophos and pendimethalin were undertaken their runoff and erosion losses from sloped land and to assess the influence of their properties and environmental factors on them. The mobility of four pesticides and which phase they were transported by were examined in adsorption study, and the influence of rainfall pattern and sloping degree on the pesticide losses were evaluated in simulated rainfall study. Freundlich adsorption parameters (K) by the adsorption and desorption methods were 1.2 and 2.2 for ethoprophos, 1.5 and 2.6 for alachlor, respectively. And adsorption distribution coefficients (Kd) by the adsorption and desorption methods were 56 and 94 for ethalfluralin, and 104 and 189 for pendimethalin, respectively. K or Kd values of pesticides by the desorption method which were desorbed from the soil after thoroughly mixing, were higher than these ones by the adsorption method which pesticides dissolved in water were adsorbed to the soil. Another parameter (1/n), representing the linearity of adsorption, in Freundlich equation for the pesticides tested ranged from 0.96 to 1.02 by the desorption method and from 0.87 to 1.02 by the adsorption method. Therefore, the desorption method was more independent from pesticide concentration in soil solution than the adsorption method. By Soil Survey and Land Research Center (SSLRC)'s classification for pesticide mobility, alachlor and ethoprophos were classified into moderately mobile ( $75 \leq Koc < 500$ ), and ethalfluralin and pendimethalin were included to non-mobile class ( $Koc > 4000$ ). Runoff and erosion loss of pesticides by three rainfall scenarios were from 1.0 to 6.4% and from 0.3 to 1.2% for alachlor, from 1.0 to 2.5% and from 1.7 to 10.1% for ethalfluralin, from 1.3 to 2.9% and from 3.8 to 10.8% for pendimethalin, and from 0.6 to 2.7% and from 0.1 to 0.3% for ethoprophos, respectively. Distribution of pesticides in soil profile were investigated after the simulated rainfall study. Alachlor and ethoprophos were leached to from 10 to 15 cm of soil layer, but ethalfluralin and pendimethalin were mostly remained at the top 5 cm of soil profile. The losses of the pesticides at 30% of sloping degree were from 0.2 to 1.9 times higher than those at 10%. The difference of their runoff loss was related with their concentration in runoff water while the difference of their erosion loss must be closely related with the quantity of soil eroded.

**Key Words:** pesticide, adsorption, runoff, erosion, rainfall simulation, alachlor, ethalfluralin, ethoprophos, pendimethalin

### 서론

\*연락처:

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

수자원의 오염에 대한 관심이 높아짐에 따라 오염물질의 이동과 분해·대사에 대한 연구 및 오염 가능성 여부에 대한 평가 수단으로 오염물질의 환경 중 동태 예측에 관한 모형연구

가 80년대 이후 활발하게 수행되어 왔다<sup>1-4)</sup>. 국내 환경 중 농약의 행적에 관한 연구로는 흡착실험<sup>5-9)</sup>, 토주를 이용한 실내에서의 용탈성 실험<sup>10-13)</sup> 및 lysimeter를 사용한 농약의 이동 및 대사에 대한 연구<sup>14-16)</sup>가 일부 수행되어 미흡하나마 지하수 오염 가능성을 평가할 수 있는 수준에 도달하였다. 그러나 농약에 의한 수계오염의 또 다른 중요한 경로인 표면유출에 대한 연구 결과는 국내의 경우 극소수<sup>17)</sup>에 불과하며, 외국의 경우에도 많은 연구결과로 상당한 정도의 예측이 가능한 용탈성 연구<sup>13,4)</sup>에 비하여 표면유출에 관한 연구는 훨씬 많은 영향인자로 인하여 실험방법, 예측모형 및 평가방법 등이 아직 충분히 정립되지 못한 상태이다<sup>18,19)</sup>. 우리나라의 경우 수도와 시설재배를 제외한 대부분의 밭작물이 경사지에서 재배되며, 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 생각된다.

농약의 표면유출에 대한 영향인자는 농약의 특성, 환경적 요인 및 영농방법에 의한 영향 등으로 크게 나누어 볼 수 있다<sup>20)</sup>. 농약의 특성으로는 흡착성으로 표현되는 이동성<sup>20)</sup>과 토양 및 물 등 환경 중에서의 반감기로 나타낼 수 있는 잔류성<sup>21)</sup>이 있다. 환경적 요인으로는 강우의 시기, 강도 및 강우량을 포함하는 강우 양상과 유출이 일어나는 포장의 경사도, 경사의 길이 및 토양의 투수성 등을 들 수 있으며<sup>17)</sup>, 영농방법에 의한 영향 요인으로는 재배작물의 종류, 경운법 및 비닐 피복 유무 등이 있다.

본 연구에서는 과중 또는 정식시기에 입체형태로 토양에 살포되어 단위면적당 살포량이 희석살포농약보다 많고, 사용시기에 의하여 작물체 피복효과가 적어 농경지 밖으로 유출 가능성이 높은 농약을 대상으로 강우에 의한 유출양상을 파악하고자 하였다. 밭작물용 제초제 alachlor, ethalfuralin 및 pendimethalin과 토양살충제 ethoprophos에 대한 흡착 실험을 수행하여 농약의 이동 가능성과 이동형태를 파악하였고, 강우양상 및 경사도를 달리하여 인공강우를 이용한 유출 실험을 수행하였다.

## 재료 및 방법

시험에 사용된 농약은 시중 농약상에서 구입하였다. 제초제로는 alachlor 5% 입제, ethalfuralin 2.5% 입제 및 pendimethalin 5% 입제를 사용하였고 살충제는 ethoprophos 3% 입제를 사용하였다. 농약의 토양에 대한 흡착성에 크게 영향을 미치는 특성이 물에 대한 용해도는 alachlor 170 mgL<sup>-1</sup>, ethalfuralin 0.3 mgL<sup>-1</sup>, pendimethalin 0.33 mgL<sup>-1</sup>, ethoprophos 700 mgL<sup>-1</sup> 이었다<sup>22)</sup>.

인공강우유출 실험토양으로는 농업과학기술원의 경사지 lysimeter 시험포장(수원시 서둔동 소재)에서 표층 20 cm까지 채취한 토양을 체질이 가능할 정도로 음건한 후 5 mm체를 통

과시켜 사용하였고 흡착실험에는 같은 토양을 충분히 풍건시킨 후 2 mm체를 통과시켜 사용하였다. 실험에 사용된 토양의 토성은 사양토에 해당하였고 유기물 함량은 1.86% 수준이었다.

농약의 분석은 ECD와 NPD가 장착된 HP 5890 Series II 가스크로마토그래프를 사용하였다. 주로 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.

## 흡탈착 실험

수용해도가 높은 alachlor와 ethoprophos는 토양대 용액비를 1대 1로 하여 용액 중 농약농도 0.1~10 mgL<sup>-1</sup> 수준 범위에서 흡착 및 탈착실험을 실시하였다. 수용해도가 1 mgL<sup>-1</sup> 미만으로 낮은 편인 ethalfuralin과 pendimethalin의 경우는 토양대 용액비를 1대 10으로 하여 용액 중 농약농도 0.1 mgL<sup>-1</sup> 단일 수준으로 흡탈착실험을 수행하였다.

토양흡착실험은 일반적으로 사용하는 OECD<sup>23)</sup>와 EPA<sup>24)</sup> 시험기준에 따라 토양에 농약처리용액을 가하고 일정시간 진탕하여 평형에 도달한 후 원심분리하여 상정액을 분석하였고, 탈착실험의 경우는 유기용매에 녹인 농약을 토양에 혼화처리한 후 유기용매가 휘발되도록 일정시간 방치하고 0.01 M CaCl<sub>2</sub> 용액을 가하여 흡착실험 방법과 동일한 과정으로 실험을 진행하였다. 초기처리농도에서 측정된 용액중의 농도를 감하여 토양에 대한 흡착농도를 계산하는 batch 실험법<sup>23,24)</sup>의 단점을 보완하기 위하여 동일한 과정을 거친 별도의 1 mgL<sup>-1</sup> 수준 처리 토양/용액 중 농약을 분석하였다. 이 성적으로 평형 도달시간 중의 분해율을 구하여 토양에 흡착된 농약농도 계산치를 보정하였다<sup>8,9)</sup>.

## 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 kgL<sup>-1</sup>)에 맞추어 토양을 다져서 전체 높이가 20 cm가 되도록 채웠다. 수조를 이용하여 하단부로부터 물을 채워 토양표면까지 포화시킨 후 토양이 안정화 되도록 실외에 방치하였다.

실험 직전에 토양 표면을 잘 고른 후 농약을 토양 표면에 가능한 고르게 살포하였다. 시험구당 농약 살포량은 제초제의 경우 alachlor 5% 입제 0.9 g, ethalfuralin 2.5% 입제 1.2 g 및 pendimethalin 5% 입제 0.9 g이었고, 살충제 ethoprophos 3% 입제는 2.7 g으로 밭작물의 표준사용량 수준이었다.

실험에 사용한 인공강우 장치는 일본 Daiki사에서 제작한 DIK-6000 모델이었으며, 지상 2.3 m의 높이에 설치된 8 열

의 수도관에 부착된 needle을 통하여 인공강우가 형성되며, 수압조절과 needle 진동정도를 제어할 수 있었다. 강우조건은 강우강도 및 지속시간에 따른 영향을 평가하기 위하여 3 수준의 처리를 두었다. 5월부터 10월 사이의 강우 양상을 고려하여 세우조건으로 3 mmhr<sup>-1</sup>에서 10시간 강우, 호우조건으로 20 mmhr<sup>-1</sup>에서 10시간 강우 및 폭우조건으로 50 mmhr<sup>-1</sup>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 mmhr<sup>-1</sup>의 강우가 10시간 지속되고 9일 경과 후에 50 mmhr<sup>-1</sup>의 강도로 2시간 비가 오고 다시 4주 후에 50 mmhr<sup>-1</sup>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 mmhr<sup>-1</sup>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 mmhr<sup>-1</sup>×2시간)가 2 차례 오는 경우를 가상하였다. 또한 농약간의 유출 양상을 상대적으로 비교하기 위하여 강우 시나리오에서 2, 3차 강우를 폭우로 처리하였으며, 표면유출의 영향인자 중 포장 경사도의 영향을 평가하기 위하여 경사도 10%와 30%의 처리구를 두었다.

**결과 및 고찰**

**토양흡착성**

**흡착반응 속도**

Alachlor, ethafluralin, ethoprophos 및 pendimethalin

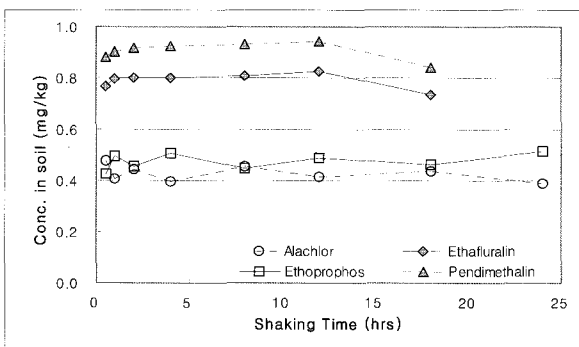


Fig. 1. Changes of concentration of alachlor, ethafluralin, ethoprophos and pendimethalin adsorbed to soil with shaking time.

의 실험토양에 대한 흡착반응 평형시간을 정하기 위하여 반응시간별 토양용액 중 농도를 측정된 결과는 Fig. 1과 같았다. 반응 초기 5~8시간까지는 용액 중의 농도의 변이가 상당히 나타났으나, 반응 12시간 후부터는 반응시간별 용액 중의 농도 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 흡착반응계의 12시간 후 물/토양계 전체 회수율과 24시간 후 용액 중 회수율은 alachlor의 경우 동일하게 90.4%이었고, ethoprophos의 경우는 각각 94.6%와 87.8%이었다. 회수율 결과에 의하면 ethoprophos의 경우에는 반응시간이 증가함에 따라 흡착반응계에서의 농약소실이 커질 것으로 판단되어 두 농약의 흡착반응시간을 12시간으로 결정하였다.

수용해도가 낮은 ethafluralin 및 pendimethalin은 반응 초기 2시간까지는 용액 중의 농도가 급격하게 줄어들어 토양 흡착량이 증가하는 것으로 나타났으나 그 후로는 흡착량의 증가가 매우 완만한 것으로 나타났고, 반응 12시간 후부터는 반응시간별 용액 중의 농도가 상당히 줄어드는 것으로 나타났다. 흡착반응계 전체의 12시간 반응 후와 24시간 반응 후 회수율은 ethafluralin의 경우 각각 98.3%와 86.0%, pendimethalin의 경우는 각각 104.8%와 92.7%이었다. 따라서 12시간 경과 후에는 농약의 소실이 상당한 속도로 진행되는 것으로 판단하였다. 반응시간이 증가함에 따라 흡착분배계수는 18시간까지 계속 증가하는 것으로 나타났으나, 흡착농도로 표현되는 토양에 의한 흡착량은 12~18시간에 최고에 도달하였다. 따라서 경시적 약제분해를 증가경향을 고려하여 반응시간을 12시간으로 결정하였다.

**흡착계수**

수용해도가 상대적으로 높은 편인 alachlor와 ethoprophos의 실험토양에 대한 25°C에서의 등온흡착 결과를 Fig. 2와 Fig. 3으로 나타내었다. 흡착방법과 탈착방법에 의하여 구한 두 농약의 흡착반응 결과는 모두 Freundlich 등온흡착식에 잘 부합되는 것으로 나타났다. 각 농약의 흡착방법과 탈착방법에 의한 Freundlich 흡착계수를 살펴보면, alachlor의 흡착계수 K는 각각 1.5와 2.6이었고, ethoprophos의 경우는

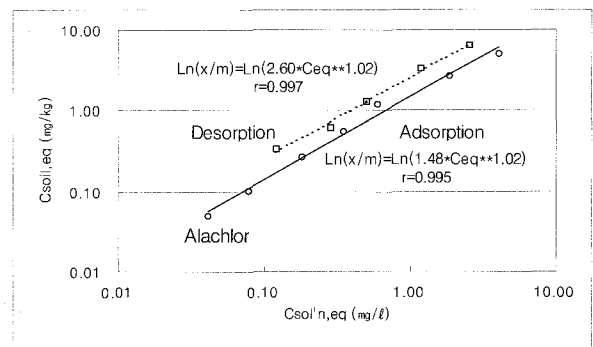


Fig. 2. Freundlich adsorption isotherms of alachlor at 25°C in the soil used in runoff study by two sorption methods.

각각 1.2와 2.2로 나타났다. 농약을 토양에 혼화처리한 후 탈착시키는 방법이 일반적인 흡착실험 방법인 용액에 존재하는 농약을 토양에 흡착시키는 방법보다 높은 흡착계수 값을 나타내었는데, 그 차이를 탈착방법에 의한 흡착계수( $K_{des}$ )/흡착방법에 의한 흡착계수( $K_{ads}$ )의 비( $K_{des}/K_{ads}$ )로 나타내면 ethoprophos 1.93과 alachlor 1.76이었으며 수용해도 순서와 일치하였다.

Freundlich 등온흡착식의 두 상수 중 나머지 하나로 흡착 반응의 직선성을 나타내는  $1/n$  값은 흡착방법과 탈착방법에 따라 alachlor의 경우는 모두 1.02이었고, ethoprophos의 경우는 각각 0.87과 0.96으로 나타났다. 흡착식의  $1/n$  값이 1에 근접한다는 것은 흡착반응 양상이 실험농도 범위 내에서 용액 중의 물질농도에 독립적이라는 것을 의미한다. 따라서 탈착방법의  $1/n$  값의 범위가 0.96~1.02로 흡착방법의  $1/n$  값의 범위 0.87~1.02보다 1에 근접하므로 탈착방법으로 구한 흡착계수 값이 흡착방법으로 구한 흡착계수보다 농약의 농도에 의하여 영향을 덜 받을 것으로 생각되었다. 그래서 흡착 반응의 농도의존성을 나타내는 처리농도별 흡착분배계수의 최저값에 대한 최고값의 비( $K_{max}/min$ )는 ethoprophos 2.07 및 alachlor 1.67이었고, 탈착방법의 농도의존성( $K_{max}/min$ )은 ethoprophos 1.23 및 alachlor 1.28로 나타나 탈착방법에 의한 흡착계수 측정방법이 물질의 처리농도에 의한 영향을 적게 받는 것으로 확인되었다.

한편 낮은 수용해도로 인하여 단일농도로 처리하여 실험한

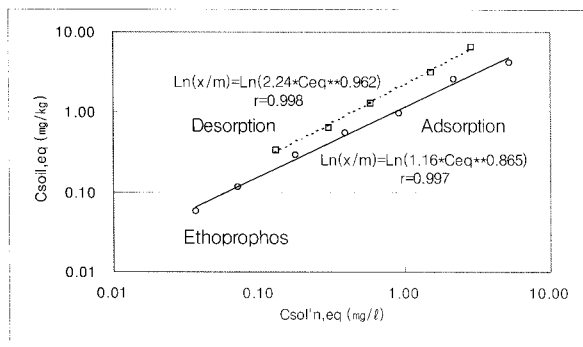


Fig. 3. Freundlich adsorption isotherms of ethoprophos at 25°C in the soil used in runoff study by two sorption methods.

ethalfuralin 및 pendimethalin의 흡착계수 측정방법 의존성을  $K_{des}/K_{ads}$  값으로 평가하면 ethalfuralin과 pendimethalin은 각각 1.68과 1.82로 나타나 실험방법의 영향이 큰 것으로 평가되었으며, 흡착현상의 해석을 위한 충분한 고찰이나 추가 실험이 필요할 것으로 판단되었다.

실험농약의 토양에 대한 흡착성 수준을 평가하기 위하여 처리농도 수준별 흡착분배계수의 평균값을 유기탄소기준 흡착분배계수( $K_{oc}$ )로 환산하여 Table 1에 나타내었다. 영국 Soil Survey and Land Research Center(SSLRC)의 이동성 분류기준<sup>21)</sup>으로 판단하면 alachlor와 ethoprophos는 moderately mobile( $75 \leq K_{oc} < 500$ ) 등급에 해당하였으며, ethalfuralin과 pendimethalin은  $K_{oc}$  4000을 초과하여 non-mobile 등급으로 나타났다. McCall 등<sup>20)</sup>의 이동성 범위를 적용하면 alachlor와 ethoprophos는 흡착방법에 의한 경우는 high mobility( $K_{oc}$  30~150) 등급에 속하고 탈착방법의 경우는 medium mobility( $K_{oc}$  150~500) 등급으로 분류되었으며, ethalfuralin 및 pendimethalin은 가장 이동성이 적은 immobile( $K_{oc} > 5000$ ) 등급에 해당하였다.

### 인공강우에 의한 농약의 표면유출

#### Alachlor

각각의 경우 시나리오별 인공강우 처리구 중 alachlor는 유출수와 유실토양에 의하여 총처리량의 1.0~6.4%와 0.3~1.2%가 유실되었으며, 평균값으로 비교하면 유출수에 의한 유실이 약 6 배 정도 높은 것으로 나타나 수용해도가 크고 흡착성이 적은 약제의 특성이 잘 반영된 것으로 판단되었다. 강우시기 별로 살펴보면 200 mm에 해당하는 인공강우를 살포한 경우가 1차 강우 7일 후에 100 mm의 강우가 온 경우에 비하여 농약 유실량이 훨씬 적은 것으로 나타나 포장 lysimeter 유출<sup>25)</sup>과는 다른 양상을 보였다. 실험에 사용된 농약이 대부분 입제인 까닭에 살포 직후의 1차 강우시에는 용출되는 과정과 토양에 흡착되는 과정이 동시에 진행되었을 것이고, 강우 강도의 차이에 의하여 유출수량은 오히려 1차 강우의 경우가 2차 강우시의 40% 수준이었으며, 토양 유실량은 1/13 정도에 불과하였기 때문인 것으로 볼 수 있을 것이다. 이러한 추측은 1차 강우에 유출이 일어나지 않았던 시나리오 3의 경우 2차 강우 유출량이 3차 강우 유출량의 2~5 배 정도로 나타난 결과

Table 1. Adsorption and desorption coefficients of the pesticides used on the soil

Pesticide	Initial conc. in solution (mgkg <sup>-1</sup> )	Adsorption		Desorption	
		Kd	Koc	Kd	Koc
Alachlor	0.1~10	1.2~2.0 (1.5) <sup>1)</sup>	140	2.2~2.8 (2.6)	240
Ethalfuralin	0.1	56	5200	94	8700
Pendimethalin	0.1	104	9600	189	17500
Ethoprophos	0.1~10	0.8~1.7 (1.2)	110	2.1~2.6 (2.2)	200

<sup>1)</sup>A Value in parenthesis is average.

와 일치하는 것으로 볼 수 있을 것이다. 농약 살포 후 30 mm의 1차 강우로 입제 중의 농약 성분이 충분히 용출되어 토양에 흡착된 후 2회와 3회 강우에 의하여 유출이 일어났을 것으로 생각되며, 이것은 실제 포장에서의 강우 양상과 잘 일치한다고 볼 수 있을 것이다.

토양 중 수직이동이 표면유출에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3차 강우 후 농약의 잔류량과 토심별 분포를 살펴 본 결과 전체 잔류량은 처리량 대비 6.0~12.9%이었다. 토심별로는 표층에서 토심 5 cm 범위 내에 3.9-8.9%, 토심 5-10 cm 부분에는 0.4~3.9%가 잔류하였으며, 시나리오 1과 2의 경우에는 토심 10~15 cm 까지 이동한 것으로 나타났다.

유실에 대한 경사도의 영향을 살펴보면 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.3~1.9 배 증가하였는데, 유출수에 의한 유실분은 경사도별 유출수량의 차이가 크지 않았던 점을 감안하면 유출수중 농도의 차이로 볼 수 있으며, 유실토양에 의한 유실분은 경사도별 토양 유실량에 비례하는 것으로 생각되었다(Table 2).

Ethalfuralin

강우 시나리오별 각 인공강우 처리구의 ethalfuralin 유

실은 유출수에 의한 부분이 처리량의 1.0~2.5% 수준이었고 유실토양에 의한 부분이 1.7~10.1% 수준이었으며, 평균값으로 비교하면 유실토양에 의한 기여도가 2 배 정도 높은 것으로 나타나 수용해도가 적고 흡착성이 큰 약제의 특성이 잘 반영된 것으로 판단되었다. 강우시기별로 살펴보면 alachlor의 경우와 마찬가지로 200 mm에 해당하는 인공강우를 살포한 경우가 1차 강우 7일 후에 100 mm의 강우가 온 경우에 비하여 농약 유실량이 훨씬 적은 것으로 나타났다. 그러나 1차 강우에 유출이 일어나지 않았던 시나리오 3의 경우 alachlor와는 달리 3차 강우 유출량이 2차 강우 유출량보다 약간 많았던 것은 수용해도가 낮은 ethalfuralin의 특성으로 1차 강우시에 농약 성분이 충분히 용출되어 토양에 확산되지 못하였거나 2차 강우에 비하여 3차 강우의 토양 유실량이 60~120% 정도 많았기 때문일 것으로 생각된다.

토양 중 수직이동이 표면유출에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3차 강우 후 농약의 잔류량과 토심별 분포를 살펴 본 결과 전체 잔류량은 처리량 대비 10~30%이었다. 토심별로는 표층에서 토심 5 cm 범위에 대부분이 분포하였고, 토심 5~10 cm 부분에는 0.1~0.6%가 잔류하였으며, 일부 실험 조건에서는 토심 10~15 cm 까지 0.2% 수준 정도가 이동한

Table 2. Losses of alachlor through runoff and erosion from soil surface by rainfall simulation and its residue distribution in soil profile after the third rainfall event

Rainfall scenario	Slope (%)	Loss by rainfall			Residue in soil		
		Event	Runoff (%)	Erosion (%)	Depth (cm)	Residue (%)	
Scenario I	10	Total	3.94	0.28	Total	11.8	
		1st	1.31	0.04	0~5	8.4	
		2nd	2.42	0.22	5~10	3.0	
		3rd	0.21	0.02	10~15	0.4	
		Total	4.81	0.60	Total	6.2	
		1st	1.84	0.04	0~5	3.9	
	30	2nd	2.62	0.48	5~10	1.4	
		3rd	0.35	0.08	10~15	0.8	
		Total	3.90	0.38	Total	12.9	
		10	1st	1.25	0.05	0~5	8.6
			2nd	2.41	0.32	5~10	3.9
			3rd	0.24	0.02	10~15	0.4
Scenario II	30	Total	6.37	1.23	Total	6.5	
		1st	1.98	0.38	0~5	4.6	
		2nd	4.01	0.75	5~10	1.5	
	3rd	0.38	0.11	10~15	0.4		
	Scenario III	10	Total	1.04	0.26	Total	9.3
			1st	-	-	0~5	8.9
2nd			0.69	0.17	5~10	0.5	
3rd		0.36	0.10	10~15	-		
30		Total	3.14	0.68	Total	6.0	
		1st	-	-	0~5	5.6	
	2nd	2.64	0.50	5~10	0.4		
	3rd	0.50	0.18	10~15	-		
Scenario total	Range	Total	1.04~6.37	0.26~1.23	Total	6.0~12.9	
	Average	Total	3.87	0.54	Total	8.8	

것으로 나타났다.

유실에 대한 경사도의 영향을 살펴보면 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.9~1.3배 증가하였는데, 유출수에 의한 유실분은 경사도별 유출수량의 차이가 크지 않았던 점을 감안하면 유출수중 농도의 차이로 볼 수 있으며, 유실토양에 의한 유실분은 경사도별 토양 유실량이 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 1.3~3.4배 증가한 것으로 보아 유실토양 중 농도보다는 토양유실량에 의하여 결정되는 것으로 생각되었다(Table3).

**Pendimethalin**

강우 시나리오별 각 인공강우 처리구의 pendimethalin 유실은 유출수에 의한 부분이 처리량의 1.3~2.9% 수준이었고 유실토양에 의한 부분이 3.8~10.8% 수준이었으며, 평균값으로 비교하면 유실토양에 의한 기여도가 2 배 정도 높은 것으로 나타나 ethalfluralin의 경우와 같이 수용해도가 적고 흡착성이 큰 약제의 특성이 잘 반영된 것으로 판단되었다. 강우 시기별로 살펴보면 alachlor, metolachlor 및 ethalfluralin의 경우와 같이 200 mm의 인공강우가 살포된 1차 강우의

농약 유실량이 2차와 3차 강우의 유실량에 비하여 훨씬 적었다. 그러나 다른 농약과 달리 pendimethalin은 3차 강우 유실량도 상당하여 강우 시나리오 1과 2의 경우 2차 강우 유실량의 41~69% 수준에 달하였으며, 1차 강우에 유출이 일어나지 않았던 강우 시나리오 3의 경우에는 3차 강우 유실량이 2차 강우 유실량 보다 51~90% 정도 많은 것으로 나타났다.

토양 중 수직이동이 표면유출에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3차 강우 후 농약의 잔류량과 토심별 분포를 살펴 본 결과 전체 잔류량은 처리량 대비 15~37%이었다. 토심별로는 표층에서 토심 5 cm 범위 내에 전량이 분포하여 그 이하에서는 전혀 검출되지 않았다. 강우 시나리오 및 경사도별 잔류율을 살펴보면 경사도가 클수록 유실량의 증가에 따라 잔류량이 적어지고 강우직전의 토양수분 상태에 영향을 받아 토양이 건조한 경우에 그 정도가 심하여지는 경향이었으나 유실량과 잔류량의 관계는 정량적으로 일치하지는 않았다. 강우 시나리오 3의 경우는 경사도 10%구와 30%구의 유실율은 각각 5.1%와 6.6%로 큰 차이가 없었으며, 잔류율도 각각 15.3% 및 21.5%로 강우 시나리오 1과 2와는 달리 경사도가 큰 경우에 잔류율이 약간 높게 나타난 것은 약제 살포 후 초기 강우

**Table 3. Losses of ethalfluralin through runoff and erosion from soil surface by rainfall simulation and its residue distribution in soil profile after the third rainfall event**

Rainfall scenario	Slope (%)	Loss by rainfall			Residue in soil		
		Event	Runoff (%)	Erosion (%)	Depth (cm)	Residue (%)	
Scenario I	10	Total	1.68	3.23	Total	21.5	
		1st	0.24	0.48	0~5	21.2	
		2nd	0.53	2.45	5~10	0.2	
		3rd	0.91	0.30	10~15	-	
	30	Total	1.79	7.31	Total	21.2	
		1st	0.24	0.54	0~5	20.5	
		2nd	0.53	5.31	5~10	0.5	
		3rd	1.02	1.45	10~15	0.2	
	Scenario II	10	Total	1.72	3.73	Total	29.6
			1st	0.15	0.32	0~5	28.8
			2nd	0.84	3.20	5~10	0.6
			3rd	0.74	0.21	10~15	0.2
30		Total	2.45	10.19	Total	10.1	
		1st	0.21	1.14	0~5	10.1	
		2nd	0.96	7.39	5~10	-	
		3rd	1.28	1.67	10~15	-	
Scenario III		10	Total	0.95	1.69	Total	20.8
			1st	-	-	0~5	20.7
			2nd	0.10	1.09	5~10	0.1
			3rd	0.85	0.59	10~15	-
	30	Total	1.61	3.43	Total	10.4	
		1st	-	-	0~5	10.2	
		2nd	0.39	1.94	5~10	0.1	
		3rd	1.22	1.48	10~15	-	
	Scenario total	Range	Total	0.95~2.45	1.69~10.19	Total	10.1~29.6
		Average	Total	1.70	4.93	Total	18.9

의 양상에 의하여 전체적인 유실 및 잔류량 및 지형적 영향의 정도가 크게 달라질 수 있음을 의미하는 것으로 판단되었다.

유실에 대한 경사도의 영향을 살펴보면 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.3~1.1 배 증가하였는데, 유출수에 의한 유실분은 경사도별로 차이가 거의 없었으며, 유실토양에 의한 유실분은 경사도별 토양 유실량이 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 0.3~1.9 배 증가한 것은 경사도 30%구의 유실토양 중 농도가 경사도 10%구의 유실토양 중 농도보다 낮지만 1.3~3.4 배 많은 토양유실량에 의한 것으로 생각되었다(Table 4).

### Ethoprophos

강우 시나리오별 ethoprophos 유실은 유출수에 의한 부분이 처리량의 0.6~2.7% 수준이었고 유실토양에 의한 부분이 0.1~0.3% 수준이었으며, 평균값으로 비교하면 유출수에 의한 기여도가 6.5 배 정도 높은 것으로 나타나 alachlor의 경우와 마찬가지로 수용해도가 크고 흡착성이 적은 약제의 특성을 잘 나타내었다. 그리고 alachlor, ethalfluralin 및 pendime-

thalin 과는 달리 ethoprophos의 1차 유실량이 2차 유실량에 비하여 대등하게 나타났는데 이는 ethoprophos의 토양 중에서의 빠른 분해속도로 인하여 2차 유실이 일어난 시기에 토양 중 잔류량이 상당히 줄어들었고 그로 인하여 1차 유출수에 비하여 2차 유출수의 양이 2.6~4.4 배 늘었지만 유출수 중 ethoprophos의 농도가 감소하여 유출수 증가 정도를 상쇄하였기 때문으로 생각된다.

토심별로는 강우 시나리오 1과 2의 경우 잔류량의 대부분이 표층에서 토심 15 cm 범위 내에 고르게 분포하여 토심 15 cm 이하로의 용탈도 일어났을 것으로 생각되며, 강우 시나리오 3의 경우에도 잔류 ethoprophos의 대부분은 표토와 토심 5 cm 사이에 분포하였으나 토심 10~15 cm 부분까지도 이동한 것으로 나타났다.

유실에 대한 경사도의 영향을 살펴보면 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.2~0.9 배 증가하여 alachlor의 경우와 유사한 것으로 판단되었는데 1차 강우의 유출수량의 차이에 의하여 결정된 것으로 생각된다(Table 5).

**Table 4. Losses of pendimethalin through runoff and erosion from soil surface by rainfall simulation and its residue distribution in soil profile after the third rainfall event**

Rainfall scenario	Slope (%)	Loss by rainfall			Residue in soil		
		Event	Runoff (%)	Erosion (%)	Depth (cm)	Residue (%)	
Scenario I	10	Total	2.03	4.67	Total	25.5	
		1st	0.28	0.45	0~5	25.5	
		2nd	0.54	3.31	5~10	-	
		3rd	1.22	0.91	10~15	-	
	30	Total	1.99	8.94	Total	20.0	
		1st	0.41	0.48	0~5	20.0	
		2nd	0.53	5.40	5~10	-	
		3rd	1.05	3.06	10~15	-	
	Scenario II	10	Total	2.80	3.77	Total	36.9
			1st	0.33	0.28	0~5	36.9
			2nd	1.36	2.87	5~10	-
			3rd	1.11	0.63	10~15	-
30		Total	2.90	10.81	Total	16.9	
		1st	0.37	1.22	0~5	16.9	
		2nd	1.35	6.79	5~10	-	
		3rd	1.18	2.80	10~15	-	
Scenario III		10	Total	1.32	3.80	Total	15.3
			1st	-	-	0~5	15.3
			2nd	0.16	1.31	5~10	-
			3rd	1.16	2.49	10~15	-
	30	Total	1.54	5.05	Total	21.5	
		1st	-	-	0~5	21.5	
		2nd	0.35	2.01	5~10	-	
		3rd	1.19	3.04	10~15	-	
	Scenario total	Range	Total	1.32~2.90	3.80~10.81	Total	15.3~36.9
		Average	Total	2.10	6.17	Total	22.7

**Table 5. Losses of ethoprophos through runoff and erosion from soil surface by rainfall simulation and its residue distribution in soil profile after the third rainfall event**

Rainfall scenario	Slope (%)	Loss by rainfall			Residue in soil	
		Event	Runoff (%)	Erosion (%)	Depth (cm)	Residue (%)
Scenario I	10	Total	1.51	0.09	Total	2.8
		1st	0.79	0.01	0~5	1.1
		2nd	0.70	0.07	5~10	1.3
		3rd	0.02	0.01	10~15	0.4
	30	Total	1.61	0.30	Total	3.7
		1st	0.97	0.02	0~5	1.1
		2nd	0.61	0.23	5~10	1.2
		3rd	0.03	0.05	10~15	1.4
Scenario II	10	Total	1.90	0.15	Total	5.3
		1st	0.89	0.02	0~5	1.3
		2nd	0.61	0.12	5~10	2.1
		3rd	0.03	0.01	10~15	1.9
	30	Total	2.73	0.32	Total	4.3
		1st	1.28	0.07	0~5	1.2
		2nd	0.90	0.24	5~10	1.9
		3rd	0.04	0.02	10~15	1.2
Scenario III	10	Total	0.60	0.12	Total	2.6
		1st	-	-	0~5	2.2
		2nd	0.56	0.08	5~10	0.3
		3rd	0.04	0.04	10~15	0.1
	30	Total	1.10	0.25	Total	2.2
		1st	-	-	0~5	1.8
		2nd	1.07	0.17	5~10	0.2
		3rd	0.03	0.08	10~15	0.1
Scenario total	Range	Total	0.60~2.73	0.09~0.32	Total	2.2~5.3
	Average	Total	1.58	0.21	Total	3.5

**요 약**

강우에 의한 경사지 토양으로부터의 농약 유출양상을 파악하고 그에 대한 농약의 특성, 환경적 요인 및 영농방법 등의 영향 정도를 평가하기 위하여 토양흡착실험과 인공강우유출실험을 수행하였다. 흡착실험을 수행하여 농약의 이동 가능성과 이동형태를 파악하고 인공강우시설을 이용한 유출실험으로 강우양상 및 경사도의 영향 정도를 파악하여 농약의 표면유출에 의한 유실 수준을 평가하고자 하였다.

각 농약의 Freundlich 흡착계수 K는 ethoprophos 1.2~2.2, alachlor 1.5~2.6, ethalfluralin 56~94 및 pendimethalin 104~189 순이었다. 일반적인 흡착실험 방법인 용액에 존재하는 농약을 토양에 흡착시키는 방법보다 농약을 토양에 혼화처리한 후 탈착시키는 방법에서 흡착계수 값이 높았고, Freundlich 등온흡착식의 직선성을 나타내는 1/n 값은 탈착방법의 경우 0.96~1.02이었고 흡착방법의 경우는 0.87~1.02로 나타나 탈착방법에 의한 흡착계수 측정방법이 물질의 처리농도에 의하여 영향을 적게 받는 것으로 확인되었다. 영

국 SSLRC의 이동성 분류기준으로 판단하면 alachlor와 ethoprophos는 moderately mobile(75≤Koc<500) 등급에 해당하였으며, ethalfluralin 및 pendimethalin은 Koc 4000을 초과하여 non-mobile 등급에 속하였다.

인공강우 처리구의 유출수 및 유실토양에 의한 농약 유실율은 각각 alachlor 1.0~6.4% 및 0.3~1.2%, ethalfluralin 1.0~2.5% 및 1.7~10.1%, pendimethalin 1.3~2.9% 및 3.8~10.8%, ethoprophos 0.6~2.7% 및 0.1~0.3%이었다. 인공강우실험 후 농약의 토심별 분포를 살펴 본 결과 alachlor와 ethoprophos는 토심 10~15 cm까지 이동하였고, ethalfluralin과 pendimethalin는 대부분 토심 5 cm 이내에 잔류하였다. 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 각 농약의 유실량이 0.2~1.9 배 증가하였는데 유출수에 의한 농약의 유실량 차이는 유출수 중 농도 차이로 판단되며, 유실토양에 의한 농약 유실량 차이는 토양 유실량과 관계되는 것으로 생각되었다.

농약의 강우에 의한 유실은 복잡하게 작용하는 많은 환경적 요인에 의하여 영향을 받지만 정교하게 구성된 환경 시나리오에 의하여 예측 가능할 것으로 판단되었다.



## 참고문헌

1. 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.
2. Gustafson, D. I. (1989) Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability. *Environ. Toxicol. Chem.* 8, 339-357.
3. 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.
4. 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.
5. Kim, K. and Kim, Y. H. (1990) Adsorption of butachlor on soils. *Korean J. Environ. Agric.* 9(2), 105-111.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Lee, J. K. and Oh, K. S. (1993) Leaching behaviour of the residues of carbofuran, bentazon and TCAB in soil. *Korean J. Environ. Agric.* 12(1), 9-17.
11. Kim, J. H. (1996) Leaching of trifluralin in the commerce clay loam soil. *Korean J. Environ. Agric.* 15(4), 464-471.
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. Lee, J. K., Fuehr, F. and Kyung, K. S. (1994) Behaviour of carbofuran in rice plant-grown lysimeter throughout four growing seasons. *Chemosphere* 29, 747-758.
15. Lee, J. K., Fuehr, F. and Kyung, K. S. (1996) Fate of the herbicide bentazone in rice plant-grown lysimeters over four consecutive cultivation years. *J. Environ. Sci. Health B31*, 179-201.
16. Kyung, K. S., Suh, Y. T. and Lee, J. K. (1997) Behaviour of the herbicide quinclorac in rice plant-grown lysimeter. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 68, 187-198.
17. Kim, K. (1997) Studies on pesticide runoff from soil surface by rainfall, Ph. D. Thesis, Seoul National University.
18. 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.
19. FOCUS. (2004) FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC, pp 294.
20. 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.
21. Roberts, T. R. (1996) Assessing the environmental fate of agrochemicals. *J. Environ. Sci. Health.* B31, 325-335.
22. Tomlin, C. (ed.) (2003) The pesticide manual (13th ed.), British Crop Protection Council.
23. OECD (1993) Test guideline 106 Adsorption/desorption. In *OECD guidelines for testing of chemicals*.
24. US EPA. 1994. Sediment and adsorption isotherm.

- 
- In Code of federal regulation 40 part 790 to end, 157-161.*
25. Kim, C. S., Lee, H. D., Oh, B. Y. and Lee, Y. D. (2006) Runoff and erosion of alachlor, ethalfluralin, ethoprophos and pendimethalin from soybean field lysimeter. *Korean J. Environ. Agric.* 25(4), (in press).
-