

## 토양 중 농약의 동태

이규승\*

충남대학교 농업생명과학대학 생물환경화학과

(2010년 9월 7일 접수, 2010년 9월 17일 수리)

### Behavior of Pesticides in Soil

Kyu Seung Lee\*

Department of Bioenvironmental chemistry, Chungnam National University, 220 Kungdong Yusungku, Daejeon 305-764, Korea

#### Abstract

The researches with pesticides in soil were divided several categories such as run off from soil surface, adsorption and desorption in soil, leaching through soil, degradation and decomposition studies, fates in soil, monitoring survey and development of analytical procedures and so on. In this paper it was reviewed that the research results published in Korean journals since 1996, in connection with the former review as 'Evaluation on the effects of pesticide residues to agroecosystem in Korea'.

**Key words** Soil, Pesticide, behavior

토양에 처리된 농약은 강우에 의해 지표면으로 유출되어 하천을 비롯한 수생태계에 유입될 수 있으며, 또 토양이 유기물이나 점토광물 등에 흡착되거나 또는 흡착된 성분이 다시 물에 의해 탈착되며, 일부의 농약성분은 토양 중에서 직접 용탈되기도 한다. 한편, 토양에 잔류되어 있는 농약 성분은 토양미생물에 의해 분해되거나, 기타 비생물학적 요인에 의해 분해되어진다. 그리고 토양 중에 잔류하는 농약은 여러 경로를 거쳐 대사되거나 또는 토양중의 유기물 분획에 잔류하게 되며, 일부는 무기화하여 대기 중으로 방출되기도 한다. 이런 일련의 연구에 가장 밑바탕이 되는 것은 토양 중 잔류 농약의 효율적인 분석일 것이다.

본 총설에는 1995년까지의 국내 관련 연구를 정리하여 1997년에 발표된 '농업생태계에 대한 잔류농약의 영향평가'(이, 1997) 이후에 1996~2009년 말까지 기간 동안의 국내에서 발표된 연구결과를 중심으로 하여 검토해 보았다.

#### 농약의 지표면 유출

살포된 농약성분의 99% 이상은 비표적대상인 토양, 대기 및 작물체 등에 분포하게 된다. 이 중 토양표면에 살포된 농약성분은 강우현상에 의해 수계로 유출되어 수생태계나 지표수를 이용하는 사람에게 급·만성의 독성적 영향을 끼칠 수 있으므로 환경위해성 관점에서는 매우 중요한 연구과제라 볼 수 있다.

김 등(1996d)은 captafol제를 사과과수원에 처리하고 2년 동안 강우에 의한 토양표면 유출 실험을 수행하였는데, 유출수 중에는 약제처리 직후에  $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 농도로 검출되었으나, 나머지 유출수 중에서는 5차례 모두  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  이하로 검출되었다고 보고하였다. 또한 배출수 중의 captafol은 소하천과 합류하천에서 10-50배 정도 희석되는 것으로 조사되었다.

김 등(1997b)은 양토와 사양토인 두 포장에 토양살충제인 phorate제를 살포한 후 호우조건( $20 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ )과 세우조건( $5 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ )의 두 가지 인공강우 조건에서 토양유출물을 조사한

\*연락처 : Tel. +82-42-821-6735, Fax. +82-42-822-5781

E-mail: kslee@cnu.ac.kr

결과, 호우조건에서 양토지역의 경우 유출률은 총 유효성분의 1.31%이었으며, phorate는  $12.2 \pm 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , phorate sulfoxide  $11.4 \pm 24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 그리고 phorate sulfone은  $25.0 \pm 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  이었고, 세우조건에서의 유출율은 0.18%로 호우조건에 비해 낮았으나 유출수중의 최고농도는 phorate  $10.4 \pm 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , phorate sulfoxide는  $137 \pm 63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 그리고 phorate sulfone은  $42 \pm 24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 sulfoxide나 sulfone 형태의 산화대사물이 많으므로 호우조건 보다는 산화가 촉진되는 것으로 나타났다. 또한 사양토에서는 호우조건에서의 총 유출률은 0.48%이었으며, phorate  $5.9 \pm 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , phorate sulfoxide  $38.7 \pm 21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 그리고 phorate sulfone은  $5.1 \pm 31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 조사되었다. 또 세우조건에서의 총 유출률은 0.012%로 매우 낮았으며, phorate는  $3.7 \pm 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , phorate sulfoxide는  $34.9 \pm 19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 그리고 phorate sulfone은  $12.5 \pm 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 양토에 비해 훨씬 낮은 결과를 보였는데 이는 사양토의 경우 용탈되는 양이 양토보다 많기 때문에 나타난 현상으로 보았다.

김 등(1997a)은  $20 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ 의 강우조건에서 7종의 농약에 대한 실내 유출실험을 하여 농약의 유출율과 물리화학적 특성과의 관계를 검토하였다. 유출률은 metolachlor 57.0%, alachlor 14.2%, chlorothalonil 13.2%, chlorpyrifos 7.9%, EPN 7.2%, phorate 7.1% 그리고 captafol 2.8% 이었으며, 유출률과 수용성과의 상관관계가 높다는 것을 밝혔다. 그리고 이들은 유출률 예측식을  $Y = 0.2812 \times 10 \exp^{(0.261 \log ws - 0.366)} + 0.3594 \times 10 \exp^{(-0.545 \log koc + 1.747)} + 0.3594 \times 10 \exp^{(-0.362 \log kow + 1.105)}$ 로 제시하였다.

Lee 등(2000)은  $5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  넓이의 turfgrass가 식재된 골프장의 실험구에서 10일간 매일  $20 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 인공강우에 의한 제초제 pendimethalin의 표면유출량을 조사하였다. 약제처리 1일 전에  $20 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 강우조건으로 실험구에 수분을 공급한 후, 약제를 살포하고 매일 같이 같은 조건으로 9일간 인공강우 처리한 결과 표면유출수량은 전체 강우량의 18.8~39.3%(평균 26.0%)이었으며, pendimethalin은 약제처리 당일에 가장 많은 유출량을 보였으며, 전체 처리기간 중에는 적량 살포구에서는 0.81%, 그리고 배량 살포구에서는 1.21%의 약제성분이 유출된다고 보고 하였다.

김 등(2005c)은 강원도 고랭지 경사지의 경작토에서 채취한 토성이 다른 2개의 토양과 3개의 경사도별로 carbendazim, carbofuran, chlorpyrifos, cypermethrin, dimethomorph, diniconazole 및 endosulfan 등 7종의 농약을 처리하고 실내에서 인공강우조건으로 유출수중 농약함량을 조사하였다. 실험조건은  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ 의 상자에 토양을 채운 후 2 m 상단에서  $60 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ 의 강도로 2시간동안 강우하였으며,

최초강우는 농약처리 12시간 후에 시작하였다. 미사질식양토의 경우 15%와 30% 경사조건에서 cypermethrin을 제외한 6종의 농약은 초기 60분 이내에 61%이상 유출되었으며, 45%의 경사도인 경우에는 실험대상 7종의 농약 모두가 69% 이상 유출되었다. 사양토의 경우에는 15% 경사에서 7종의 농약 모두가 60분 이내에 83% 이상 유출되었다. 따라서 농약의 유출은 토성이나 경사도에 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

김 등(2006a)은 콩재배 포장에서 lysimeter를 이용하여 alachlor, ethalfuralin, ethoprophos 및 pendimethalin의 유출량을 평가하였는데, alachlor의 경우 콩재배 조건에서는 전체 처리량의 0.002~0.020%의 범위에서 평균 0.008%만이 유출수에서 검출되었고, 유출토양은 거의 발생하지 않았다. 그러나 나지토양조건에서는 0.013~0.106%의 범위에서 평균 0.047%가 유출수 중에서 검출되어 콩재배시 나지는 약 6배 정도 많은 유출이 확인되었고, 유실토양에서는 0.056~0.534%의 범위에서 평균 0.271%로 동일한 조건의 유출수보다 약 6배 가까이 증가되는 결과를 확인하였다.

Ethoprophos의 유출수 중 유실량은 콩재배 조건의 경우 경사도나 경사장에 관계없이 0.001% 수준으로 매우 낮았고, 유실토양 중에서는 확인할 수 없었다고 했으며, 나지토양에서도 유출수 중에는 0.001% 수준으로 낮게 함유되었으며, 유실토양에는 평균 0.034%가 함유된 것으로 나타났다고 하였다. Ethalfuralin의 경우 콩재배 조건에서는 유출수 중 0.17~0.42%의 범위에서 평균 0.29%가 유실토양 중에서는 0.46~4.67%의 범위에서 평균 1.81%가 함유된 것으로 조사되었고, 나지 토양에서는 유출수 중 0.17~0.49%의 범위에서 평균 0.31%가 또 유실토양 중에서도 0.86~4.00%의 범위에서 평균 2.59%가 함유된 것으로 조사되었다. 그리고 pendimethalin의 경우 콩재배 포장에서는 유출수 중 1.1~2.6%의 범위에서 평균 1.6%가, 그리고 유실토양 중에서도 3.5%~24.9%의 범위에서 평균 12.0%나 유출되어 연구대상 4개 약제 중 가장 높은 표면 유출률을 나타냈다. 또 노지토양에서도 유출수 중 1.1~2.6%의 범위에서 평균 1.8%가, 유실토양 중에는 6.2~29.5%의 범위에서 평균 19.0%가 유출되는 것을 알 수 있었다. 특히 pendimethalin의 경우에는 다른 약제들과는 달리 경사도와 경사장에 비례하여 표면 유출량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

김 등(2006b)은  $3 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ ,  $20 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$  및  $50 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ 의 강우강도에서 각각 10시간 및 2시간의 인공강우를 하여 alachlor, ethalfuralin, ethoprophos 및 pendimethalin의 토양유출실험을 수행하였다. 또 토양수분상태 및 강우양상에 따른 표면 유출현상을 좀 더 정확히 파악하기 위해 아래와 같은 3가지

조건으로 인공강우를 실행하였다.

1. 파종기에 충분한 비가 오는 조건( $20 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1} \times 10$ 시간, 9일 후  $50 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1} \times 2$ 시간, 4주 후  $50 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1} \times 2$ 시간)
2. 건조상태가 계속되다가 파종 후 호우조건으로 건조상태에서 파종 및 농약살포(인공강우조건은 1.과 동일)
3. 건조상태가 계속되다가 적당한 비가 오는 경우로 건조상태에서 파종, 농약살포( $3 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1} \times 10$ 시간, 9일 후 및 4주 후  $50 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1} \times 2$ 시간)의 다양한 조건에서의 농약유출을 비교하였다.

Alachlor의 경우 경사도 10%보다는 경사도 30%에서 유출수나 유출토양 모두에서 농도가 높았으며, 모든 인공강우 조건에서도 2번째 인공강우조건에서의 유출량이 많았다. 또한 습윤기파종 및 농약살포보다는 건조기파종 및 농약살포조건에서 30%경사도에서 유출량이 높았으며,  $3 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ 의 인공강우조건에서는 alachlor의 유출은 전혀 발생되지 않았다. 3가지 조건별 인공강우에 의한 유실량은 1의 경우 유출수중에  $1.04 \sim 6.37\%$ 로 평균  $3.87\%$ 이었으며, 유실토양 중에서는  $0.26 \sim 1.23\%$ 로 평균  $0.54\%$ 로 조사되어 유출수에 의한 유실이 토양유실량에 비해 6배 정도 많은 것으로 나타났다. Ethafluralin의 경우는 alachlor와는 달리 유실토양에 의한 농약성분 유출이 유출수보다 약 2.8배 정도 많았으며 유출수 중에서는  $0.95 \sim 2.45\%$ 로 평균  $1.70\%$ , 유실토양에서는  $1.69 \sim 10.19\%$ 로 평균  $4.93\%$ 로 조사되었다. 3가지 조건별 인공강우에 의한 유실량은 1의 경우 유출수중에  $1.04 \sim 6.37\%$ 로 평균  $3.87\%$ 이었으며, 유실 토양 중에서는  $0.26 \sim 1.23\%$ 로 평균  $0.4\%$ 로 조사되었다. Pendimethalin의 경우에는 경사도에 큰 차이가 없었으며 유출수보다는 유실토양에 의한 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 유출수에서는  $1.32 \sim 2.90\%$ 의 범위에서 평균  $2.10\%$ 가, 그리고 유실토양에서는  $3.80 \sim 10.81\%$ 의 범위에서 평균  $6.17\%$ 가 유실된 것으로 나타나 유실토양 중에 유출수보다 약 3배 정도 높은 함량을 보였다. 또한 ethoprophos는 유출수 중에  $0.60 \sim 2.73\%$ 의 범위에서 평균  $1.58\%$ , 유실토양 중에서는  $0.09 \sim 0.32\%$ 의 범위에서 평균  $0.20\%$ 로 낮은 유실률을 보였으며, 경사도별로는 30%의 경사도가 10%의 경사도보다 유실률이 다소 큰 경향을 보였다. 이런 결과로 미루어 약제의 흡착계수와 수용해도 및 Koc 등의 약제의 물리화학적 특성이 토양 중 농약의 유실과 깊은 관계가 있음을 밝혔다.

김 등(2007) endosulfan을 대상으로 인공강우 유출실험과 lysimeter를 이용하여 콩을 재배하면서 재배기간 중의 강우 현상에 따른 경사지 유출실험을 실시하였으며 인공강우 유출 실험에서의 인공강우조건은 김 등(2006b)과 동일하였다. 인

공강우 처리구에서의 유출수 및 유실토양에 의한 endosulfan의 표면유출률은 건조조건이 습윤조건보다 많았고, 경사도 10%보다는 경사도 30%에서 많은 것으로 나타났다. 즉, 유출수중에는 처리량의  $3.4 \sim 5.6\%$ 가, 그리고 유실토양 중에는 처리량의  $4.4 \sim 15.6\%$ 가 유출되는 것으로 나타나 유출수보다는 유실토양에 의한 유실률이 다소 높은 것으로 나타났다. 또 lysimeter 실험에서 나지토양은 콩재배구에 비해 유출수 중에는 약 1.2배, 유실토양에서는 약 1.6배 정도의 endosulfan이 더 많이 유출되는 것으로 조사되었으며, 유실토양에 의한 유출량은 경사도에 비례하여 증가하였으나 동일 경사도별 경사장의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 유출수에 의한 endosulfan의 유출량은 콩재배지의 경우 처리량의  $1.9 \sim 2.9\%$ 의 범위에서 평균  $2.3\%$ , 나지의 경우  $2.3 \sim 3.3\%$ 로 평균  $2.8\%$ 이었으며, 유실토양 중에는 콩재배지의 경우  $2.9 \sim 33.0\%$ 로 평균  $12.4\%$ , 나지의 경우  $7.4 \sim 30.4\%$ 로 평균  $19.4\%$ 로 나타났다.

김 등(2008)도 경사도를 15, 30 및 45%로 두고  $22 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ 의 강수조건에서 3시간동안 인공강수하여 carbendazim, carbofuran, chlorpyrifos, cypermethrin, dimethomorph, diniconazole 및 endosulfan 등 7종의 농약에 대한 유출수 중 유출률을 조사하였다. 유출수중 농약검출량은 모든 시험구에서 초기 30분의 강우조건에서 높았으며, 경사도에 따라 증가하는 경향이 있다. 또한 유출수중의 유출량은 농약의 수용해도와 관계가 깊었으며, carbofuran, dimethomorph 및 diniconazole 등에서 높은 수준을 나타냈다고 하였다.

## 흡착, 탈착

토양에 처리된 농약은 화학적 특성에 따라 토양 유기물이나 토양 중 점토광물에 흡착되는 속도나 흡착량의 차이가 날 뿐만 아니라 토양 수분이나 강우에 의한 물의 공급시 흡착된 양의 일부가 탈착되어진다. 따라서 토양 중에서 농약의 흡착에 미치는 영향과 흡착과정의 메카니즘을 이해하는 것은 토양 중 농약의 행적과 관련하여 매우 중요한 과제라고 본다.

김 등(1996a)은 2종의 토양을 대상으로 제초제 quizalofop-ethyl의 토양흡착에 관해 연구하였는데, 토양흡착시 평형에 도달하는 시간은 24시간이었으며, 토양유기물과 온도에 비례하여 흡착량이 증가하는 것을 확인하였다. 또 2종 토양에 대한 흡착계수는 미사질양토인 연곡토와 남원토에서 각각 4.710과 10.414라고 하였다.

김(1996c)은 trifluralin의 식양토 중 Freundlich의 등온흡착 실험에서의  $k_d$ 값은 9.97로 강력한 흡착이 일어난다고 했으며, 탈착의  $k_d$ 값은 664로 흡착에 비해 65배나 크다고 했다.

권과 이(1997)는  $^{14}\text{C}$ 으로 표지된 imazapyr의 토양흡착 연구에서 imazapyr의 평형농도 도달시간은 약 3시간이었으며, 흡착율은 0.25~28.32%로 나타났는데 유기물함량이 점토함량에 비해 흡착율에 더 많은 영향을 주었다고 보고하였다.

양 등(1997)은 flupyrazofos의 흡착실험을 수행한 결과 이 약제는 흡착이 빨리 이루어져 30분후에 45%, 그리고 6~12 시간에는 평형에 도달한다고 하였다. 처리량의 50%가 흡착되는 시간은 사양토에서 5.8시간이었고, 흡착양상은 Freundlich의 등온식에 의해 설명된다고 하였다.

김 등(1997a)은 alachlor, captafol, chlorthalonil, chlorpyrifos, EPN, metolachlor 및 phorate에 대한 흡착실험을 실시하여 이들 약제의 흡착계수를 구하였는데, k 값은 EPN, 257.9 > chlorpyrifos, 207.0 > captafol, 94.9 > phorate 34.1 > chlorthalonil 21.3 > alachlor 16.2 > metolachlor 15.6의 순이었다고 보고하였다.

문과 김(1998)은 napropamide의 흡착연구에서 경식토, 미사질식토 및 사양토에서의 흡착분배계수( $k_a$ )값은 각각 11.39, 8.74 및 5.38이었으며, 유기물함량과 점토함량이 흡착에 영향을 주었다고 보고하였다.

이 등(1998d)은 paraquat의 토양 중 흡착 및 탈착특성을 연구하였는데, 점토광물인 montmorillonite와 kaolinite, 유기물인 humic acid와 fulvic acid 및 2종의 토양을 대상으로 흡착실험을 수행한 결과 paraquat의 흡착률은 montmorillonite > humic acid > fulvic acid > kaolinite > 사양토 > 경식토의 순이었으며, 흡착형태별로는 humic acid와 fulvic acid의 경우에 loosely bound 형태가 토양보다도 많은 것으로 나타났다고 보고하였다.

한 등(1998)은 fenoxaprop-p-ethyl을 미사질식토와 사양토에 처리하여 흡착실험을 한 결과, 진탕 30분후에 처리량의 15%가 흡착되었으며, 6시간 이후에는 완만한 흡착을 보였다고 했으며, 8~14시간 사이에 의사평형에 도달하였는데 이때의 흡착량은 25~30%로 미사질식토에서 높았다. 또한 이들은 두 토양에서의 50% 흡착에 걸리는 시간( $t_{1/2}$ )은 미사질식토는 15.8시간, 사양토는 19.34시간이라고 보고하였다.

전 등(1998)은 paraquat의 국내과수원 토양에서의 흡착능을 SAC-WB(strong adsorption capacity measured using wheat bioassay)에 의해 토성별로 제시하였는데 점토가  $466.1 \pm 155.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 로 가장 높았고, 양질사토의 경우가  $40.4 \pm 3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 으로 가장 낮았으며, 평균 paraquat 흡착능은  $276.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 이라고 보고하였다.

이와 김(1998e)은 경식토와 사양토에 oxadiazon을 처리하여 흡착양상을 조사하여 Freundlich식에 잘 부합됨을 밝혔

고, 흡착계수(K)는 경식토 31.79와 사양토 22.0으로 이들 두 토양에서  $\text{H}_2\text{O}_2$ 로 유기물을 제거한 후 처리된 1.28 및 3.60보다 훨씬 크므로 유기물 함량이 흡착에 영향을 준다고 하였다. 또한 흡착실험에서도 oxadiazon의 탈착률은 경식토에서 51.1%, 사양토에서 58.5%로 유기물이 제거된 토양에서의 88.3%와 84.6%보다 낮았다고 보고하였다.

오 등(2000)은 제주도 감귤원에서 19개 토양통을 대상으로 alachlor, chlorpyrifos, diuron, diniconazole, metribuzin, metolachlor 및 linuron 등 8종의 농약에 대한 흡착특성을 조사하였다. 유기탄소함량에 따른 흡착형태를 비교하여 보았는데, alachlor와 chlorpyrifos는 유기탄소함량과 무관하게 C형 흡착형태를, diuron과 diniconazole은 L형 등온흡착형태를, metribuzin, metolachlor 및 linuron은 유기탄소 함량이 낮은 토양에서는 S형을 보였으나 유기탄소 함량이 높아지면서 C형 및 L형으로 변하는 것으로 나타났다고 보고하였다.

문과 김(2000)은 butachlor, oxadiazon, pretilachlor, thiobencarb 등 4종의 제초제에 대한 흡착특성을 중식토를 대상으로 실시하였는데, 4종의 제초제 모두 진탕시간과 흡착량 사이에는 유의성 있는 상관관계가 성립되는 것을 알 수 있었고, 흡착비율은 butachlor > pretilachlor > oxadiazon, thiobencarb의 순이었으며, 진탕 30분부터 7시간까지는 직선식에 따랐고, 7~10시간에 의사평형에 도달하였다고 했다. 또한  $k_a$ 값은 pretilachlor가 2.859, oxadiazon 1.399, butachlor 1.343, 그리고 thiobencarb는 0.612라고 보고하였다.

홍 등(2001)은 니코틴계 살충제인 acetamiprid의 흡탈착에 관해 보고하였는데, 사양토를 대상으로 풍건토, 산화토양, 산화 후 유기물첨가 및 점토광물 첨가 등으로 구분하여 실험하여 12시간 진탕 후 약제농도별로  $k_a$ 값을 구하여 처리구별로 비교하였다. 토양유기물을 산화시켜 제거한 경우에는 풍건토에 비해 현저히 흡착량이 줄어드는 것을 확인하였고, 유기물첨가에서는 fulvic acid 첨가가 humic acid 첨가보다 더 많은 흡착현상이 있었음을 설명하였다. 또한 탈착실험에서도 유기물을 처리한 처리구에서의 탈착량이 가장 낮았으며 점토광물 첨가 처리구 중 kaolinite 처리구는 montmorillonite 처리구보다 탈착이 잘 일어난다고 보고하였다.

김 등(2002a)은 butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprothiolane 및 procymidone 등 5종의 농약에 대해 사양토, 양토 및 사양토에서의  $K_d$ 값을 비교하였는데 사양토의 경우 butachlor 13.0~9.9, ethoprophos 0.8~0.3, iprobenfos 2.9~0.7, isoprothiolane 3.2~1.9, procymidone 2.8~2.1이었고, 양토에서는 butachlor 24.0~17.0, ethoprophos 1.8~0.4, iprobenfos 3.9~1.0, isoprothiolane 4.4~2.9 그리고 procy-

midone 6.0~3.9이었으며, 식양토에서는 butachlor 7.5~8.1, ethoprophos 0.4~0.3, iprobenfos 1.3~0.7, isoprothiolane 1.5~1.4 그리고 procymidone 1.8~1.0으로 조사되었다고 하였다.

김 등(2002c)은 인삼재배토양에서의 procymidone의 흡착에 관한 연구에서 4종의 인삼재배토양에서의 흡착양상을 Freundlich의 등온흡착식에 적용한바 procymidone의 흡착은 토양유기물함량에 비례하는 것을 확인하였고, 계산된  $k_a$  값은 토양별로 513~743의 범위로 토양 중 이동성이 낮은 것으로 판단하였다.

김 등(2003b)은 제초제 mefenacet를 6개의 토양통을 대상으로 흡착실험을 수행하였으며, 흡착계수  $k_d$  값은 미사질식양토인 남원통이 가장 높아 89.2를, 그리고 사양토인 대전통이 2.27로 가장 낮은 값을 보였으며 토성별로 흡착상수의 크기는 미사질식양토 > 미사질양토 > 양질사토 > 사양토의 순이라고 하였다.

경 등(2004)은 살균제 hexaconazole의 흡착 및 용탈특성을 연구하였는데, 사양토와 사질식양토를 대상으로 흡착실험을 수행한 결과 토양흡착성은 Freundlich 등온흡착식에 부합하였으며,  $K_f$  값은 10.56~18.01로 토양용탈성이 매우 낮은 것으로 예측하였다.

황 등(2004)은 신규제초제 후보 화합물인 EK-5439를 대상으로 벤토나이트에 대한 흡착실험을 실시하여 대조약제인 oxadiazon에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났다고 했는데, 흡착력은 피를 이용한 생물검정방법을 이용하였다.

최 등(2005)은 procymidone을 3종의 토양에서 흡착 및 탈착실험을 하여 사양토인 남계통과 지곡통에서의  $k_d$  값은 각각 9.84~14.23(12.18)과 1.81~5.30(2.75)이며, 식양토인 백난통에서는 2.81~6.23(3.56)이라고 하였다. 또 탈착실험에서 남계통은 20.1~34.0(평균28.0%), 지곡통 26.3~44.6(평균 33.3%) 그리고 백난통은 31.6~50.9%(평균46.3%)로 유기물함량과 깊은 관계가 있음을 보고하였다.

김 등(2005b)은 유기인계 및 카바메이트계 농약의 토양흡착성과 용탈잠재성을 평가하였다. 5종의 유기인계와 4종의 카바메이트계 농약에 대해 4개의 토양을 대상으로 흡착실험을 수행한 결과 카바메이트계 살충제인 fenobucarb와 metolcarb 및 카바메이트계 제초제인 molinate의 흡착력이 낮았으며 동시에 용탈잠재성이 크다고 보고하였다.

임 등(2006)은 살충제 imidacloprid의 논토양 흡착실험을 통해 사질양토인 안산통과 수원통을 대상으로 실험하여 Freundlich의 흡착상수는 각각 2.60과 1.72로 유기물함량과 비례한다고 보고하였다.

안 등(2006)은 사질식양토와 미사질식양토에서 살균제 pencycuron의 흡착은 미사질식양토의 경우 48시간 후에 65%정도 그리고 사질식양토는 60%정도 이루어졌다고 했으며, 흡착양상은 Freundlich의 등온식에 부합되었고 흡착분배계수  $k_a$  값은 사질식양토에서 1.45, 미사질식양토에서 1.68이라고 보고하였다.

김 등(2006a)은 alachlor, ethalfluralin, pendimethalin 및 ethoprophos 등 4종의 농약에 대해 흡착 및 탈착 반응에서의 흡착계수( $K_d$ )와 유기탄소기준 흡착분배계수( $K_{oc}$ )로 제시하였는데, alachlor의 경우 흡착반응시  $K_d$  값은 1.2~2.0,  $K_{oc}$ 는 140, 탈착반응시는  $K_d$  2.2~2.8,  $K_{oc}$ 는 240이었고, ethalfluralin은 흡착반응시  $K_d$  값은 56,  $K_{oc}$ 는 5200, 그리고 탈착반응시  $K_d$  94,  $K_{oc}$ 는 8700을 나타내었으며, pendimethalin의 경우에는 흡착반응시  $K_d$  104,  $K_{oc}$ 는 9600이었고, 탈착반응시에는  $K_d$  189와  $K_{oc}$ 는 17500이었고, ethoprophos의 경우에는 각각 0.8~1.7과 110, 그리고 2.1~2.6과 200이었다고 하였다.

김 등(2007)은 endosulfan의 흡착계수에 관해 실험하였는데  $\alpha$ -endosulfan의 경우에는 흡착반응시  $K_d$  값은 84,  $K_{oc}$  값은 7,800이었고, 탈착반응시의  $K_d$  값은 93,  $K_{oc}$  값은 8,600이라고 하였다. 또  $\beta$ -endosulfan의 경우에는 흡착반응의  $K_d$  값은 117,  $K_{oc}$  값은 10,800이었으며, 탈착반응시  $K_d$  값은 131,  $K_{oc}$  값은 12,100이라고 하였으며, endosulfan sulfate의 경우에는 흡착반응시  $K_d$  값이 77,  $K_{oc}$  값은 7,100이었고 탈착반응시에는  $K_d$  값이 78,  $K_{oc}$  값이 7,200으로 endosulfan의 이성질체와 대사산물의 흡착계수가 상이 하다고 보고하였다.

김과 김(2009)은 제초제 bentazon과 5종의 대사산물에 대해 경식토를 대상으로 수행한 연구에서 bentazon의  $K_f$  값은 0.55이었으며 8-hydroxybentazon은 316.5로 가장 높았고, 2-aminobenzoic acid가 8.09로 그 다음 순이었다고 하였다. Langmuir의 등온흡착식에 따른 최대흡착량  $Q^\circ$ 는 bentazon의 경우  $3.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 이었으나 8-hydroxybentazon은  $3448 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 로 아주 높았고, N-methylbentazon이  $77.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 로 다음 순을 나타냈다. 또한  $k_d$  값은 bentazon이 0.19, 8-hydroxybentazon이 29.74 그리고 N-methylbentazon은 1.72를 나타냈다고 보고하였다. 그리고 bentazon과 그 대사산물의 흡착기작은 bentazon, deisopropylbentazon 및 8-hydroxybentazon은  $\text{NH}_2$ 와 anion exchange phase에서 친화성이 있으며, N-methylbentazon은  $\text{C}_{18}$ 에 큰 친화력을 보였으나 normal phase인 silica-gel에는 친화력이 상대적으로 낮았고, 2-aminobenzoic acid의 경우는 pH 3.0에서는  $\text{COOH}$ 와 cation exchange phase와 pH 7.0에서는  $\text{NH}_2$  및 anion exchange phase에 흡착량이 많았다고 보고하였다.

## 용 탈

용탈 특성은 토양에 처리된 농약성분이 토양수분을 따라 이동하여 지하수로 유입되는 과정에서 매우 중요하다. 특히 수용성이 큰 농약들은 지하수 오염과 관련하여 볼 때, 농토양에서의 농약성분의 용탈이 큰 경우에는 발토양보다 훨씬 지하수 오염가능성이 높기 때문에 용탈정도를 파악하는 것은 필수적인 연구라고 본다.

김(1996c)은 trifluralin의 토양용탈을 토양 column과 포장 조건에서 실험하였는데, 토양 column 실험에서 3배 pore volume을 사용하여 침출하는 경우, 처리량의 0.007% 수준으로 용탈되었으며, 포장에 1683 g·ha<sup>-1</sup>의 수준으로 살포한 후 62일 후 1 m~2 m의 지하수에서의 trifluralin 함량은 0.04~0.08 ng·mL<sup>-1</sup>이었다고 보고하였다.

경 등(1998)은 제초제 <sup>14</sup>C-bentazon을 이용하여 3종의 토양을 대상으로 토양 column 실험을 실시하였는데, 용탈된 방사능은 벼를 재배하지 않은 경우에는 약 91~92%이었으며, 벼를 재배한 경우에는 21~50%라고 했으며, pH가 높고 유기물 함량이 낮은 토양에서 용탈이 증가하였다고 보고하였다.

이 등(1998b)은 <sup>14</sup>C-carbofuran과 <sup>14</sup>C-pretilachlor의 용탈을 알아보기 위해 2개의 토양을 대상으로 토양 column 실험을 실시하였는데, 벼를 재배하지 않은 경우 carbofuran의 용탈된 총량은 처리량의 74.8%와 92.3%이었으나, 벼를 재배한 경우에는 45.1%와 69.7%로 감소되었다. 또 pretilachlor는 벼를 재배하지 않은 경우에는 3.1%나 8.2%가 용탈되었으나 벼를 재배한 경우에는 2.4%와 5.0%가 용탈되었다고 했으며, 토양의 특성과는 CEC, 유기물 및 점토함량이 적은 토양에서 용탈이 증가하였다고 보고한다.

권과 이(1999b)는 <sup>14</sup>C-paraquat의 토양 column 중 용탈을 2개의 토양에서 벼재배 및 무재배로 나누어 조사하였는데, 벼를 재배하지 않은 경우 두 토양에서의 용탈률은 각각 0.42%와 3.87%이었으며, 벼를 재배한 경우에는 각각 0.31%와 2.79%이었고, 처리된 paraquat의 96% 이상은 0-5 cm 깊이의 토양 중에 존재하는 것을 확인하였다.

오 등(2001)은 골프장·모형그린조건에서 fenitrothion, triadimeton 및 diniconazole 등 3종의 농약의 용탈에 관해 연구하였는데, 모형그린은 0-35 cm까지는(모래 80%+ peatmoss 17% + zeolite 3%)의 혼합물로 충전하고, 35-50 cm는 모래만을 처리한 대조구와 35-50 cm에 야자활성탄, 활성탄가공처리 흡착제인 orpar 및 zeolite를 각각 처리하여 비교하였다. 대조구의 경우 fenitrothion과 triadimefon의 용출량은 0.2% 미만이었으며, diniconazole은 1.8%로 나타났다. 흡착제 처

리시 처리된 농약 모두 0.01%이하로 감소하였으며, 지하수계 유입시에도 큰 문제는 없을 것으로 평가하였다.

김 등(2002b)은 토지이용 형태를 기준으로 논, 밭 및 산림토양 각 1종씩 3종의 토양을 대상으로 butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprothiolane 및 procymidone 등 5종의 농약에 대해 토양 중 용탈과 이동성을 예측하기 위해 토주 용탈실험을 수행하였다. 토주의 길이는 30 cm이고 50 µg·cm<sup>-2</sup>의 농도로 농약을 처리하였을 때, 농약이 검출될 때까지의 용탈수의 pore volume(PV)은 ethoprophos 2-4 PV, iprobenfos 3-10 PV, procymidine 5-13 PV 수준으로 조사되었다. 또한 이런 결과를 Jury 등이 발표한 대류이동성 모형에 적용하여 실험결과와 모형예측 결과가 잘 일치하는 것을 알아내었다.

김 등(2003b)은 제초제 <sup>14</sup>C-mefenacet의 토양 column(Φ5 cm × 34 cm)중 용탈을 연구하였는데, 유기물 함량이 각각 3.1%와 1.3%로 서로 다른 2종의 토양을 대상으로 벼를 재배한 경우와 재배하지 않은 경우를 비교하였는데 벼를 재배하지 않은 경우의 용출량을 각각 4.19%와 7.09%이었으며, 벼를 재배한 경우의 용출률은 각각 1.95%와 2.69%로 나타났다.

이 등(2005)은 미사질식양토, 사양토 및 양토 등 3종의 토양과 또 각 토양별로 자갈 함량을 0%, 20%, 40% 및 60%로 하여 carbendazim, carbofuran, chlorpyrifos, cypermethrin, dimethomorph, diniconazole 및 endosulfan 등 7종의 농약을 대상으로 토양 column 실험을 통해 각 농약의 용출특성을 조사하였다. 토양별로는 사양토 > 미사질식양토 > 양토의 순으로 용출이 잘 되었고, 약제별로는 diniconazole > carbofuran > chlorpyrifos > endosulfan의 순이었으며, carbendazim이 가장 낮은 용출량을 보였다. 자갈의 함량이 증가할수록 용탈수의 이동속도 증가와 함께 시간당 농약의 이동량도 증가하는 경향이였다.

김 등(2005c)은 실내 인공강우를 이용하여 carbendazim, carbofuran, chlorpyrifos, cypermethrin, dimethomorph, diniconazole 및 endosulfan 등 7종의 농약을 대상으로 2개 토성과 3개의 경사도를 달리하고 60 mm·hr<sup>-1</sup>로 2시간동안 인공강우를 수행하여 농약의 용출량을 조사하였는데, 15%경사도 조건에서 미사질식양토에서는 carbofuran이 용탈초기(15분 이내)부터 검출되어 45분까지 증가되었다가 60분 이후에는 135분까지 비슷한 수준에서 검출된 후 150분 이후에는 급격히 감소하는 경향을 보였고, diniconazole과 endosulfan은 75분까지는 소량이지만 증가추세를 보였으며, 120분~150분까지는 diniconazole의 용탈량이 증가하는 경향을 보였다.

사양토에서는 carbofuran이 초기부터 180분까지 계속하여 용탈되는 것을 확인할 수 있었으며, diniconazole과 endosulfan

도 초기 15분 이내에 많은 양이 용탈되는 것을 확인하였다. 30% 경사도에서는 미사질식양토와 사양토 모두 초기 15분 분획부터 carbofuran이 용탈되는 것을 확인할 수 있었으며, 사양토의 경우에는 120분 시료에서 chlorpyrifos와 diniconazole 및 endosulfan이 매우 높게 검출되는 양상을 보였다. 45% 경사도에서는 carbofuran이 미사질식양토에서는 105분 분획까지 계속하여 검출된 반면, 사양토에서는 초기 15분 분획에서 carbofuran이 검출된 후 다시 90분과 120분 분획에서 각각 검출되는 것을 확인하였다. 한편 경사도가 커질수록 농약의 이동은 유출수를 통해 많이 이루어지므로 용탈되는 농약의 양은 감소하는 경향을 확실히 알 수 있었다.

김 등(2005a)은 4종의 카바메이트계 농약과 5종의 유기인계 농약을 대상으로 토성이 다른 4개 토양에서 71일간 865 mm의 강우조건에서 10 cm 토주를 이용하여 농약의 용탈 실험을 실시하였다. 4개 토양 전체로 볼 때 농약의 용탈은 metolcarb > fenobucarb > molinate > isazofos > diazinon > dimepiperate > fenitrothion > parathion > chlorpyrifos-methyl의 순이었으나, 산성인 사양토에서는 diazinon, fenitrothion, parathion만 확인되었다. 제주도의 화산회토에서는 fenobucarb, isozofos 및 molinate 만이 용탈되었다. 또한 최초 용탈에 소요되는 용탈수량은 식양토에서 metolcarb 1.1 PV(pore volume), fenobucarb 1.6 PV, molinate 1.6 PV, isazofos 2.1 PV, dimepiperate 7.7 PV, fenitrothion 8.6 PV 그리고 parathion은 13.0 PV이었으며, 흡착력이 강한 화산회토에서는 fenobucarb 6.6 PV, isazofos 11.0 PV 및 molinate는 13.0 PV이었다고 보고하였다.

임 등(2006)은 2종의 토양을 대상으로  $^{14}\text{C}$ -imidacloprid를 사용하여 28일간 용탈 실험을 수행하였는데, 유기물이 많은 토양에서는 용탈량이 적었으며 28일간 총 처리 방사능의 0.7% 수준이었으나, 유기물함량이 낮은 토양에서는 28일간 1.3% 수준이었으며, 대체로 처리 1주간에는 미미하였으나 3주후에 증가하는 경향을 보였다고 했다.

## 분해

토양 중에서 농약의 분해에 가장 영향을 미치는 것은 미생물의 활성이라고 본다. 특히 생물학적 복원(bioremediation)이 중요한 이슈로 부각되고 있는 시점에서는 더 큰 의미를 갖는다고 볼 수 있다. 그러나 농약의 분해는 미생물 이외의 물리화학적 과정이 관여할 뿐 아니라 최근에는 분해 촉진 화합물의 토양처리에 따른 분해효과도 관심을 불러일으키는 연구과제이다.

## 토양미생물 관련 연구

이와 권(1998a)은 제초제 imazapyr의 미생물에 의한 분해를 조사한 결과, 토양으로부터 분리한 균주를 순수배양하여 실험한 처리구에서는 분해산물을 확인할 수 없었다고 했으며, 두(1998)는 carbofuran의 담수토양 중 분해 연구를, 20°C에서 4주간에 걸쳐 수행한 결과 대조구에서는 처리 1주일 후에 59.3%, 그리고 처리 4주 후에는 34.7%의 carbofuran 성분이 남아 있는 반면, 멸균처리구에서는 1주후 84.2%, 그리고 4주후 52.1%로 미생물에 의한 분해를 확인하였다.

최 등(1998)은 유기인계 살충제인 fenitrothion의 분해 미생물을 환경 중에서 1071 균주를 분리하고 이 중에서 fenitrothion에 분해능이 80% 이상인 균주 28종을 2차 선발하여, 이들 균주에 fenitrothion의 농도를 증가시켜 계대배양한 후 분해율을 측정된 결과 fenitrothion의 분해산물인 3-methyl-4-nitrophenol 생성량에 따라 분해율이 낮아짐을 밝혔고, 그 결과로부터 분리된 균주의 fenitrothion 분해율은 phenol화합물에 대한 내성 정도에 크게 영향을 받는다고 보고하였다.

오 등(2000)은 제초제 dicamba를 100 mg·kg<sup>-1</sup>로 처리하여 살균토양과 비살균토양에서의 분해율을 조사한 결과 살균토양에서는 처리 후 4주까지 약 10%만이 분해되었으며, 8주 후에도 20% 미만이 분해되었으나 비살균토양에서는 2주 후에 60% 이상, 8주 후에는 80% 이상이 분해되었다고 하였다.

오 등(2000)은 토양 중에서 제초제 dicamba를 분해하는 5종의 미생물을 분리하고 각각 *Acidovorax sp.*, *Variovorax sp.* 및 *Alcaligenes sp.*로 동정하고, dicamba를 유일한 탄소원으로 하여 21일간 분해 실험을 수행한 결과 이들 균주는 dicamba를 85.7~96.6% 수준에서 분해를 하였으며, 유기배지 내에서는 *Alcaligenes sp.*로 동정된 균주가 89.93%의 높은 분해력을 보였다고 했다. 또한 한국잔디를 인산완충용액으로 추출하여 dicamba를 처리하고 37°C에서 조사한 결과 반감기가 2.5~2.7일로 토양 중에서의 반감기인 14~25일보다 훨씬 빨랐다고 보고하였다.

김 등(2003a)은 제초제 mefenacet의 살균과 비살균토양에서의 분해율을 120일간 28°C에서 항온배양하여 조사한 결과, 2개의 실험토양에서 처리후 70일에서의 반감기는 각각 68일과 55일(비살균)이었으나 살균처리구에서는 각각 151일과 131일이었다고 보고 하였다.

정 등(2004)은 살균제 tolclofos-methyl의 골프장 잔디토양에서의 분해를 조사하였는데, 기존에 약제가 처리되었던 토양에서의 분해가 약제처리가 되지 않은 토양에서의 분해보다 훨씬 빨랐고, 약제가 처리되었던 토양도 살균처리한 토양에서는 분해가 늦어지는 것을 확인하였으며, tolclofos-methyl은

연용된 토양에서 토양미생물에 의해 분해가 촉진됨을 보고하였다.

박 등(2006b)은 토양으로부터 농약분해에 관여하는 세균을 분리하기 위해 12개의 균주를 분리하고, 여러 가지 농약을 처리하여 분해능을 비교하여 분해율이 높은 균주를 선발하였는데, parathion을 6일간의 배양으로 거의 분해한 균주는 *Acinetobacter sp.*로 그리고 parathion, procymidone 및 alachlor에 대해 분해력이 비교적 높은 균주는 *Pseudomonas sp.*로 동정하였다.

### 분해에 미치는 환경요인(비생물학적 요인)

김 등(1997c)은 alachlor의 분해에 미치는 토양오염물질과 비로성분의 영향을 연구하였는데, 시험토양에서의 alachlor의 반감기는 6.4일이었으나 부숙 벧집퇴비 첨가시에는 5.8일로 단축되었고, Ca, Cr, Ni, Zn 및 Cu 등의 중금속 첨가시에는 각각 11.0, 8.3, 7.9, 7.2 및 6.7일로 반감기가 길어지는 것을 확인하였다. 아울러 합성세제 첨가시에는 7.5일로 길어진다고 하였으며, 이런 결과는 중금속이나 합성세제가 분해 미생물 생육에 영향을 준 것이라고 판단하였다.

이와 권(1998a)은 3종의 감광제와 바이오세라믹을 토양에 처리할 때 제조제 imazapyr의 분해에 미치는 영향을 연구하였는데, 자연광 하에서의 무처리는 14.6%의 분해율을 보인 반면, 감광제로 사용한 PS-1(semiconductor catalyst)은 100 및 200 mg·kg<sup>-1</sup>의 처리에서는 각각 26.7%와 90.0%의 분해율을 나타내었다. 또한 bioceramic의 원적외선 방사가 분해 미생물에 미치는 영향을 보기 위해 0.3%로 처리하여 7주 동안 비교해본 결과 5주 이후에는 처리구에서 CO<sub>2</sub>의 발생이 증가하는 것을 확인하였다.

두(1998)는 담수토양 중 carbofuran의 분해에 미치는 cellulose와 황산염의 영향을 조사하였는데, 4주간의 조사결과 무처리구에서의 분해율이 가장 높았으며, 다음으로는 10% cellulose 처리 > 10% cellulose + 1% FeSO<sub>4</sub> > 10% cellulose + 1% MgSO<sub>4</sub>의 순으로 분해가 저해되는 것을 확인하였다. 특히 MgSO<sub>4</sub>의 처리는 4주후 잔존하는 carbofuran의 함량이 65.1%로 무처리구의 34.3%에 비해 거의 2배나 되는 것으로 조사되었다.

이 등(1998c)은 6종의 감광제를 사용하여 토양과 작물체 중에서 procymidone, vinclozolin 및 carbendazim의 분해에 미치는 영향을 조사하였다. 토양 중에서 procymidone은 방향족아민을 처리한 경우 3일후에 대조구 잔류량의 59% 수준으로 감소하였고, vinclozolin의 경우에도 방향족 아민을 처리한 경우, 처리 1일에는 대조구의 71%로 그리고 15일 후

에는 대조구의 21%로 감소되었다. 그러나 carbendazim의 경우에는 감광제의 효과가 크게 나타나지 않았다고 보고하였다. 또한 토마토에 살포된 procymidone은 방향족 ketone을 처리한 15일후에는 무처리에 비해 47%나 감소하였고, 고추에서는 방향족아민을 처리한 경우 15일 후에 무처리에 비해 57%나 감소하였다. 또 vinclozolin의 경우에도 토마토에 방향족아민을 처리하고 1일과 15일 경과 후에는 각각 대조구의 38%와 56%로 감소되었고, 고추에서는 각각 82%와 64%로 감소되었다고 보고하였다.

안과 이(2000)는 감광제에 의한 수용액 및 토양 중에서 제조제 quinclorac의 광분해 촉진 효과에 관해 연구하였으며, 수용액상에서는 방향족 ketone, quinone 그리고 반도체 광촉매가 각각 96.6%, 72.7% 그리고 95.7%의 광분해율을 보였으며, 모래에서는 quinone계 감광제가 64.1%로 가장 높은 광분해 촉진효과를 나타낸다고 하였다.

오 등(2000)은 제조제 dicamba의 자연광하에서의 분해율을 조사한 결과, 토양에 처리한지 9주후에 3.3%의 분해율을 보였다고 했다.

김 등(2003a)은 유기물함량의 각각 3.1%와 1.3%인 2토양에서 제조제 mefenacet의 분해율을 조사하였는데, 토양 중 분해율은 유기물함량과 큰 관계를 보이지는 않았으며, 포장용수량을 달리하여 조사한 결과 20% 포장용수량조건에서의 반감기는 83일이었으나, 50%와 80%의 포장용수량조건에서는 각각 73일과 61일로 반감기가 짧아지며 분해가 촉진되는 것을 보고하였다.

임 등(2004)은 살충제 <sup>14</sup>C-imidacloprid를 사용하여 물과 담수토양조건에서의 광분해에 관한 연구를 수행하였으며, 물 중에서 imidacloprid는 수산화합물로의 전환이 빨라 처리 7일에는 수상 : 유기상의 분포비가 80 : 20이었음을 밝혔다. 아울러 광분해산물인 imidacloprid urea를 물과 담수토양조건 모두에서 확인하였는데, 물중에서 imidacloprid urea의 농도는 1일후 0.0112 mg·kg<sup>-1</sup>에서 7일 후 가장 높은 0.0391 mg·kg<sup>-1</sup>을 기록하고 점차 낮아져 60일 후에는 확인할 수 없었고, 담수토양조건에서는 처리 후 3일에 최고농도인 0.0259 mg·kg<sup>-1</sup>에 도달한 후 감소하는 것을 확인한 바 있다.

박 등(2005)은 제조제 molinate의 논토양환경 중에서의 분해특성을 조사하였는데, 물 중에서의 반감기는 순수물만 있는 경우보다 물-토양의 경우에서 빨랐으며, 후자의 경우 반감기는 4.1일이었다. 그러나 두 처리 모두 처리 28일 후에는 95% 이상이 소실되었다. 또한 물중 광분해율은 순수한 물보다 서호물에서 다소 높았고, 우리나라의 평균 일사량인 약 820 J·cm<sup>-2</sup>의 정도에서는 담수상태에서 13.5일에 약 43%정



도의 광분해가 일어날 것을 예상하였다. 그리고 광감제를 첨가한 경우에는 처리된 감광제 7종 모두가 무처리보다 분해율이 높아 광분해를 촉진하는 것으로 조사되었으며 특히  $H_2O_2$ 는 98%의 분해율을 보여 대조구인 25%보다 훨씬 높은 광분해율을 나타내었다고 보고하였다.

최 등(2005)은 procymidone의 토양중 광분해를 실시하였는데, 자연광 하에서의 반감기는 남계통 121.6일, 지곡통 81.5일, 그리고 백산통에서 106.6일이었으며, 대체로 21일 경과 후에도 20% 미만만이 분해되었다고 보고하였다. 또한 물중에서의 procymidone의 반감기는 25°C에서 pH 4.0, 7.0 및 9.0에서 각각 85.5일, 65.3일과 0.2일 미만이었으나 40°C에서는 각각 22.2일, 18.9일 및 0.2일 미만으로 나타났다고 했다.

안 등(2006)은 살균제 pencycuron의 토양온도에 따른 분해율을 조사한 결과 토양온도가 12°C에서 28°C로 상승함에 따라 반감기는 1/4.5 정도로 짧아진다고 했으며, 동시에 포장용수량의 30%, 50%, 그리고 70% 조건에서 반감기를 조사하였는데, 각각 38일, 30일 및 21일로 수분이 많은 조건에서 반감기가 짧아졌다고 했다. 또한 토성별로는 사질식양토에서의 반감기는 25일, 미사질식양토 22일로 나타났음을 보고하였다.

## 토양 중 행적

토양 중에서 농약의 행적(fate)은 앞에서 살펴본 유실, 흡착, 탈착, 용탈 및 분해 등 모든 연구들이 다 관련된 복합적인 내용이라고 본다. 그러나 행적과 관련된 연구에서는 주로  $^{14}C$ -표지 화합물을 사용하여, 처리된 농약 중 어느 정도가 대기 중으로 휘산되었는지, 작물체로의 이행은 얼마 만큼인지 또 토양 중에서 수용성 또는 용매 추출분획에는 얼마만큼 분포하는지를 연구대상으로 삼는 것을 포함하고 있다.

경 등(1998)은 3종의 토양을 대상으로 토양 column중 제초제  $^{14}C$ -bentazon을 이용하여 비 재배와 무 재배시의 행적에 관해 연구하였다. 9주간의 실험기간 중  $^{14}CO_2$ 의 발생량은 총처리 방사능의 0.2% 미만이었으며, 토양결합 잔류물은 0~10 cm 부위에 약 3~4%, 그리고 10~20 cm 부위에는 1% 미만이었다. 비를 재배한 경우에 토양 중에 남아 있는 총 방사능 중 68.73~82.16%는 0~10 cm 깊이의 토양 분획에서 물에 의해 추출되었으며, 10~20 cm 분획에서는 12.00~16.80%가 물에 의해 추출되었다.

이 등(1998b)은  $^{14}C$ -carbofuran과  $^{14}C$ -pretilachlor를 사용하여 2종의 토양을 대상으로 토양 column 실험을 수행하였는데, carbofuran을 처리한 토양에서는 처리된 총 방사능 중 10% 미

만이 토양에 남아 있었으며 그중 90% 이상이 methanol 비추출성 토양결합잔류물이었고, pretilachlor의 경우에는 90% 이상이 토양에 존재하였으며, 이중 약 25.7~55.2%가 용매에 의해 추출되었음을 보고하였다.

안 등(1998)은  $^{14}C$ -quinclorac을 토양에 처리하여 60일간 숙성된 토양과 실험직전에 처리한 2가지 토양을 pot에 넣은 후 비를 재배한 조건과 재배하지 않은 조건에서  $^{14}C$ -quinclorac의 변화양상을 연구하였다. 비 재배와 무관하게 토양에서 방출된  $^{14}CO_2$ 는 총량의 2.2% 이하이었고, 비로 이행된  $^{14}C$ -quinclorac 함량은 유기물함량과 점토함량이 적은 토양에서 더 많았으며, 실험직전에 처리한 토양에서의 이행량이 더 많았다고 하였다. 실험 후 비를 재배한 토양 중에는 총 방사능 중 84.5~86.3%(고 유기물 및 고 점토 함유토양)과 61.8~67.7%(저 유기물 및 저 점토함량 토양)의 방사능이 검출되었다. 그러나 비를 재배하지 않는 토양에서는 98.3% 이상의  $^{14}C$ -quinclorac이 잔류하였다. 한편 토양 중 추출불가 잔류물은 토양유기물 중 fulvic acid 분획에 주로 혼입되어 있었다.

권과 이(1999a)는  $^{14}C$ -paraquat를 사용하여 안 등(1998)의 실험방법과 동일하게 토양 중 잔류물의 행적을 연구하였다. 2가지 토양은 유기물은 낮으나(1.2%) CEC가 높은(101.3 mmol(+) $\cdot$ kg $^{-1}$ ) 사양토와, 유기물이 높은(2.4%) 반면 CEC가 낮은(81.0 mmol(+) $\cdot$ kg $^{-1}$ ) 사양토를 사용하였다.  $^{14}C$ -paraquat를 처리하여 6주간 숙성시킨 토양과 실험직전에 약제를 처리한 토양을 각각 pot에 넣은 후 옥수수를 4주간 재배하여  $^{14}C$ -paraquat의 행적을 조사하였다. 6주간의 토양 숙성기간과 4주간의 옥수수재배기간을 합친 10주 동안 2종의 토양에서  $^{14}CO_2$ 로 무기화된 양은 총 방사능의 0.13~0.18%와 0.02~0.17%이었으며, 옥수수에 흡수 이행된  $^{14}C$ 의 양은 2토양 모두에서 각각 0.1%와 0.01% 미만이었고, 토양 중에 남아있는  $^{14}C$ 의 양은 2토양 모두 97.0% 이상이었다. 토양 중에 남아있는 paraquat 성분 중 물에 의한 추출율은 1.2%로 매우 낮았고, 대부분의 추출불가 토양잔류물은 humin 분획에 혼입되어 있었다.

권과 이(1999b)는 2종류의 토양을 대상으로 토양 column을 이용하여 비의 재배 유무에 따른  $^{14}C$ -paraquat의 행적을 조사하였다. 117일간 비를 재배한 경우 비에 흡수된  $^{14}C$ 의 양은 2종류의 토양에서 각각 3.89%와 2.79%이었으며, 총 처리량의 96%이상  $^{14}C$ -paraquat가 토양 중 0~5 cm 깊이에 남아 있었다고 하였다. 토양 중 물에 의해 추출된  $^{14}C$ 의 양은 6.10~9.10%이었으며, 추출불가 토양잔류  $^{14}C$ -paraquat 성분은 humin > humic acid > fulvic acid 분획의 순으로 잔류하고 있었다.

안 등(1999)은 살균제인  $^{14}\text{C}$ -propiconazole을 토양에 처리하고 토심별(0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm)로 살균 및 비살균조건에서의 행적을 20주간 연구하였다. 멸균토양에서의 20주간 발생된  $^{14}\text{C}$ 의 양은 토심에 따라 0.7~1.3%이었으며, 비멸균토양에서는 4.8~7.6%이었다. 토심별로 유용성 용매와 수용성 용매에 대한 경시적 추출 비율은 살균 토양의 경우 0~20 cm에서는 2주후에 유용성분획에 72.4%, 수용성 분획에 10.4% 이었으나, 20주후에는 유용성 분획에 45.7% 그리고 수용성 분획에 28.5%로 변화를 보였으며, 20~40 cm 및 40~60 cm 토심에서도 비슷한 경향이였다. 비살균토양에서는 전반적인 회수율은 살균토양보다 낮았으며, 처리 2주 후에 0~20 cm 깊이에서는 유용성 분획에 64.3%, 수용성 분획에 8.0%이었으나 20주 후에는 유용성 분획에 24.3%, 수용성 분획에 24.4%를 나타냈다. 20~40 cm 및 40~60 cm 토심에서도 비슷한 경향이였다. 또 그들은 propiconazole의 대사산물은 GC/MS를 이용하여 조사한 결과 ketone 화합물로 확인하였다.

김과 서(1999)는  $^{14}\text{C}$ -propiconazole을 사용하여 토양 lysimeter 실험을 2년간 연속하여 벼를 재배하면서 수행하였다. 약제는 벼이앙 15일 후에 lysimeter 토양 표면에 1회 처리하였다. 시험 기간동안 lysimeter 토양에서 방출된  $^{14}\text{CO}_2$ 는 1년차에 5.7%, 2년차에는 7.8%이었으며, 토양 중 잔류 방사능은 대부분 토심 20 cm 미만에 존재하였고, 벼에 흡수이행된  $^{14}\text{C}$ 의 양은 1년차에 3.7%, 그리고 2년차에는 7.6%이었다.

곽 등(2000)은 혐기조건에서 2종의 토양을 사용하여 제초제  $^{14}\text{C}$ -bifenox의 토양 중 분해에 관해 연구하였는데, 유기물 함량이 낮은(1.2%) 식양토에서 발생된 총  $^{14}\text{CO}_2$ 는 1.97%이었으며, 유기물 함량이 높은(2.3%) 사양토에서는 0.98%이었다. 또한 토양중 methanol에 의해 추출된 방사능은 식양토의 경우 배양초기 85.7%이었으나 180일 이후에는 39.3%로 감소되었고, 사양토에서는 73.7%와 20.9%를 나타내었다. 또한 토양 중에 비추출성  $^{14}\text{C}$ 의 총량은 2토양 모두 humin > humic acid > fulvic acid 분획의 순이었으며, 식양토의 경우에는 처리 1일 후 fulvic acid 분획에 0.97%, humic acid 분획에 0.98% 그리고 humin 분획에 5.83%이었으나, 180일 후에는 fulvic acid 분획 7.23%, humic acid 분획 8.73% 그리고 humin 분획에는 44.76%이었다. 사양토에서는 1일 후 fulvic acid 분획 1.10%, humic acid 분획 1.16%, humin 분획 16.97%이었으나 180일 후에는 fulvic acid 분획 3.43%, humic acid 분획 6.60%, 그리고 humin 분획에서는 69.09%가 잔류하였다. 한편 bifenox의 대사산물을 GC/MS로 분석한 결과 nitrofen, 5-(2,4-dichlorophenoxy)-2-nitrobenzoate,

2,4-dichlorophenoxy aniline 그리고 methyl-5-(2,4-dichlorophenoxy) anthranilate로 확인되었다.

김 등(2003b)은 제초제인  $^{14}\text{C}$ -mefenacet를 이용하여 토양 column 실험을 벼 재배와 무 재배 조건에서 수행하였다. 처리 후 119일 후에 벼를 재배한 경우 토양에서는 79.85~83.41%, 수도체에서 8.39~8.96%의 방사능이 검출되었으며, 벼를 재배하지 않은 경우에는 토양 중에 84.52~89.50%가 남아 있음을 보고하였다.

경 등(2004)은 사양토를 대상으로  $^{14}\text{C}$ -hexaconazole의 행적에 관해 연구하였다. 약제 처리 후 28일간 숙성을 시킨 토양과 숙성시키지 않고 실험직전 처리한 2가지 토양구에서 벼를 재배한 경우와 재배하지 않은 경우를 비교하였고, 아울러 후작인 배추 중 토양으로부터 이행량을 조사하였다. 28일간의 숙성기간 중 방출된  $^{14}\text{CO}_2$ 의 양은 총 방사능의 0.11%이었으며, 42일간의 벼 재배기간 중 방출된  $^{14}\text{CO}_2$ 의 양은 숙성된 토양의 경우, 벼를 재배하지 않은 토양에서는 0.67%, 벼를 재배한 토양에서는 1.17%이었으며, 숙성되지 않은 토양에서는 각각 1.25%와 1.72%로 나타났다. 벼에 의한  $^{14}\text{C}$  방사능의 흡수이행량은 숙성토양에서는 1.01%, 숙성되지 않은 토양에서는 1.70%이었으며, 토양 중 잔류하는 방사능은 숙성토양의 경우에 벼를 재배한 구에서는 101.05%, 벼를 재배하지 않은 토양에서는 100.77%이었고, 숙성되지 않은 토양에서는 벼를 재배한 구에서 96.29%, 벼를 재배하지 않은 구에서는 93.39%라고 하였다. 토양 중 추출불가 잔류량은 숙성토양에서 벼를 재배하지 않은 경우 70.87%, 벼를 재배한 경우에는 73.46%로 나타났고, 숙성되지 않은 토양에서는 벼를 재배하지 않은 경우 68.57%, 그리고 벼를 재배한 경우에는 71.94%로 조사되었다. 이들 추출불가 잔류성분의 토양유기물 분획에 따른 분포비율은 총추출불가 잔류량을 100%로 보았을 때, 숙성토양의 경우 벼를 재배한 구에서는 humin 분획에 57.05%, fulvic acid 분획에 40.92%, 그리고 humic acid 분획에 2.03%이었으며, 벼를 재배한 구에서는 각각 53.80%, 44.29% 그리고 1.91%이었다. 또한 숙성되지 않은 토양에서 벼를 재배한 경우에는 57.22%, 41.18% 그리고 1.6%이었고, 벼를 재배하지 않은 경우에는 각각 53.55%, 44.74% 그리고 1.71%이었다. 후작으로 재배한 배추 중 토양으로부터 흡수·이행된  $^{14}\text{C}$ -hexaconazole 총량은 실험 토양구에 따라 다소 차이가 있었으나 2.14~4.32%로 숙성되지 않은 토양에서 배추를 재배하기 직전에 처리한 구에서 가장 높았고, 숙성되지 않은 토양 중 벼를 재배하지 않았던 pot에 재배한 배추에서 가장 낮은 것으로 나타났다.

박 등(2004b)은 토양에 endosulfan과 procymidone을 농도

수준별로 처리하고 엽채류(배추, 열무)와 근채류(당근, 무)에 대한 흡수·이행 수준을 파악하여 MRL이하 수준을 유지하기 위한 이들 약제의 토양 중 잔류한계를 규명하고자 하였다. Endosulfan의 경우  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서 열무에는  $0.063 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 배추에는  $0.600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이 잔류되었으며, procymidone의 경우에는  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서 열무에는  $1.100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 그리고 배추에는  $1.556 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이었고,  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서는 각각  $1.249 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 과  $4.278 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이었다. 한편 처리 3개월 후 토양 중에서는 endosulfan의 경우  $1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서는  $0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로, 또  $18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서는  $2.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 감소되었고, procymidone은  $1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구가  $0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로, 그리고  $3.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구는  $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 감소되는 것을 확인하였다. 근채류의 경우, endosulfan은 당근에 토양 중  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서  $0.144 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  농도 처리구에서는  $0.922 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 나타났고, 무의 경우  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  처리구에서는  $0.222 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  수준으로 잔류하였다. procymidone은 토양 중  $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 의 농도에서 무와 당근에 각각  $0.041 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 과  $0.060 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이었으며,  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 의 농도에서도 각각  $0.093 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 과  $2.167 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 그리고  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  수준에서는  $0.257 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 과  $5.081 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 잔류되는 것으로 나타났다. 즉, 토양 중 농도에 비례하여 작물체중의 농도로 증가하는 경향을 재차 확인하였다.

이 등(2004a)은 제조제  $^{14}\text{C}$ -bensulfuron methyl의 행적을 연구하기 위해 2종의 서로 다른 농토양에 약제를 처리하고 13주간 숙성시킨 토양과 실험직전 토양에 약제를 처리한 토양으로 구분하고, 이들 토양을 pot에 넣고 벼를 12주간 재배하였다. 13주간의 숙성기간 중 방출된 총  $^{14}\text{CO}_2$ 의 양은 2개 토양에서 각각 6.79%와 10.15%이었으며, 기화된 양은 0.01% 미만이었다. 벼 재배기간 중에 방출된 총  $^{14}\text{CO}_2$ 의 양은 토양의 종류에 따라 차이가 있었는데 유기물 함량이 높은(3.59%) 사질식양토의 경우에는 숙성시키지 않은 토양에 벼를 재배하지 않은 처리구에서 약 4.30%, 벼를 재배한 처리구에서는 약 6.10%이었고, 숙성토양은 벼를 재배하지 않은 처리구에서는 약 2.30%, 그리고 벼를 재배한 토양에서는 약 1.20% 정도로 나타났다. 또한 유기물 함량이 낮은(1.62%) 사양토에서는 숙성시키지 않은 토양에 벼를 재배하지 않은 처리구에서는 약 7.60%, 벼를 재배한 처리구에서는 약 3.20%이었고, 숙성시킨 토양에 벼를 재배하지 않은 경우는 약 5.50%, 그리고 벼를 재배한 경우에는 약 2.30%이었다. 한편 12주간의 벼 재배기간 중 수도체로 흡수·이행된 양은 사질식양토의 경우 숙성시키지 않은 토양에서는 1.53%, 숙성시킨 토양에서는 4.04%이었고, 사양토에서는 각각 4.40%와 6.37%로 나타났다. 토

양 중에 남아있는 비추출성 잔류성분은 사질식양토의 경우 숙성시키지 않은 토양에 벼를 재배하지 않은 처리구에서 29.61%로 가장 낮았고, 숙성토양에 벼를 재배한 처리구에서 44.67%로 가장 높았으며, 사양토의 경우에도 동일한 처리구에서 각각 38.48%와 60.95%로 남아있었으며, 이들의 토양유기물 분획 중 분포비율은 fulvic acid > humin > humic acid의 순이었다.

박 등(2006a)은 lysimeter를 이용하여 벼를 재배하는 환경조건에서  $^{14}\text{C}$ -molinate를 처리하여 행적을 연구하였다. 특히 1년차에 약제를 1회 처리하여 2년간 벼를 재배하면서  $^{14}\text{C}$ -molinate의 변화를 조사하였다. 토양에서 방출된  $^{14}\text{CO}_2$ 의 양은 1년차에 6.47%, 2년차에는 0.03%이었고, 토심별 분포는 1년차에 0-10 cm에 18.0%, 10-20 cm에 4.3%로 나타났으며, 2년차에는 0-10 cm에 13.3% 그리고 10-20 cm에는 1.1%로 1년차에는 총 처리 방사능의 24.8%가 토양 중에 잔류하였고, 2년차에는 총처리 방사능의 18.0%가 잔류하는 것을 알 수 있었다. 또한 수도체로의 흡수·이행은 1년차에 11.46%, 그리고 2년차에는 0.063%로 나타나 토양 중에 잔류하는  $^{14}\text{C}$ -molinate가 생물이용성이 없는 bound residue로 존재하는 것으로 볼 수 있다고 하였다.

## 토양 중 잔류 및 분석법

토양 중 반감기를 포함한 잔류특성과 모니터링결과 그리고 특별히 토양 중 잔류농약 추출 및 분석방법에 관한 연구들은 토양오염현황과 새로운 분석법의 확립 등과 관련하여 꾸준히 연구될 필요성이 있다고 본다.

김 등(1996b)은 제조제 quizalofop-ethyl을 2개의 토양에 처리하여 반감기를 조사한 결과 연곡통에서는 10일, 남원통에서는 16일로 나타났으며, 토양온도가 높아질수록 분해율이 낮아진다고 보고하였다.

오 등(1996)은 방출조절형 dicamba 입제를 제조하여 기존의 dicamba 액제와의 토양 중 잔류와 휘산을 비교하였는데, 방출조절형 dicamba 입제의 토양 중 반감기는 양토에서 50~51일, 사양토에서 50~58일인 반면에 dicamba 액제는 양토에서 24일, 사양토에서는 22일 이었다. 또한 휘산량 역시 방출조절형 입제가 액제에 비해 10배 이상 감소되는 것으로 나타났다고 하였다.

전 등(1998)은 우리나라 과수원 토양 60개소를 대상으로 paraquat의 잔류량조사를 하였는데, 사과과수원은  $3.6\sim 20.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 의 범위에서 평균  $10.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 배과수원은  $< 0.5\sim 11.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 의 범위에서 평균  $5.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 포도과수원은

2.6~10.4 mg·kg<sup>-1</sup>의 범위에서 평균 5.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 그리고 복숭아과수원은 2.9~9.7 mg·kg<sup>-1</sup>의 범위에서 평균 6.3 mg·kg<sup>-1</sup>으로 전체 평균은 6.9 mg·kg<sup>-1</sup> 수준이라고 보고하였다.

김과 김(2000)은 제주도의 해수와 저니토에서 EPN의 잔류량을 조사한 결과 검출한계 미만이었다고 보고 하였다.

정 등(2000)은 제초제 pendimethalin을 입상수화제(WG)와 캡슐현탁제(CS)로 신규 제조하여 기존의 유제와의 잔류특성을 비교하였는데, 이들 3종의 토양내 반감기는 18.8일로 유사한 것으로 나타났다.

이와 송(2001)은 제초제 cyclosulfamuron의 수도재배환경 중 잔류특성을 경산토(식양토)과 연천토(양토)를 대상으로 조사하였는데, 포장조건에서는 반감기가 17~30일, 실내 실험에서는 14~16일로 나타났으며, 토양 0~4 cm에 주로 분포한다고 보고하였다.

박 등(2004a)은 강원도 고랭지 배추경작지 토양에서의 농약오염실태조사를 수행하였는데, 농약의 검출빈도는 태백 > 정선 > 평창의 순이었고, 태백지역은 endosulfan 등 20종이, 정선지역에서는 alachlor 등 12종이 그리고 평창지역에서는 endosulfan 등 13종이 검출되었는데 월별로는 8월이 가장 많은 종류의 농약이 검출되었다고 하였다. 또한 태백지역에서 4월에는 dimethomorph가 0.678 mg·kg<sup>-1</sup>로 가장 높게 검출되었으며 6월에도 역시 dimethomorph가 0.192 mg·kg<sup>-1</sup>, 8월에는 endosulfan이 0.380 mg·kg<sup>-1</sup>, 그리고 10월에는 carbendazim이 0.663 mg·kg<sup>-1</sup>으로 가장 높은 잔류수준을 나타냈다. 정선지역에서는 4월에 cypermethrin이 0.095 mg·kg<sup>-1</sup>, 6월에는 dimethomorph가 0.286 mg·kg<sup>-1</sup>, 8월에는 procymidone이 0.147 mg·kg<sup>-1</sup>, 그리고 10월에는 dimethomorph가 0.337 mg·kg<sup>-1</sup>로 가장 높게 검출되었으며, 평창지역에서는 4월에 prothiofos가 0.507 mg·kg<sup>-1</sup>, 6월에는 dimethomorph가 0.033 mg·kg<sup>-1</sup>, 8월에는 chlorfenapyr가 0.112 mg·kg<sup>-1</sup> 그리고 10월에는 captan이 0.412 mg·kg<sup>-1</sup>로 가장 높게 검출되었다고 하였다.

박 등(2005)은 논토양환경 중 제초제 molinate의 잔류양상을 논물과 논토양으로 나누어 조사 하였으며 처리초기(0-3 일)에는 논물에 많이 잔류하였으나 7일 이후에는 토양중의 잔류수준이 높다고 하였다. 특히 토양 중에는 처리 7일후에 가장 높은 잔류수준을 보였으며, 이후에는 점차 감소하는 양상을 보였다고 했다.

권 등(1997)은 토양 중에 bound-residue로 존재하는 paraquat 성분을 추출해내기 위해 HCl 및 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 첨가와 Kjeldahl 분해장치를 이용한 새로운 방법을 제시하였는데, 기존의 추출방법과 비교하여 높은 회수율과 분석시간 단축이 있었음을 보

고하였으며, 김(1997d)은 SFE(Supercritical fluid extraction) 방법에 의해 제초제 quinclorac을 토양으로부터 분석하는 감도도 높고 간편한 방법을 제시하였다.

천과 여(2005)는 소나무잎과 토양 중 다이옥신류인 PCDD/Fs의 함량을 조사하여 대기 중 PCDD/Fs의 침착현상을 조사하였는데, 토양 중 농도는 ΣPCDDs가 7.4배, ΣPCDFs가 2.3배 그리고 이들의 합인 ΣPCDD/Fs는 5.4배정도 소나무잎의 잔류수준보다 높았다고 했으며 치환된 염소의 수가 많을수록 토양 중의 농도가 높은 것으로 보고 하였다.

박 등(2007)은 제초제 butachlor와 pyrazosulfuron-ethyl의 논토양 중에서의 경시적 잔류량을 조사하였는데, butachlor는 토양 중에서 처리 1일 후 기준량 처리시 0.72 mg·kg<sup>-1</sup>, 배량 처리시에는 1.673 mg·kg<sup>-1</sup>로 최대값을 나타냈으며 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. pyrazosulfuron-ethyl은 기준량, 배량 처리시 각각 3일 후에 0.09 및 0.018 mg·kg<sup>-1</sup>로 최대값을 나타냈으며, 14일 이후에는 검출되지 않았다고 보고하였다.

이와 권(2004c)은 HPLC를 이용하여 과일과 토양 중 살충제인 monochrotophos 잔류량 분석법을 개발하여 보고하였는데, 이는 기존의 GC분석법에서 나타나는 여러 가지 문제점을 개선하였다. 사과에서는 95.3±2.1%(n=6), 감귤에서는 97.0±0.7%(n=6) 그리고 토양에서는 92.8±4.3%(n=12)의 회수율을 나타내었다고 한다.

또한 이와 권(2004b)은 제초제 cyclosulfamuron의 토양, 물, 현미 및 벚짚에서의 잔류분석법을 HPLC를 이용하여 수행하였으며, 토양에서는 87.8±7.1%(n=12), 논물은 97.3±7.2%(n=12), 현미는 90.8±6.6%(n=6), 그리고 벚짚에서는 78.5±6.7%(n=6)로 회수율 인정 범위를 만족시켰으며, 각각의 검출한계는 토양 0.004 mg·kg<sup>-1</sup>, 논물 0.001 mg·kg<sup>-1</sup>, 현미 0.01 mg·kg<sup>-1</sup> 그리고 벚짚은 0.02 mg·kg<sup>-1</sup>이라고 보고하였다.

## >> 인 / 용 / 문 / 헌

- Ahn, K.C. and Lee, J.K. (2000). Accelerating effect of some photosensitizers on photodegradation of the herbicide quinclorac in aqueous solution and soil, *Kor. J. Pesti. Sci.* 4(4), 12~18.
- Ahn, K.C., Kyung, K.S. and Lee, J.K. (1998). Behaviour of the soil residues of the herbicide quinclorac in the micro-ecosystem (pot), *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(3), 96~106.
- An, D.H., Kim, I.S. and Suh, Y.T. (1999). Degradation of <sup>14</sup>C-propiconazole in soil from different depths, *Kor. J.*

- Pesti. Sci. 3(2), 8~18.
- An, X.H., An, W.H., Im, I.B., Lee, S.B. and Kang, J.G. (2006). Persistence of Fungicide Pencycuron in Soils, *Kor. J. Pesti. Sci.* 10(4), 296~305.
- Choi, G.I., Seong, K.Y. and Kim, J.G. (2005). Behaviors of the Fungicide Procymidone in soils, *Kor. J. Environ. Agric.* 24(2), 123~1321.
- Choi, H., Kim, B.J., Bae, D.Y., Lee, Y.D. and Kang, S.C. (1998). Screening of Organo Phosphorus Insecticide Fenitrothion - Degrading Microorganisms, *Kor. J. Environ. Agric.*, 17(3), 279~285.
- Chun, J.C., Kim, S.E., Park, N.I. and Lim, S.J. (1998). Residue and Adsorptive Capacity of Paraquat in Orchard Soils, *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(3), 90~95.
- Chun, M.Y. and Yeo, H.G. (2005). Characteristics of PCDD/Fs Deposited on Pine Needles and Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 24(3), 280~288.
- Chung, K.Y., Woo, S.H., Kim, H.T., Sa, T.M., Kim, Y.K., Hong, S.D., Kim, J.J. and Lee, J.K. (2004). Degradation of the Fungicide Tolclofosmethyl in the Turfgrass Soil of Golf Course, *Kor. J. Environ. Agric.* 23(3), 178~184.
- Gyeong, G.S., Lee, B.M., Im, Y.B., Lee, Y.D., Han, S.S., Choe, J.H., Kim, J.H., Lyu, G.H. and Lee, J.G. (2004). Adsorption and leaching characteristics of fungicide hexaconazole, *Kor. J. Pesti. Sci.* 8(1), 46~53.
- Gyeong, G.S., Oh, K.S., Ahn, K.C., Kwon, J.W. and Lee, J.K. (1998). Leaching behavior of the herbicide bentazon in soil column, *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(1), 59~64.
- Han, S.G., Ahn, B.K. and Moon, Y.H. (1998). Adsorption and Movement of Fenoxaprop-P-ethyl in Soils, *Kor. J. Weed. Sci.* 18(4), 325~332.
- Hong, M.K., Park, J.W. and Kim, J.E. (2001). Behaviors of Chloronicotinyl Insecticide Acetamiprid in Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 20(3), 162~168.
- Hwang, I.T., Hong, K.S., Lee, B.H., Kim, H.R., Jeon, D.J. and Cho, K.Y. (2004). Selectivity and behaviour of EK-5439 in the soil as a candidate for rice herbicide, *Kor. J. Pesti. Sci.* 8(3), 175~183.
- Ihm, Y.B., Kyung, K.S., Kim, C.S., Lee, H.D., Ryu, G.H. and Lee, J.K. (2006). Adsorption and Leaching Characteristics of the Insecticide Imidacloprid in Paddy Soils, *Kor. J. Environ. Agric.* 25(1), 58~63.
- Im, Y.B., Gyeong, G.S., Kim, C.S., Choe, B.L., Hong, S.M. and Lee, J.G. (2004). Photolysis of the insecticide imidacloprid in water and water-paddy soil systems, *Kor. J. Pesti. Sci.* 8(1), 38~45.
- Jeong, B.R., Lee, Y.D. and Song, S.D. (2000). Weed Control Efficacy and Soil Persistence of New Pendimethalin Formulations, *Kor. J. Weed. Sci.* 20(2), 121~126.
- Kim, C.S., Ihm, Y.B., Lee, H.D. and Oh, B.Y. (2005a). Leaching of Organophosphorus and Carbamate Pesticides in Soil Column and Prediction of Their Mobility Using the Convective Mobility Test Model in Soils, *Kor. J. Environ. Agric.* 24(4), 350~357.
- Kim, C.S., Lee, B.M., Ihm, Y.B. and Choi, J.H. (2002a). Leaching potential of butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprotiolane and procymidone in soils as affected by adsorption characteristics, *Kor. J. Pesti. Sci.* 6(4), 309~319.
- Kim, C.S., Lee, H.D., Lhm, Y.B., and Lm, G.J. (2007). Runoff of Endosulfan by Rainfall Simulation and from Soybean-grown Field Lysimeter, *Kor. J. Environ. Agric.* 26(4), 343~350.
- Kim, C.S., Lee, H.D., Oh, B.Y., and Lee, Y.D. (2006a). Runoff and Erosion of Alachlor, Ethalfluralin, Ethoprophos and Pendimethalin from Soybean Field Lysimeter, *Kor. J. Environ. Agric.* 25(4), 297~305.
- Kim, C.S., Lhm, Y.B., Lee, Y.B., and Oh, B.Y. (2006b). Runoff and Erosion of Alachlor, Ethalfluralin, Ethoprophos and Pendimethalin by Rainfall Simulation, *Kor. J. Environ. Agric.* 25(4), 306~315.
- Kim, C.S., Park, B.J., Ihm, Y.B. and Ryu, G.H. (2005b). Adsorption Characteristics of Organophosphorus and Carbamate Pesticides in Four Soils and the Evaluation for Their Leaching Potential Using Two Screening Models, *Kor. J. Environ. Agric.* 24(4), 341~349.
- Kim, C.S., Park, K.H., Kim, J.B. and Choi, J.H. (2002b). Leaching and mobility prediction of butachlor, ethoprophos, iprobenfos, isoprotiolane and procymidone in soils, *Kor. J. Pesti. Sci.* 6(4), 300~308.
- Kim, H.K., Lee, Y.H. and Lee, K.S. (2002c). Adsorption and Degradation of Procymidone in Ginseng Cultivating Soils, *Kor. J. Environ. Agric.* 21(4), 286~290.
- Kim, H.K., Park, I.J., Shim, J.H. and Shu, Y.T. (1996a). Soil Adsorption of Herbicide Quizalofop-Ethyl, *Kor. J. Environ. Agric.* 15(4), 442~447.
- Kim, H.K., Yun, B.K., Park, I.J. and Shu, Y.T. (1996b). Fate of the Herbicide Quizalofop - Ethyl in Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 15(4), 488~493.
- Kim, I.S. and Suh, Y.T. (1999). Behaviour of Fungicide 14C - Propiconazole in Rice Plant Grown - Lysimeter Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 18(3), 215~220.
- Kim, J.H. (1996c). Leaching of Trifluralin in the Commerce Clay Loam Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 15(4), 464~471.
- Kim, J.H. and Kim, S.K. (2000). Adsorption and residues of EPN in the soil of Cheju Island, *Kor. J. Pesti. Sci.* 4(1), 19~25.
- Kim, J.S. and Kim, J.E. (2009). Adsorption Pattern of the Herbicide, Bentazon and Its Metabolites on Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 28(3), 274~280.
- Kim, K., Kim, Y.H., Kim, J.H., and Park, C.K. (1996d). Study on Pesticide Runoff from Soil Surface -I, Runoff of Captafol by Natural Rainfall in Field, *J. Korean Soc. Agric. Chem. Biotechnol.* 39(6), 488~493.
- Kim, K., Yeom, D.H., Kim, J.H., Led, S.K., Kim, Y.H., and Park, C.K. (1997a). Study on Pesticide Runoff from Soil

- Surface-III Runoff of Pesticides by Simulated Rainfall in the Laboratory, *J. Korean Soc. Agric. Chem. Biotechnol.* 40(4), 334~341.
- Kim, K., Yeom, D.H., Kim, J.H., Lee, S.K., Kim, Y.H., and Park, C.K. (1997b). Study on Pesticide Runoff from Soil Surface-II Runoff of Phorate by Simulated Rainfall in Field, *J. Korean Soc. Agric. Chem. Biotechnol.* 40(4), 323~328.
- Kim, S.M., Jo, I.G., Gyeong G.S. and Lee, J.K. (2003a). Influence of soil organic matter and moisture on the persistence of the herbicide mefenacet in soils, *Kor. J. Pesti. Sci.* 7(3), 182~187.
- Kim, S.M., Kwon, J.U., Ahn, G.C., Jo, I.G., Gyeong, G.S. and Lee J.G. (2003b). Leaching behaviour of the herbicide mefenacet in the soil columns, *Kor. J. Pesti. Sci.* 7(3), 176~181.
- Kim, S.S., Kim, T.H., Lee, S.M., Park, D.S., Zhu, Yong-Zhe. and Hur, J.H. (2005c). Mobility of pesticides in different slopes and soil collected from Gangwon alpine sloped-land under simulated rainfall conditions, *Kor. J. Pesti. Sci.* 9(4), 316~329.
- Kim, S.S., Kim, T.H., Lee, S.M., Park, H.R., Park, D.S., Lim, C.K., and Hur, J.H. (2008). Mobility of Pesticides from Soil in Different Slope by Simulated Rainfall Under Field Conditions, *Kor. J. Pesti. Sci.* 12(1). 24~33.
- Kim, Y.S., Kim, Y.H. and Moon, Y.H. (1997c). Influence of Soil Pollutants and Fertilizers on Degradation Rate of Herbicide Alachlor in Soil, *Kor. J. Weed Sci.* 17(2), 214~219.
- Kim, Y.W. (1997d). Residue analysis of Quinclorac in soil by supercritical fluid extraction and fluorogenic derivation coupled with high performance liquid chromatography, *J. Korean Soc. Agric. Chem. Biotechnol.* 40(5), 442~446.
- Kwak, H.R., Lee, K.B., Kim, K.Y. Kim, Y.W. and Suh, Y.T. (2000). Degradation of <sup>14</sup>C - bifenox in Soils under Anaerobic Conditions, *Kor. J. Environ. Agric.* 19(4), 300~308.
- Kwon, J.W. and Lee, J.K. (1997). Mineralization and Adsorption of <sup>14</sup>C-Labelled Imazapyr in Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 16(4), 320~326.
- Kwon, J.W. and Lee, J.K. (1999a). Behaviour of the soil residues of the bipyridylum herbicide, [14C]paraquat in the micro-ecosystem, *Kor. J. Pesti. Sci.* 3(1), 66~77.
- Kwon, J.W. and Lee, J.K. (1999b). Leading characteristics of the bipyridylum herbicide paraquat in soil column, *Kor. J. Pesti. Sci.* 3(2), 29~36.
- Kwon, J.W., Kim, Y.S., Choi, J.W. and Lee, K.S. (1997). Extraction Method for Paraquat from Soil, *Kor. J. Environ. Agric.* 16(3), 239~244.
- Kyung, K.S., Lee, B.M. and Lee, J.K. (2004). Behavior of the soil residues of the fungicide hexaconazole in a rice plants-grown microecosystem (pot), *Kor. J. Pesti. Sci.* 8(3), 198~209.
- Lee, J.K. and Kwon, J.W. (1998a). Microbial degradation and other methods for accelerated degradation the Herbicide Imazapyr, *Kor. J. Environ. Agric.* 17(2), 5~10.
- Lee, J.K., Gyeong, G.S., Kwon, J.W., Ahn K.C. and Jung, I.S. (1998b). Leaching behaviour of the systemic insecticide carbofuran and the herbicide pretilachlor in soil columns, *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(2), 59~67.
- Lee, J.K., Jung, I.S., Kwon, J.W. and Ahn, K.C. (1998c). Diminution of Pesticide Residues on Crops and Soil by Accelerated Photolysis, *Kor. J. Environ. Agric.* 17(2), 107~116.
- Lee, J.K., Kwon, J.W., Ahn, K.C., Park, J.H. and Lee, Y.P. (2004a). Fate of the herbicide bensulfuron-methyl in a soil/rice plant microecosystem, *Kor. J. Pesti. Sci.* 8(4), 299~308.
- Lee, K.S. (1997). Evaluation on the effects of pesticides to agroecosystem in korea, *Kor. J. Environ. Agric.* 16(1), 80~93.
- Lee, S.J., Kim, B.H. and Kim, J.E. (1998d). Characteristics of Adsorption-Desorption of Herbicide Paraquat in Soils, *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(1), 70~78.
- Lee, S.M., Kim, S.S., Park, D.S. and Hur, J.H. (2005). Mobility of pesticides in different soil textures and gravel contents under soil column, *Kor. J. Pesti. Sci.* 9(4), 330~337.
- Lee, W.S. and Kim, J.E. (1998e). Effects of Soil Organic Matter and Oxidoreductase on Adsorption and Desorption of Herbicide Oxadiazon in Soils, *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(3), 70~78.
- Lee, Y.D. and Kwon, C.H. (2004b). High-Performance Liquid Chromatographic Determination of Cyclosulfamuron Residues in Soil, Water, Rice Grain and Straw, *Kor. J. Environ. Agric.* 23(4), 251~257.
- Lee, Y.D. and Kwon, C.H. (2004c). Determination of Monocrotophos Residues in Fruits and Soils Using High-Performance Liquid Chromatography, *Kor. J. Environ. Agric.* 23(4), 245~250.
- Lee, Y.D. and Song, S.D. (2001). Dissipation of Cyclosulfamuron in Rice Paddies, *Kor. J. Environ. Agric.* 20(4), 269~276.
- Lee, Y.D., Kim, H.J., Chung, J.B., and Jeong, B.R. (2000). Loss of Pendimethalin in Runoff and Leaching from Turfgrass Land under Simulated Rainfall, *J. Agric. Food Chem.* 48, 5376~5382.
- Moon, Y.H. and Kim, Y.S. (1998). Adsorption and Degradation of Herbicide Napropamide in Soils, *Kor. J. Weed. Sci.* 18(3), 257~261.
- Moon, Y.H. and Kim, Y.S. (2000). Dissipation in Surface Water and Adsorption in Soil on Butachlor, Oxadiazon, Pretilachlor and Thiobencarb, *Kor. J. Weed. Sci.* 20(1), 32~38.
- Oh, K.S., Lee, Y.G., Oh, B.Y., Lee, B.M. and Lee, J.K. (2000). Degradation of the herbicide dicamba by microorganisms isolated from the soil and phosphate extracts of turfgrass, *Zoysia japonica* S., *Kor. J. Pesti. Sci.* 4(3), 1~6.
- Oh, K.S., Oh, B.Y., Park, S.S., Ihm, Y.B., Kyung, K.S. and Lee, J.K. (1998). Degradation of the herbicide dicamba under sunlight and in soil, *Kor. J. Pesti. Sci.* 2(1), 53~58.
- Oh, S.S., Hyun, H.N. and Moon, D.K., Adsorption Coefficients of Eight Pesticides for Citrus Orchard Soils with Different Soil Organic Matter, *Kor. J. Environ. Agric.* 19(1), 6~12.

- Oh, S.S., Koh, Y.K., Hyun, H.N. and Chung, J.B. (2001). Effect of Activated Carbon, Orpar or Zeolite on Lea - Loss of Fenitrothion, Triadimefon and Diniconazole in Model Green of Golf Course, J. Korean Soc. Agric. Chemoc.iotechnoloc44(2), 97~102.
- Park, B.J., Kim, C.S., Park, K.H., Park, H.J., Im, G.J., Choi, J.H. Shim, J.H. and Ryu, G.H. (2006a). Residue and Safety ; Distribution and Mobility of Herbicide (14)C-Molinate in a Rice-Paddy-Soil Lysimeter, Kor. J. Pesti. Sci. 10(3), 172~182.
- Park, B.J., Park, H.J., Lee, B.M., Ihm, Y.B., Choi, J.H. and Ryu, G.H. (2005). Persistence and degradation of herbicide molinate in paddy-soil environment, Kor. J. Pesti. Sci. 9(1), 60~69.
- Park, D.S., Kim, T.H., Kim, S.S., Lee, S.M., Kim, S.M. and Hur, J.H. (2004a). Monitoring of pesticide residues at alpine and sloped-land in Gangwondo, Korea, Kor. J. Pesti. Sci. 8(3), 189~197.
- Park, H.J., Choi, J.H., Park, B.J., Kim, C.S., Ihm, Y.B. and Ryu, G.H. (2004b). Uptake of endosulfan and procymidone from arable soil by several vegetables I (green house study), Kor. J. Pesti. Sci. 8(4), 280~287.
- Park, K.H., Lee, Y.K., Lee, S.H., Park, B.J., Kim, C.S., Choi, J.H. and Uhm, J.Y. (2006b). Pesticide Degradation Activity of Several Isolates of Soil Bacteria and Their Identification, Kor. J. Pesti. Sci. 10(2), 138~148.
- Park, N.I., Lee, I.Y., Park, J.H., Lim, T.K., Chun, J.C., Kim, K.H. and Park, J.E. (2007). Residue Patterns of Butachlor and Pyrazosulfuron-ethyl in Soil, Water and Products of Transplanted Rice Paddy Field, Kor. J. Weed. Sci. 27(1), 49~55.
- Tu, O.J. (1998). A Study on Degradation Rate of Carbofuran in Sterilized Soil and Sulfate-added Paddy Soil, Kor. J. Environ. Agric. 17(1), 11~15.
- Yang, J.E., Cho, B.Y. and You, K.Y. (1997). Leaching and Adsorption of Flupyrzofos(KH-502) in the Soil, Kor. J. Environ. Agric. 16(1), 72~79.

---

## 토양 중 농약의 동태

이규승\*

충남대학교 농업생명과학대학 생물환경화학과

**요 약** 이 총설은 1996년 “농업생태계에 대한 잔류농약의 영향평가”라는 총설 이후 국내에서 발표된 토양 중에서의 농약의 동태에 관한 연구 보문을 요약 정리한 것이다. 내용은 농약의 지표면 유출, 농약의 토양 중 흡착 및 탈착, 농약의 토양 중 용탈, 농약의 토양 중 분해는 미생물에 의한 분해와 비생물학적 분해로 나누어 검토하였고, 농약의 토양 중에서의 행적 및 토양 중 잔류와 잔류 분석법 등으로 구분하여 정리하였다.

**색인어** 농약, 토양, 거동

---