

인공강우와 콩재배 포장 라이시메타를 이용한 diazinon과 metolachlor의 유출량 평가

김찬섭* · 이병무 · 박병준 · 정필균 · 최주현 · 류갑희

농촌진흥청 농업과학기술원

요약 : 강우에 의한 경사지 토양으로부터의 농약 유출양상을 파악하고 그에 대한 환경적 요인 및 영농방법 등의 영향 정도를 평가하기 위하여 토양흡착실험과 인공강우유출실험 및 콩 재배 lysimeter 포장에서 유출 실험을 수행하였다. 흡착실험을 수행하여 농약의 이동 가능성과 이동형태를 파악하고, 인공강우시설을 이용한 유출실험으로 강우양상 및 경사도의 영향 정도를 살펴보고, 콩 재배 경사지 포장에 설치된 lysimeter 실험을 수행하여 작물 재배에 따른 농약의 유실 양상 차이를 파악하여 농약의 표면유출에 의한 유실 수준을 평가하고자 하였다. 두 농약의 Freundlich 흡착계수 K는 diazinon은 4.0~5.5이었고 metolachlor는 1.6~2.0이었다. Freundlich 등온흡착식의 직선성을 나타내는 $1/n$ 값은 탈착방법의 경우 0.96~1.02이었고 흡착방법의 경우는 0.87~1.02이었다. 영국 SSLRC의 이동성 분류기준으로 판단하면 diazinon과 metolachlor는 moderately mobile ($75 \leq Koc < 500$) 등급에 해당하였다. 인공강우 처리구의 유출수 및 유실토양에 의한 농약 유실률은 각각 diazinon 0.1~0.6% 및 0.1~0.2%, metolachlor 0.5~1.0% 및 0.1~0.7% 이었고, 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 농약 유실량이 0.2~1.9 배 많았다. 인공강우실험 후 농약의 토심별 분포를 살펴 본 결과 diazinon은 토심 5~10 cm까지 이동하였고 metolachlor는 토심 10~15 cm까지 이동하였다. Lysimeter 포장유출실험 결과 경사도 및 경사장별 나지구의 유실량은 diazinon 0.23~0.50%, metolachlor 1.0~3.1% 수준이었으며, 인공강우실험의 유실률에 비하여 1/3~2.5 배 수준으로 나타났다. 콩재배구의 유실률은 나지구의 유실률에 비하여 평균적으로 21~75% 정도 감소된 것으로 나타났다. 유출수 중 농약성분의 최고농도는 콩재배구 및 나지구 각각 diazinon $1 \sim 9 \mu\text{g L}^{-1}$ 및 $3 \sim 16 \mu\text{g L}^{-1}$, metolachlor $7 \sim 31 \mu\text{g L}^{-1}$ 및 $5 \sim 40 \mu\text{g L}^{-1}$ 수준으로 작물 재배 여부에 따른 유출수 중 농도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. (2006년 11월 23일 접수, 2006년 12월 23일 수리)

Key words : 유출, 유실, 흡착, diazinon, metolachlor

서 론

농약의 토양이나 수계에의 도달은 농약의 살포과정 중 토양으로의 직접 투하, 비산 또는 작물에 부착되었던 농약이 강우나 이슬 등에 의하여 씻겨 내림에 의하여 시작 된다(Leonard, 1990; 김 등, 2005a). 이렇게 토양에 도달한 농약은 다양한 분해·대사과정을 겪게 되며, 토양입자에 흡착되거나 토양수에 용해된 형태로 존재하게 된다(Jury 등, 1987; Leonard, 1990; Boesten과 Linden, 1991). 토양에 잔류하는 농약은 물의 흐름에 따라 용탈되어 지하수를 오염시킬 수도 있고(Gustafson, 1989; Jarvis 등, 1997) 강우의 강도가 심하여 강수량이 토양의 침투능력을 초과하는 경우에는 토양 표면유출에 의하여 이동하여 지표수계로 흘러들

어가게 된다(Leonard, 1990; FOCUS, 2004; Kim 등, 2005a). 농약의 잔류성과 흡착성에 의하여 지하수 오염가능성을 가늠할 수 있는 수직이동 현상(Gustafson, 1989; Jarvis 등, 1997; 김 등, 2005b,c)과 달리 지표유출은 물에 녹거나 부유 토양입자에 흡착된 두 가지 형태로 일어나게 된다(Leonard, 1990; 김 등, 1997; FOCUS, 2004; 김 등, 2005a).

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, 밭토양에 직접 살포되는 입계 농약의 경우 단위면적당 사용량이 많고 작물체에 의한 차단효과가 적어 강우에 의하여 농경지로부터 벗어날 가능성이 희석살포농약에 비하여 높다고 생각된다

*연락처자

다. 따라서 발작물 파종시기에 사용되는 입제 농약의 사용량과 수용해도를 고려하여 농경지 외부로의 유출이 우려되는 diazinon과 metolachlor를 포장유출시험 대상농약으로 선정하였다.

Diazinon은 수도용으로 개발되었지만, 벼룩잎벌레, 거세미나방, 고자리파리 등의 방제를 위하여 발작물에도 사용되고 있다. 파종 또는 이식 전에 토양에 전면처리하는 3% 입제의 경우 최대 60 kg ha^{-1} 까지 살포하여 유효성분 기준으로는 1.8 kg ha^{-1} 이 된다. 최근 5년간 평균 출하량은 유효성분량으로 $40,969 \text{ kg}$ 을 유지하고 있다(작물보호협회, 2006a,b). Metolachlor는 일년생 화분과 잡초와 일부 광엽잡초를 방제 대상으로 하는 acetanilide계 제초제로서 유제와 입제가 있으며, 콩, 마늘, 고추, 감자, 옥수수 등 우리나라 주요 발작물의 파종 또는 정식시기 전후에 사용된다. S-metolachlor를 포함하는 단일성분 입제품목의 최근 5년간 평균 출하량은 유효성분량으로 $38,007 \text{ kg}$ 을 유지하고 있다(작물보호협회, 2006a,b).

농약의 표면유출에 대한 영향인자 중 농약의 특성으로는 흡착성(McCall 등, 1980; Roberts, 1996)과 환경적 요인으로는 강우의 시기, 강도 및 강우량 등 강우양상과 유출이 일어나는 포장의 경사도, 경사의 길이 및 토양의 투수성 등을 들 수 있을 것이다(Wischmeier와 Smith, 1978).

따라서 본 연구에서는 흡착실험을 수행하여 농약의 이동 가능성과 이동형태를 파악하고, 인공강우시설을 이용한 유출실험으로 강우양상 및 경사도의 영향 정도를 살펴본 후 경사지에 설치된 lysimeter에서 콩 재배 포장실험으로 작물 재배에 따른 농약의 유실 양상 차이를 파악하는 일련의 실험과정을 수행하여 농약의 표면유출 양상을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

시험에 사용된 농약은 시중 농약상에서 구입하였다. 살충제로 diazinon 3%가 함유된 다수진 입제를 사용하였고 제초제로는 metolachlor 4%가 함유된 메토라크롤 입제를 사용하였다. Pesticide manual(Tomlin, 2003)에 의하면 시험농약의 물에 대한 용해도는 diazinon 60 mg L^{-1} , metolachlor 488 mg L^{-1} 이고 토양 잔류 반감기는 diazinon 11~21일(실내), metolachlor 1~30일(포장)이었다.

인공강우유출 실험토양으로는 농업과학기술원의 경사지 lysimeter 시험포장(수원시 서둔동 소재)에서 표

층 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 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($60\sim 270^\circ\text{C}$) 조건으로 분석하였다.

흡탈착실험

Diazinon과 metolachlor는 수용해도가 높아 토양대용액비를 1대 1로 하여 $0.1\sim 10 \text{ mg L}^{-1}$ 수준에서 흡착 및 탈착 시험을 실시하였다. 토양흡착실험은 일반적으로 사용하는 OECD(1993)와 EPA(1994) 시험기준에 따라 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 용액중의 농도를 감하여 토양에 대한 흡착농도를 계산하는 batch 실험법의 단점을 보완하기 위하여 동일한 과정을 거친 별도의 1 mg L^{-1} 수준 처리 토양/용액 전체 중 농약량을 분석하였다. 이 결과로부터 평형도달시간 중의 분해율을 구하여 토양에 흡착된 농약농도 계산치를 보정하였다(김 등, 2005b).

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, 실험토양 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

가능한 고르게 살포하였다. 시험구당 농약별 살포량은 살충제 다수진 입제 1.8 g 및 제초제 메토라크롤 4% 입제 0.9 g으로 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 세우 조건으로 3 mm hr⁻¹에서 10시간 강우, 호우조건으로 20 mm hr⁻¹에서 10시간 강우 및 폭우조건으로 50 mm hr⁻¹에서 2시간 강우를 가정하였다. 강우 직전의 토양 수분상태에 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⁻¹의 강우가 10시간 지속되고 9일 경과 후에 50 mm hr⁻¹의 강도로 2시간 비가 오고 다시 4주가 지난 후에 50 mm hr⁻¹의 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⁻¹의 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. 표면유출의 영향인자 중 포장의 경사도의 영향을 평가하기 위하여 경사도 10%와 30%의 처리구를 두었다.

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 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.

2000년 6월 13일 경운 후 다수진 입제를 6 kg 10a⁻¹ 수준으로 살포하고 정지작업을 하였다. 다음날 오전 콩을 파종하고 메토라크롤 입제를 3 kg 10a⁻¹ 수준으로 살포하였다. 재배기간 중에 6월 27일 최초 유출이 일어난 강우를 시작으로 9월 18일까지 11회의 유출수를 채취하였으며, 토양 유실은 7회 발생하였다.

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.

시료의 추출 및 정제

유출수는 유리병에 담아 실험실로 운반하여 가능한 즉시 추출하였다. 시료 중 500 mL를 취하여 50 mL의 포화식염수를 넣고 50 mL의 dichloromethane로 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 여과하였다. 여과액에 증류수 500 mL와 50 mL의 포화식염수를 넣고 dichloromethane으로 유출수와 동일한 과정을 거쳐 2 mL의 *n*-hexane으로 용해하였다. 활성화된 Florisil 5 g 과 그 위에 2 cm 두께로 anhydrous sodium sulfate를 충전하고 *n*-hexane으로 세정하여 준비한 크로마토그래피관에 *n*-hexane에 녹인 추출액을 가하여 정제과정을 수행하였다. Dichloromethane/*n*-hexane/acetonitrile (50/49.65/0.35, v/v/v) 혼합용매 50 mL를 흘려 씻어 버린 후, 50 mL의 dichloromethane/*n*-hexane/acetonitrile (50/45/5, v/v/v) 혼합용매로 용출하여 diazinon과 metolachlor의 분석에 사용하였다. 용출액은 감압조건에서 농축하여 5 mL의 *n*-hexane에 재용해하였다.

결과 및 고찰

흡착반응 속도

Diazinon과 metolachlor의 실험토양에 대한 흡착반응 평형시간을 정하기 위하여 반응시간별 토양용액 중 농도를 측정된 결과는 그림 1과 같았다. 반응 초기 5~8시간까지는 용액 중의 농도가 변이가 상당히 나타나았으나, 반응 12시간 후부터는 반응시간별 용액 중의 농도 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 흡착반응 중 농약의 분해 정도를 파악하기 위하여 12시간 반응 토양용액의 경우는 원심분리 상정액과 토양을 각각 분석하여 전체 회수율을 구하였고 용액 중의 농약의 안정성을 알아보기 위하여 24시간 동안 토양을 가하지 않고 진탕시킨 대조구의 회수율을 구하여 토양 흡착량 계산에 정확성을 기하였다. 12시간 흡착반응계 전체 회수율과 용액 중 24시간 후 회수율은 diazinon의 경우는 각각 83.6%와 88.0%이었고 metolachlor의 경우는 각각 87.5%와 92.1%이었다. 회수율 결과에 의하면 두 성분 모두 반응시간이 증가함에 따라 흡착반응계에서의 농약소실이 커질 것으로 판단되어 흡착반응시간을 12시간으로 결정하였다.

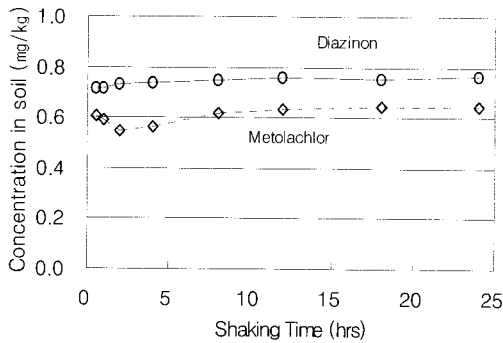


Fig. 1. Changes of concentration of the diazinon and metolachlor adsorbed to soil with shaking time.

흡착계수

Diazinon과 metolachlor의 실험토양에 대한 25°C에서의 등온흡착 결과를 그림 2와 그림 3으로 각각 나타내었다. 흡착방법과 탈착방법에 의하여 구한 두 농약의 흡착반응 결과는 모두 Freundlich 등온흡착식에 잘 부합되는 것으로 나타났다. 각 농약의 흡착방법과 탈착방법에 의한 Freundlich 흡착계수(K)를 살펴보면, diazinon의 경우는 각각 4.0과 5.5이었으며 metolachlor의 경우는 각각 1.6과 2.0으로 나타났다. 농약을 토양에 혼화처리한 후 탈착시키는 방법이 용액에 존재하

는 농약을 토양에 흡착시키는 일반적인 흡착실험 방법보다 높은 흡착계수 값을 나타내었는데, 그 차이를 탈착방법에 의한 흡착계수 (K_{des})를 흡착방법에 의한 흡착계수 (K_{ads})에 대한 비 ($K_{des/ads}$)로 나타내면 diazinon은 1.36이었고 metolachlor는 1.25이었다.

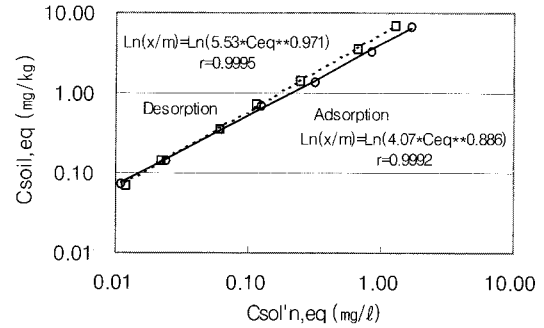


Fig. 2. Freundlich adsorption isotherms of diazinon at 25°C in the soil used in runoff study by two sorption methods.

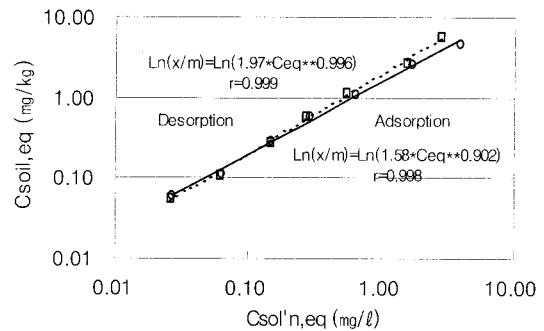


Fig. 3. Freundlich adsorption isotherms of metolachlor at 25°C in the soil used in runoff study by two sorption methods.

Freundlich 등온흡착식의 두 상수 중 나머지 하나로 흡착반응의 직선성을 나타내는 $1/n$ 값은 흡착방법과 탈착방법에 따라 diazinon의 경우는 각각 0.89와 0.97이었으며 metolachlor의 경우는 각각 0.90과 1.00으로 나타났다. 흡착식의 $1/n$ 값이 1에 근접한다는 것은 흡착반응 양상이 실험농도 범위 내에서 용액 중의 물질 농도에 독립적이라는 것을 의미한다. 따라서 탈착방법의 $1/n$ 값의 범위가 0.97~1.00으로 흡착방법의 $1/n$ 값의 범위 0.89~0.90보다 1에 근접함으로써 탈착방법으로 구한 흡착계수 값이 흡착방법으로 구한 흡착계수보다 농약의 농도에 의한 영향을 덜 받을 것으로 생각되었다. 그래서 흡착반응의 농도의존성을 나타내는 처리농도별 흡착분배계수의 최저값에 대한 최고값의

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

Pesticide	Initial conc. in solution (mgkg ⁻¹)	Adsorption		Desorption	
		Kd	Koc	Kd	Koc
Diazinon	0.1~10	3.9~6.6 (4.1) ^{a)}	380	5.3~6.6 (5.2)	480
Metolachlor	0.1~10	1.2~2.3 (1.6)	150	1.8~2.3 (2.0)	190

^{a)}A value in parenthesis is average.

비 ($K_{max/min}$)는 metolachlor 1.87, diazinon 1.68이었고, 탈착방법의 ($K_{max/min}$)는 metolachlor 1.29, diazinon 1.23으로 나타나 탈착방법에 의한 흡착계수 측정방법이 물질의 처리농도에 의한 영향을 적게 받는 것으로 확인되었다.

두 농약의 토양에 대한 흡착성 수준을 평가하기 위하여 처리농도 수준별 흡착분배계수의 평균값을 유기탄소기준 흡착분배계수 (Koc)로 환산하여 표 1에 나타내었다. 두 흡착방법에 의한 diazinon의 Koc 값은

380과 480이었으며 이것은 European Food Safety Authority(EFSA)의 등록검토 보고서(2006)에 제시된 4종 토양에 대한 413~760과 동일한 범위 안에 속하였다. Metolachlor의 Koc 값은 150과 190이었는데 European Commission(EC)의 농약등록 기술검토보고서(2004)에 보고된 S-metolachlor의 9종 토양에 대한 Koc 중앙값인 226에 상당히 근접한 수치였다. 두 농약의 Koc값을 영국 Soil Survey and Land Research Center (SSLRC)의 이동성 분류기준(Roberts, 1996)으로 판단

Table 2. Losses of diazinon 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			Soil residue	
		Event	Runoff(%)	Erosion(%)	Depth(cm)	Residue(%)
Scenario I	10	Total	0.33	0.06	Total	0.5
		1st	0.25	0.01	0~5	0.5
		2nd	0.07	0.04	5~10	-
		3rd	0.01	0.004	10~15	-
		Total	0.56	0.17	Total	0.7
		1st	0.46	0.02	0~5	0.6
	30	2nd	0.08	0.13	5~10	0.03
		3rd	0.01	0.01	10~15	-
		Total	0.23	0.04	Total	0.8
		1st	0.15	0.01	0~5	0.7
		2nd	0.07	0.03	5~10	0.1
		3rd	0.01	0.001	10~15	-
Scenario II	10	Total	0.30	0.15	Total	0.9
		1st	0.21	0.03	0~5	0.8
		2nd	0.08	0.12	5~10	0.1
		3rd	0.02	0.01	10~15	-
		Total	0.06	0.08	Total	0.5
		1st	-	-	0~5	0.5
	30	2nd	0.05	0.06	5~10	-
		3rd	0.01	0.02	10~15	-
		Total	0.13	0.14	Total	0.2
		1st	-	-	0~5	0.2
		2nd	0.11	0.11	5~10	-
		3rd	0.02	0.03	10~15	-
Scenario total	Range	Total	0.06~0.56	0.04~0.17	Total	0.2~0.9
	Average	Total	0.27	0.11	Total	0.6

Table 3. Losses of metolachlor 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			Soil residue	
		Event	Runoff(%)	Erosion(%)	Depth(cm)	Residue(%)
Scenario I	10	Total	0.80	0.08	Total	33.3
		1st	0.30	0.01	0~5	11.7
		2nd	0.41	0.05	5~10	18.7
		3rd	0.09	0.01	10~15	2.9
	30	Total	0.99	0.24	Total	31.3
		1st	0.41	0.02	0~5	13.6
		2nd	0.45	0.16	5~10	10.9
		3rd	0.14	0.07	10~15	6.8
	Scenario II	10	Total	0.54	0.06	Total
1st			0.19	0.01	0~5	7.6
2nd			0.28	0.05	5~10	15.7
3rd			0.07	0.01	10~15	9.9
30		Total	0.77	0.20	Total	28.4
		1st	0.24	0.03	0~5	8.3
		2nd	0.44	0.13	5~10	16.0
		3rd	0.10	0.04	10~15	4.2
Scenario III		10	Total	0.44	0.13	Total
	1st		-	-	0~5	18.7
	2nd		0.18	0.07	5~10	2.3
	3rd		0.25	0.07	10~15	-
	30	Total	0.93	0.23	Total	14.7
		1st	-	-	0~5	12.5
		2nd	0.66	0.12	5~10	2.2
		3rd	0.27	0.10	10~15	-
	Scenario total	Range	Total	0.44~0.99	0.06~0.24	Total
Average		Total	0.75	0.16	Total	27.0

하면 diazinon과 metolachlor는 moderately mobile (75 ≤ Koc < 500) 등급에 해당하였으며, McCall 등(1980)의 이동성 범위를 적용하면 diazinon과 metolachlor는 두 가지 흡착방법에 의한 결과 모두 medium mobility 등급에 속하였다.

인공강우에 의한 diazinon의 유출

강우 시나리오별 각 인공강우 처리구의 diazinon 유실은 유출수에 의한 부분이 처리량의 0.1~0.6% 수준이었고 유실토양에 의한 부분이 0.1~0.2% 수준이었으며, 전체 유실률은 0.1~0.7% 수준이었고 평균값으로 비교하면 유출수에 의한 기여도가 2.5배 정도 높은 것으로 나타나 수용해도가 크고 흡착성이 적은 metolachlor와 비슷한 경향이였다.

그러나 metolachlor와는 달리 diazinon의 1차 유실량이 2차 유실량에 비하여 높게 나타났는데 이를

diazinon의 이동수단별로 살펴보면 유출수에 의한 diazinon 유실의 대부분이 1차 유실효과정에서 발생하였고 유실효토양에 의한 유실은 다른 농약의 경우와 마찬가지로 2차 유실효과정에서 높게 나타났다. 이것은 diazinon의 토양 중에서의 빠른 분해속도로 인하여 2차 유실이 일어난 시기에는 토양 중 잔류량이 상당히 줄어들었기 때문으로 생각된다. 이러한 추측은 3차 강우 종료 후 토양 잔류율이 처리량의 0.2~0.9%이었다는 사실에 의하여 뒷받침된다. 토심별로는 잔류량의 대부분이 표층에서 토심 5 cm 범위 내에 존재하였으며, 강우 시나리오 2의 경우에는 토심 5~10 cm 부분에 0.1%가 잔류하여 수분 침투량이 가장 많았을 조건인 강우 시나리오 2의 경우에 diazinon이 가장 깊이 이동한 것으로 나타났다. 유실에 대한 경사도의 영향도 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.7~0.9 배 증가하여 metol-

Table 4. Annual losses of diazinon through runoff and erosion from the soil surface of lysimeter plot cultivated the soybean in 2000

Condition of lysimeter plot			Loss by rainfall				Total (%)
Slope(%)	SL(m)	Crop	Runoff		Erosion		
			Conc.max($\mu\text{g L}^{-1}$)	Loss(%)	Conc.max(mg kg^{-1})	Loss(%)	
10	5	Soybean	4.0	0.06	0.34	0.48	0.54
		Bare soil	3.2	0.02	0.05	0.27	0.29
	10	Soybean	0.8	0.01	0.02	0.02	0.03
		Bare soil	5.3	0.10	0.14	0.34	0.45
20	15	Soybean	1.4	0.03	0.08	0.13	0.15
		Bare soil	3.1	0.05	0.14	0.42	0.47
	5	Soybean	7.2	0.14	0.13	0.16	0.30
		Bare soil	3.8	0.02	0.01	0.22	0.23
30	10	Soybean	6.8	0.07	0.03	0.13	0.20
		Bare soil	5.8	0.06	0.25	0.23	0.29
	15	Soybean	4.5	0.05	0.02	0.14	0.19
		Bare soil	4.1	0.04	0.22	0.19	0.23
30	5	Soybean	1.7	0.05	0.03	0.26	0.31
		Bare soil	2.5	0.01	0.02	0.31	0.32
	10	Soybean	3.7	0.15	0.05	0.25	0.39
		Bare soil	5.3	0.10	0.22	0.40	0.50
15	Soybean	9.4	0.08	0.19	0.26	0.34	
	Bare soil	16.3	0.09	0.42	0.23	0.32	
Soybean total	Range		0.01~0.15			0.02~0.48	0.03~0.54
	Average		0.07			0.20	0.27
Bare soil total	Range		0.01~0.10			0.19~0.42	0.23~0.50
	Average		0.05			0.29	0.34

achlor의 경우와 유사한 것으로 판단되었다.

인공강우에 의한 metolachlor의 유출

강우 시나리오별 각 인공강우 처리구의 metolachlor 유실은 유출수에 의한 부분이 처리량의 0.5~1.0% 수준이었고 유실토양에 의한 부분이 0.1~0.7% 수준이었으며, 평균값으로 비교하면 유출수에 의한 유실이 2 배 정도 높은 것으로 나타나 수용해도가 크고 흡착성이 적은 약제의 특성이 반영된 것으로 판단되었다. 강우 시기별로는 200 mm에 해당하는 인공강우를 살포한 경우가 1차 강우 7일 후에 100 mm의 강우가 온 경우에 비하여 농약 유실량이 전체적으로는 약간 적은 것으로 나타났으며, 동일한 강우 양상의 경우 강우 전 토양수분 상태에 따라 농약 유실량의 차이가 결정되는 것으로 생각되었다.

토양 중 수직이동이 표면유출에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3차 강우 후 농약의 잔류량과 토심별 분포를 살펴 본 결과 전체 잔류량은 처리량 대비 15~33%이었다. 토심별로는 표층에서 토심 5 cm 범위

내에 8~19%, 토심 5~10 cm 부분에는 2~19%가 잔류하였고, 토심 10~15 cm 부분에는 시나리오 1과 2의 경우 3~10%가 분포하였으나 시나리오 3의 경우에는 검출한계 미만으로 미처 도달하지 않은 것으로 나타났다.

유실에 대한 경사도의 영향을 살펴보면 강우 시나리오별로 경사도 30%의 경우가 10%에 비하여 전체 유실량이 0.4~1.0 배 증가하였는데, 유출수에 의한 유실분은 유출수중 농도의 차이로 볼 수 있으며, 유실토양에 의한 유실분의 차이는 토양 유실량에 의하여 영향을 받는 것으로 생각되었다.

포장 lysimeter에서의 diazinon의 유출

나지구의 경우 경사도 및 경사장 lysimeter별 diazinon의 유출수에 의한 유실량은 처리량에 비하여 0.01~0.10% 수준이었으며 토양 유실에 따른 유실량은 0.19~0.42% 수준이었다. 나지구의 전체 유실량은 0.23~0.50% 수준으로 나타나 인공강우실험 유실량 0.14~0.73%과 전체적으로는 잘 일치하는 것으로 생

Table 5. Annual losses of metolachlor through runoff and erosion from the soil surface of lysimeter plot cultivated the soybean in 2000

Condition of lysimeter plot			Loss by rainfall				Total (%)
Slope(%)	SL(m)	Crop	Runoff		Erosion		
			Conc.max($\mu\text{g L}^{-1}$)	Loss(%)	Conc.max(mg kg^{-1})	Loss(%)	
10	5	Soybean	13	0.11	0.17	0.52	0.62
		Bare soil	5	0.08	0.70	1.08	1.15
	10	Soybean	15	0.09	0.05	0.10	0.20
		Bare soil	29	0.35	0.42	1.53	1.88
15	Soybean	10	0.17	0.17	0.41	0.58	
	Bare soil	40	0.15	0.69	1.59	1.75	
20	5	Soybean	31	0.55	0.40	0.47	1.02
		Bare soil	28	0.28	0.04	0.90	1.18
	10	Soybean	14	0.14	0.06	0.41	0.56
		Bare soil	7	0.30	0.23	0.69	0.99
	15	Soybean	7	0.42	0.04	0.39	0.81
		Bare soil	6	0.41	0.39	0.77	1.18
30	5	Soybean	13	0.50	0.07	0.90	1.40
		Bare soil	5	0.68	0.06	1.38	2.05
	10	Soybean	7	0.78	0.07	0.45	1.34
		Bare soil	10	0.39	0.80	1.39	1.78
	15	Soybean	15	1.01	0.33	0.85	1.86
		Bare soil	21	2.22	0.60	0.84	3.06
Soybean total		Range	0.09~1.01		0.10~0.90		0.20~1.86
		Average	0.42		0.50		0.93
Bare soil total		Range	0.08~2.22		0.69~1.59		0.99~3.06
		Average	0.54		1.13		1.67

각되었으나, 나지구의 유실량의 대부분은 2000년 7월 22일의 일일 강수량 333 mm의 폭우에 따른 토양의 다량 유실 때문이었다.

콩재배구의 유출수 및 유실토양에 의한 유실량은 각각 0.01~0.15%와 0.02~0.48% 수준이었으며 콩재배구의 유실률은 나지구의 유실률에 비하여 평균적으로 21% 정도 감소된 것으로 나타났는데 재배구에서의 diazinon 유실량 감소는 metolachlor의 경우와 같이 토양 유실량의 감소에 따른 것으로 판단된다. 경사조건별 diazinon의 유실량은 유실량이 매우 적은 수준이었기 때문에 일정한 경향을 나타내지 않았다. 유출수 중 diazinon의 최고농도는 콩재배구 및 나지구 각각 $1\sim 9 \mu\text{g L}^{-1}$ 및 $3\sim 16 \mu\text{g L}^{-1}$ 수준이었으며, EPA(2004)에 보고된 1,058 지표수 조사지점 5,155 시료 중 diazinon의 최고농도 $3.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 비슷한 수준이었다.

포장 lysimeter에서의 metolachlor의 유출

나지구의 경우 경사도 및 경사장 lysimeter별 metolachlor의 유출수에 의한 유실량은 처리량에 비하여 0.1~2.2% 수준이었으며 토양 유실에 따른 유실량은 0.7~1.6% 수준이었다. 나지구의 전체 유실량은 1.0~3.1% 수준으로 나타나 인공강우실험 유실량에 비하여 lysimeter 포장 유실량이 86% 정도 높게 나타났는데, 유출수에 의한 유실량은 비슷하였으나 토양 유실에 의한 유실량은 lysimeter 포장의 경우가 인공강우실험에 비하여 4배 정도 높게 나타났다. 이것은 diazinon의 경우와 마찬가지로 2000년 7월 22일의 폭우에 의한 최대 25.6 kg m^{-2} 의 토양 유실 때문이었다. Gayner 등(1995)이 옥수수포장에서 4년 동안 실시한 유출실험 결과에 의하면 metolachlor의 연도별 유실률은 $1.0\sim 63 \text{ g ha}^{-1}$ 범위로 강우양상에 크게 좌우되었으며, 살포량 대비 최고 2.4% 수준이었다.

콩재배구의 유출수 및 유실토양에 의한 유실량은 각각 0.1~1.0%와 0.1~0.9% 수준이었으며, 콩재배구

의 유실율은 나지구의 유실율에 비하여 평균적으로 44% 정도 감소된 것으로 나타났는데 재배구에서의 metolachlor 유실량 감소는 토양 유실량의 감소에 따른 것으로 판단된다. 경사조건의 영향을 살펴보면 전체적인 metolachlor의 유실량은 경사도와 경사장의 증가에 따라 대략 2 배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 한편 유출수 중 metolachlor의 최고농도는 콩재배 구 및 나지구 각각 7~31 $\mu\text{g L}^{-1}$ 및 5~40 $\mu\text{g L}^{-1}$ 수준으로 작물재배 유무에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 유출농도 수준은 미국 EPA (1995)는 지표수계에서의 metolachlor의 time weighted mean concentrations (TWMCs)가 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ 미만이고 대부분의 경우에는 5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 미만이라고 계산한 것과도 일치한다고 볼 수 있을 것이다.

인용문헌

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.

European Commission (2004) Technical review report for S-metolachlor, SANCO/1426/2001 - rev.3.

European Food Safety Authority (2006) Conclusion on the peer review of diazinon, Appendix 1 - list of endpoints.

FOCUS (2004) FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC.

Gaynor, J. D., D. C, MacTavish and W. I, Findlay. (1995) Atrazine and metolachlor loss in surface and subsurface runoff from three tillage treatments in corn, *J. Environ. Qual.* 24:246~256.

Gustafson, D. I. (1989) Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability, *Environ. Toxicol. Chem.* 8:339~357.

Jarvis, N. J., J. M, Hollis., P. H, Nicholls., T Mayer. 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.

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.

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. pp.303~349.

McCall, P. J., R. L, Swann., D. A, Laskowski., S. M, Unger., S. A, Vrona and H. J, Dishburger. (1980). Estimation of chemical mobility in soil from liquid chromatographic retention times, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 24:190~195.

OECD (1993) Test guideline 106 Adsorption/desorption, *In OECD guidelines for testing of chemicals.*

Roberts, T. R. (1996) Assessing the environmental fate of agrochemicals, *J. Environ. Sci. Health.* B31:325~335.

Tomlin, C. (ed.) (2003) The pesticide manual (13th ed.), British Crop Protection Council.

US EPA (1994) Sediment and adsorption isotherm, *In Code of federal regulation 40 part 790 to end*, pp.157~161.

U.S. EPA (1995) Reregistration Eligibility Decision for metolachlor, U.S. EPA Doc. No. 738-R-95-006.

U.S. EPA (2004) Interim Reregistration Eligibility Decision for diazinon, U.S. EPA Doc. No. 738-R-04-006.

Wischmeier, W. H. and D. D, Smith. (1978) Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning, *USDA Agriculture Handbook* No.537.

김균, 김정한, 박창규 (1997) 강우에 의한 농약의 표면 유출 특성, *한국환경농학회지* 16(3):274~284.

김성수, 김태한, 이상민, 박동식, Zhu Yong-Zhe, 김성문, 허장현 (2005a) 실내 인공강우를 이용한 강원도 고랭지 토양의 토성 및 경사도별 농약 이동특성, *한국농약과학회지* 9(4):316~329.

김찬섭, 박병준, 임양빈, 류갑희 (2005b) 유기인계 및 카바메이트계 농약의 토양흡착성과 간이선발모형을 이용한 용탈 잠재성 평가, *한국환경농학회지* 24(4): 341~349.

김찬섭, 임양빈, 이희동, 오병렬 (2005c) 유기인계 및 카바메이트계 농약의 토주용탈과 대류이동성 모형에 의한 이동성 예측, *한국환경농학회지* 24(4):350~357.

한국작물보호협회 (2006a) 농약사용지침서.

한국작물보호협회 (2006b) 농약연보.

Runoff of Diazinon and Metolachlor by Rainfall Simulation and from Soybean Field Lysimeter

Chan-Sub Kim*, Byung-Moo Lee, Byung-Jun Park, Pil-Kyun Jung, Ju-Hyeon Choi and Gab-Hee Ryu(*National Institute of Agriculture Science and Technology, Rural Development Administration, Suwon, 441-707, Korea*)

Abstract : Three different experiments were undertaken to investigate the runoff and erosion loss of diazinon and metolachlor from sloped-field by rainfall. The mobility of two pesticides and which phase they were transported by were examined in adsorption study, the influence of rainfall pattern and slope degree on the pesticide losses were evaluated in simulated rainfall study, and the pesticide losses from soybean field comparing with bare soil were measured in field lysimeter study. Freundlich adsorption parameter (K) ranged 1.6~2.0 for metolachlor and 4.0~5.5 for diazinon. The K values of pesticides by the desorption method were higher than those ones by the adsorption method. Another parameter (1/n) in Freundlich equation for the pesticides tested ranged 0.96~1.02 by desorption method and 0.87~1.02 by adsorption method. By the SSLRC's classification for pesticide mobility of diazinon and metolachlor were classified as moderately mobile ($75 \leq K_{oc} < 500$). Runoff and erosion losses of pesticides by three rainfall scenarios were 0.5~1.0% and 0.1~0.7% for metolachlor and 0.1~0.6% and 0.1~0.2% for diazinon. Distribution of pesticides in soil profile were investigated after the simulated rainfall events. Metolachlor was leached to 10~15 cm soil layer and diazinon was leached to 5~10 cm soil layer. Losses of each pesticide in the 30% of sloping degree treatment were 0.2~1.9 times higher than those ones in the 10% of sloping degree treatment. Pesticide losses from a series of lysimeter plots in sloped land by rainfall ranged 1.0~3.1% for metolachlor and 0.23~0.50% for diazinon, and were 1/3~2.5 times to the ones in the simulated rainfall study. The erosion rates of pesticides from soybean-plots were 21~75% lower than the ones from bare soil plots. The peak runoff concentration in soybean-plots and bare soil plots were 1~9 μgL^{-1} and 3~16 μgL^{-1} for diazinon, 7~31 μgL^{-1} and 5~40 μgL^{-1} for metolachlor, respectively.

Key words : runoff, erosion, adsorption, diazinon, metolachlor.

*Corresponding author (Fax +82-31-290-0508, E-mail : chskim@rda.go.kr)