

## 제주도 감귤원 토양에서 GUS, RF, AF 지수를 이용한 농약의 용탈잠재성 평가

오상실 · 현해남<sup>\*1)</sup> · 문두길<sup>1)</sup> · 정종배<sup>2)</sup>

제주도 보건환경연구원, <sup>1)</sup>제주대학교 원예생명과학부, <sup>2)</sup>대구대학교 생명환경학부

(2001년 3월 16일 접수, 2001년 12월 28일 수리)

### Estimation of Pesticide Leaching Potential Using GUS, RF and AF Index in Cheju Citrus Orchard Soils

Sang-Sil Oh, Hae-Nam Hyun<sup>\*1)</sup>, Doo-Khil Moon<sup>1)</sup> and Jong-Bae Chung<sup>2)</sup> (Cheju Provincial Institute of Health and Environment, Cheju 690-171, Korea, <sup>1)</sup>Faculty of Horticultural Life Science, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea, <sup>2)</sup>Dept. of Agricultural Chemistry, Daegu University, Kyongsan 712-714, Korea)

**Abstract** : Contamination of groundwater by agrochemicals used in the regional-scale is now a major environmental problem, and this is especially true for Cheju island where virtually all potable water is from groundwater. The objective of this study was to assess leaching potential of eight pesticides in soils of citrus orchards using groundwater ubiquity score (GUS), retardation factor (RF) and attenuation factor (AF). Considering GUS estimated in 30 citrus orchard soils, metribuzin and metolachlor were classified as leacher, alachlor in volcanic ash soils and linuron in non-volcanic soils were classified as leacher, but chlorothalonil and chlorpyrifos were classified as non-leacher. For RF values, metribuzin was classified to be mobile in soils of low organic carbon, metolachlor and alachlor were classified to be moderately immobile in most soils, but linuron, diuron, diniconazole, chlorothalonil and chlorpyrifos were all classified to be very immobile. For AF values, diniconazole, chlorothalonil, and chlorpyrifos were classified to be very unlikely leachable in all of the soils, metribuzin was classified to be likely leachable, and metolachlor, alachlor, linuron and diuron were classified to be leachable only in non-volcanic soils. Although there were some variations in the relative potential of leachability of pesticides estimated with the three different indices, the ranking was essentially determined on the base of the intrinsic properties of the chemicals and environmental properties. Among the eight pesticides, metribuzin, metolachlor, and alachlor, which have high water solubility and low  $K_{oc}$  values, have a significant leaching potential especially in non-volcanic ash soils of low organic carbon. But diniconazole, chlorothalonil, and chlorpyrifos, which have low water solubility and high  $K_{oc}$  values, were classified to be very immobile in all of the soils. Therefore, to lower the possibility of pesticide contamination of the groundwater in Cheju island, those pesticides which have high water solubility and low  $K_{oc}$  values should be used with care in soils of low organic carbon including non-volcanic ash soils.

**Key Words** : pesticide, leaching index, groundwater ubiquity score, retardation factor, attenuation factor

## 서 론

제주도의 지하수 함양율은 0.82 m/yr로 비교적 높은 편인데 이는 화산도가 가지는 지질학적 특성에 기인하며, 그에 따라서 오염물질의 지하수 유입 또한 용이하게 된다<sup>1)</sup>. 제주도에서는 병

충해 및 잡초의 방제를 위해서 연간 100 kg/ha 정도의 농약이 농경지에 사용되고 있으며, 높은 지하수 함양율을 고려할 때 살포된 농약은 쉽게 하향 이동되어 지하수를 오염시킬 가능성이 있는 것으로 우려되고 있다. 이들 농약 중에는 이미 외국의 지하수에서 검출된 사례가 보고되어 있는 alachlor, chlorothalonil, linuron, metribuzin, metolachlor 등도 포함되어 다량으로 사용되고 있다<sup>2)</sup>. 따라서 투수성이 높은 제주도의 토양 및 지질 특성을 고려할 때 농약에 의한 지하수의 오염을 방지할 수 있는 다양한 대

\*연락처:

Tel: +82-64-754-3345 Fax: +82-64-756-3351  
E-mail: hnhyun@cheju.ac.kr

책이 강구되어야 할 것이다. 물론 농약의 사용이 불가피한 상황에서 잔류성과 이동성이 커서 지하수의 오염을 유발할 가능성이 높은 농약의 사용을 억제하는 것이 우선 고려되어야 할 대책일 수 있다.

농경지에 살포된 농약의 용탈 정도는 물에 대한 용해도, 토양 잔류성 및 흡착성 등의 농약 자체 특성과 유기물 함량, 투수성, pH, 미생물 활성 등의 토양 특성, 그리고 강우량과 기온 등 기후 조건 등에 따라서 결정되며, 이러한 농약과 토양의 특성 및 기후 조건 등을 고려하면 여러 가지 토양 조건하에서 개별 농약의 지하수 오염 잠재성을 평가할 수 있다. 현재까지 농약의 지하수 오염 잠재성을 평가할 수 있는 기준으로 Groundwater Ubiquity Score (GUS), Retardation Factor (RF) 및 Attenuation Factor (AF) 등이 개발되어 이용되고 있다. GUS는 지하수에서 검출된 농약의 특성을 분석하여 경험적으로 만든 지하수 중 농약 검출지수이며 각 농약의 유기물에 대한 흡착상수 값과 토양 중에서의 반감기를 이용하여 평가된다<sup>3)</sup>. RF는 농약이 토양층에서 흡착될 수 있으므로 물의 이동속도에 비해 농약의 이동은 지연되며 그 지연 정도를 나타내는 계수로서 농약의 토양중 흡착성 때문에 지연되는 정도를 물의 이동속도와 비교하여 평가된다<sup>4,6)</sup>. AF는 토양 표면에 살포된 농약이 토층 내에서 일정 깊이까지 이동하는 동안 흡착 또는 분해되지 않고 남아 있는 양을 나타내는 지표이며, 지연계수 (RF), 토양 공극을 통과하는 물의 유속 및 토양중 농약의 반감기를 고려하여 평가된다<sup>7)</sup>. RF와 AF에 의한 평가 방법은 하와이에서 농약의 지하수 오염 잠재성을 평가하는데 많이 이용되었으며<sup>8-10)</sup>, 스페인 Canary제도 Tenerife섬의 지하수 오염 잠재성을 평가하는데도 사용되었다<sup>11)</sup>.

따라서 본 연구는 GUS, RF, 및 AF를 이용하여 제주도의 감귤원과 주변 농경지에서 많이 사용되고 있는 몇 가지 농약의 지하수 오염 잠재성을 유기물 함량이 다른 토양별로 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 토양 및 농약

제주도 감귤원에 분포하고 있는 19개 토양통에서 유기물 함량이 다른 30개의 토양을 대상으로 농약의 용탈잠재성을 평가하였는데, 유기물 함량이 낮은 암갈색 비화산회토는 8개 토양통에서 10점, 유기물 함량이 높은 농암갈색 및 흑색 화산회토는 각각 10개 토양통 및 8개 토양통에서 12점 및 8점씩의 시료를 채취하였다 (Table 1). 화산회토와 비화산회토 시료는 정밀토양도에 따라 채취되었으나, 실제 토양의 특성으로 보아서 유기물 함량이 6% 이하인 토양은 아라통을 제외하면 모두 비화산회토로 분류할 수 있었다.

유기탄소함량은 Walkley-Black법으로 측정하였으며<sup>12)</sup>, 토양의 입자밀도와 용적밀도는 각각 core법과 pycnometer법으로 측정하

Table 1. Soil properties at the series level for the soils of Cheju citrus orchards

Soil Series	$f_{oc}^{\dagger}$	$\rho_b^{\ddagger}$	$\rho_p^{\S}$	$n^{\parallel}$	$\theta_{pc}^{\$}$
Ora	0.0128	1.05	2.63	0.601	0.40
Aewol	0.0139	1.37	2.66	0.485	0.39
Haweon	0.0197	1.37	2.66	0.485	0.39
Mureung	0.0214	1.37	2.66	0.485	0.38
Mureung	0.0231	1.08	2.67	0.596	0.41
Ido	0.0244	1.21	2.61	0.536	0.39
Ora	0.0260	1.12	2.62	0.595	0.42
Donghong	0.0261	1.27	2.61	0.513	0.41
Ara	0.0306	0.91	2.45	0.629	0.40
Donggui	0.0317	1.06	2.62	0.595	0.43
Donggui	0.0318	1.19	2.57	0.537	0.40
Donghong	0.0398	1.13	2.65	0.574	0.41
Jeju	0.0464	0.90	2.55	0.647	0.41
Jungeom	0.0482	0.94	2.42	0.612	0.45
Udo	0.0500	0.91	2.61	0.652	0.45
Jungmun	0.0576	0.78	2.43	0.679	0.43
Sara	0.0712	0.88	2.51	0.648	0.44
Ora	0.0752	0.62	2.54	0.646	0.44
Jeju	0.0943	0.52	2.33	0.777	0.43
Jeju	0.0957	0.67	2.38	0.719	0.44
Ora	0.0990	0.62	2.44	0.664	0.43
Ora	0.1030	0.90	2.54	0.741	0.43
Pyungdae	0.1100	0.66	2.40	0.725	0.43
Wuimi	0.1110	0.74	2.41	0.693	0.43
Gimryeong	0.1120	0.71	2.42	0.707	0.43
Hangyeong	0.1120	0.61	2.22	0.727	0.42
Noksan	0.1160	0.72	2.39	0.699	0.43
Songdang	0.1270	0.61	2.38	0.735	0.44
Gimryeong	0.1430	0.46	2.35	0.804	0.41
Songdang	0.1570	0.69	2.44	0.717	0.39

<sup>†</sup> fraction of soil organic carbon, <sup>‡</sup> soil bulk density, <sup>§</sup> soil particle density, <sup>||</sup> soil porosity, <sup>§</sup> volumetric water content at 1/3 bar.

였다<sup>13,14)</sup>. 공극율은 측정된 입자밀도와 용적밀도를 이용하여 계산

Table 2. The physicochemical properties of the eight pesticides used in Cheju citrus orchards

Pesticide	Water solubility <sup>†</sup>	$K_f$ <sup>‡</sup>	$K_{oc}$ <sup>‡</sup>	Half-life (Reference)
	mg/L		L/kg	days
Metribuzin	1220.0	0.4 - 4.8	10 - 50	32 (32)
Metolachlor	530.0	0.1 - 10.6	10 - 140	44 (3)
Alachlor	242.0	0.6 - 9.1	25 - 160	24 (32)
Linuron	75.0	0.8 - 67.0	40 - 480	60 (33)
Diuron	42.0	3.2 - 163.0	200 - 1200	90 (33)
Diniconazole	4.0	10.2 - 106.0	300 - 1400	97 (34)
Chlorothalonil	0.6	9.4 - 189.0	700 - 1800	30 (33)
Chlorpyrifos	2.0	43.0 - 519.0	2000 - 8000	63 (5)

† Water solubility data were cited from reference 31, ‡ Data for  $K_f$  and  $K_{oc}$  were cited from reference 15.

하였다. 포장용수량 ( $\theta_{rc}$ )은 각 토양의 수분특성곡선을 이용하여 1/3 bar 수분함량으로 환산하였다.

용탈잠재성 평가 대상 농약으로는 triazine계 토양처리형 제초제인 metribuzin, acetoanilide계 비이온성 제초제인 metolachlor와 alachlor, urea계 제초제인 linuron과 diuron, 용해도가 비교적 낮은 triazole계 살균제인 diniconazole, 용해도가 극히 낮은 살균제 chlorothalonil과 살충제 chlorpyrifos 등 8개를 사용하였으며 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다. 이들 농약의 선정은 위에서 언급한 용해도, 용도 외에 외국의 지하수에서 오염사례가 있으면서 제주도에서 다량으로 사용되고 있거나 (diuron 제외), 농경지 등에서 잔류하고 있는 것으로 보고된 농약 중에서 선별하였다.

용탈잠재성 평가

GUS는 Gustafson이 제안한 방법으로 식 (1)과 같이 계산하였다<sup>3)</sup>.

$$GUS = \log t_{1/2} \times (4 - \log K_{oc}) \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $K_{oc}$ 는 Oh 등이 8개 농약별로 30개 토양에 대하여 구한 값을 이용하였으며<sup>15)</sup>,  $t_{1/2}$ 는 토양 중 농약의 반감기로 제주도 감귤원 토양의 85% 이상이 pH 5.5 이하의 산성토양에 속하는 것을 고려하여 농약별로 조건이 유사한 토양에서 측정된 문헌자료를 이용하였다 (Table 2). GUS별 농약의 용탈잠재성에 대한 상대적인 척도로는 Gustafson이 제안한 분류를 적용하였다 (Table 3)<sup>3)</sup>.

Table 3. Relative scales of mobility or leachability used for the three indices

Index	Classification	Reference
Attenuation Factor		8
0.0 - 0.001	very unlikely	
0.001 - 0.01	unlikely	
0.01 - 0.1	moderately likely	
0.1 - 0.25	likely	
0.25 - 1.0	very likely	
Retention factor		6
> 1.0	very mobile	
1.0 - 2.0	mobile	
2.0 - 3.0	moderately mobile	
3.0 - 10.0	moderately immobile	
≥ 10.0	very immobile	
Groundwater Ubiquity Score		3
< 1.8	non-leacher	
1.8 - 2.8	transitional	
> 2.8	leacher	

F는 식 (2)를 이용하여 계산하였는데<sup>7)</sup>, 토양 흡착계수인  $K_f$  값은 Oh 등이 8개 농약별로 30개 토양에 대하여 측정된 값을 이용하였으며<sup>15)</sup>, 용적밀도 ( $\rho_b$ ) 및 공극율 ( $\eta$ )은 Table 1에 제시된 값들을 이용하였다. RF별 농약의 용탈잠재성에 대한 상대적인 척도로는 Helling 등이 제안한 분류를 적용하였다 (Table 3)<sup>6)</sup>.

$$RF = 1 + K_f \rho_b / \eta \dots \dots \dots (2)$$

AF는 RF와 농약의 토양중 반감기 ( $t_{1/2}$ ), 토심 ( $d$ ), 지하수 충전속도 ( $q$ ) 및 포장용수량 ( $\theta_{rc}$ )을 고려하여 식 (3)과 같이 계산된다<sup>7)</sup>.

$$AF = \exp [-0.693 \times RF \times d \times \theta_{rc} / (t_{1/2} \times q)] \dots (3)$$

지하수 충전속도는 제주도의 연간 평균 강수량 1,872 mm, 연간 평균 강우일수 122일 및 지하수 충전율 44%를 적용하여 0.0068 m/day로 계산되었으며, AF값은 오염취약지역을 선별하기 위한 정성적 도구로 사용되기 때문에 충전속도는 일정하다는 가정 하에 적용하였다. 식 (3)에서 토심은 농약의 분해가 활발한 토층의 깊이를 나타내는 것으로 본 연구에서는 감귤원 근권의 평균 깊이를 고려하여 50 cm를 적용하였다. AF별 농약의 지하수오염잠재성에 대한 상대적인 척도는 Khan 등이 제안한 분류를 사용하였다 (Table 3)<sup>8)</sup>.

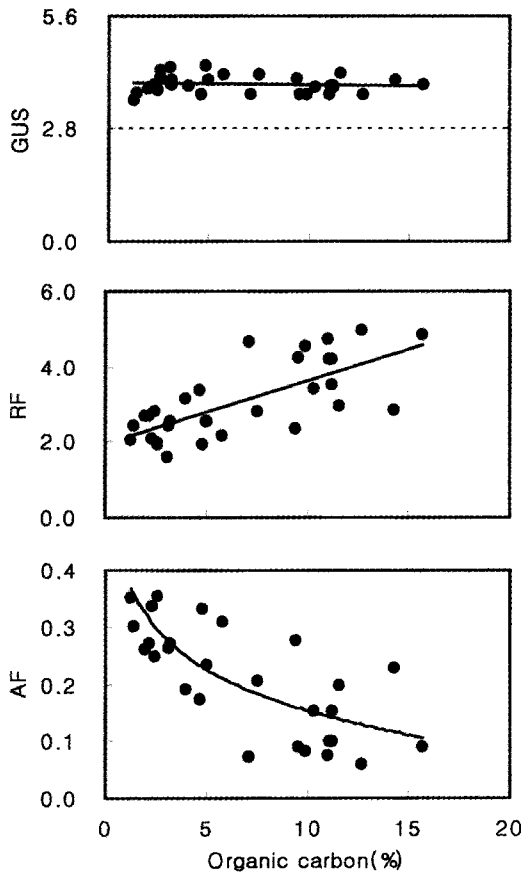


Fig. 1. Values of GUS, RF, and AF estimated for metribuzin in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

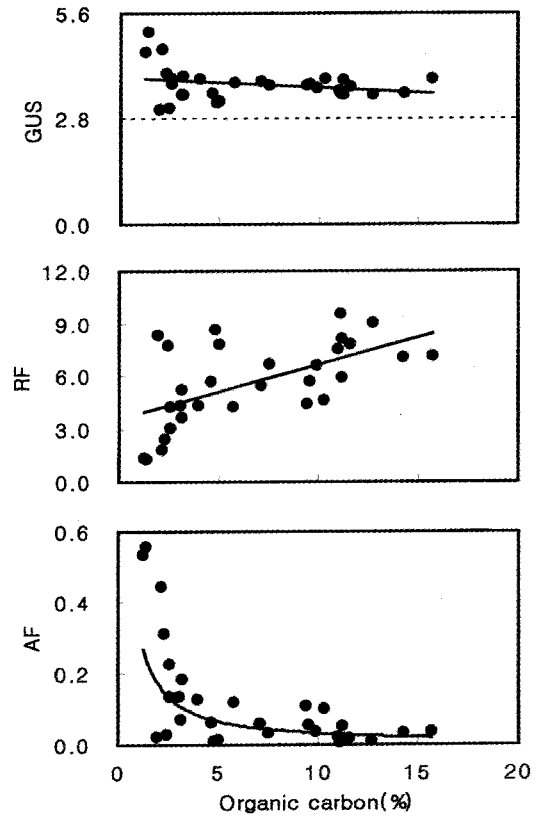


Fig. 2. Values of GUS, RF, and AF estimated for metolachlor in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

## 결과 및 고찰

### 토양의 특성

농약의 흡착 또는 용탈과 관련된 토양의 특성은 Table 1에 나타내었다. 유기탄소 함량은 화산회토에서 전반적으로 높았으며 회산회토와 비화산회토별로 1~16% 범위에서 고른 분포를 보여 토양 유기물 함량에 따른 농약의 용탈 가능성을 적절히 평가할 수 있었다. 용적밀도는 0.4에서 1.4 g/cm의 분포를 보여 토양간 차이가 컸으며, 토양의 유기탄소함량이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하였다. 유기탄소함량이 많은 감귤원 토양의 용적밀도는 일반 토양에 비해 매우 낮았으며, 따라서 공극율은 유기탄소 함량이 높은 화산회토에서 높게 나타났다. 토양의 투수성은 농약의 용탈에 영향을 미칠 수 있는 또 다른 요인인데, 투수성은 공극율이 커질수록 또 대공극이 많을수록 증가한다. 각 토양의 포장용수량을 보면 공극율과 상관없이 비교적 균일한 것 (0.38~0.45)으로 보아 공극율이 큰 비화산회토에서 대공극이 많을 것으

로 판단되며 따라서 비화산회토에 비교하여 화산회토에서 그리고 토양별로 보면 유기물 함량이 증가할수록 투수성이 증가할 것으로 판단된다. 따라서 흡착성이 약하고 물에 대한 용해도가 큰 농약은 화산회토에서도 비교적 쉽게 용탈될 수 있을 것이다.

### Metribuzin의 용탈잠재성

제주도 감귤원 토양에서 평가된 제초제 metribuzin의 용탈잠재성 지수 GUS, RF 및 AF를 토양 유기물 함량의 함수로 Fig. 1에 나타내었다. 30개 토양에 대하여 계산한 metribuzin의 GUS는 3.5~4.5의 범위 내로 나타나 제주도의 지하수 중에서 검출 가능성이 큰 농약으로 분류되었으며, 토양의 유기물 함량은 흡착이 잘 되지 않는 metribuzin의 용탈에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Vighi 등의 연구 결과에서도 metribuzin의 GUS가 2.2~8.9 범위로 나타나 지하수 중 검출 가능성이 매우 높은 것으로 평가되어 있다<sup>16)</sup>. Metribuzin의 RF 값은 1.6~5.1의 범위에 분포하였으며, 유기물 함량이 낮은 토양에서는 이동성이 크며,

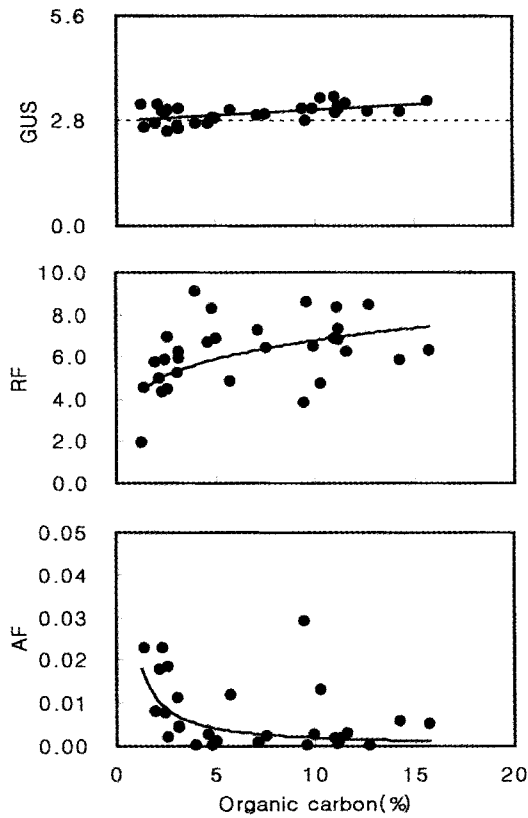


Fig. 3. Values of GUS, RF, and AF estimated for alachlor in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

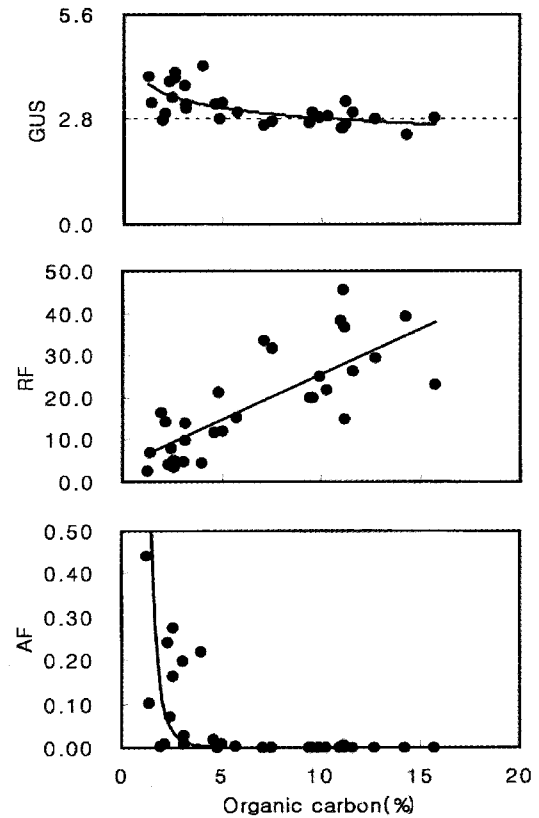


Fig. 4. Values of GUS, RF, and AF estimated for linuron in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

유기물 함량이 높은 토양에서는 이동성이 낮은 것으로 분류되었다. 근권 이하로의 용탈 가능성을 나타내는 지수인 metribuzin의 AF 값은 0.01~0.35의 분포를 보였는데, 유기물 함량이 아주 낮은 토양에서 매우 컸으며 유기물 함량이 증가할수록 감소하였으나, 모든 토양에서 근권 이하로 이동이 가능하여 지하수 오염 위험성이 비교적 큰 농약으로 분류되었다.

Vighi 등이 종합하여 보고한 결과를 보면 약 3%의 검출빈도로 조사 대상 지하수 중에서 metribuzin이 검출되었으며<sup>16)</sup>, Cohen 등은 지하수에서 0.09~4.35 µg/L의 농도로 metribuzin을 검출하기도 하였다<sup>17)</sup>. 따라서 토양중 반감기는 길지 않으나 물에 대한 용해도가 크고 흡착성이 약한 metribuzin은 대부분의 제주도 토양에서 지하수 오염의 위험성이 큰 농약으로 분류될 수 있으며, 유기물 함량이 많은 토양에 비해 적은 토양에서 오염 위험성이 더 클 것으로 판단된다.

Metolachlor와 alachlor의 용탈잠재성

Metolachlor와 alachlor는 구조는 비슷하나 용해도에 있어서는 2배의 차이를 가지는 acetoanilide계 제초제이다. 이들 두 약제의 제주도 감귤원 토양에 대한 용탈잠재성 지수 GUS, RF 및 AF를 토양 유기물 함량의 함수로 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 두 농약의 GUS는 각각 3.0~5.5, 2.6~3.5로서 metolachlor는 모든 토양에서 지하수중 검출가능성이 있는 농약으로 분류되었으나, alachlor는 유기탄소 함량 5% 이하의 토양에서는 용탈성 분류기준인 GUS 2.8에 근접해 있는 경향을 나타내었다. 화산회토에서는 유기탄소 함량이 증가와 더불어 값이 점차 증가하므로 대부분은 지하수중 검출가능성이 있는 것으로 분류되었다. 이들 GUS는 Gustafson<sup>13)</sup>이 보고한 2.2~3.4, 1.1~3.3의 값 보다 높은 경향을 나타내었는데, 이것이 화산회 토양의 유기물 집적과 관련이 있을 것으로 예상되나 별도의 연구가 필요한 사항이다. 두 농약의 RF 값은 1.6~9.8, 2.0~10.0의 범위를 나타내어 metolachlor는 3개 토양, alachlor는 1개 토양을 제외하고는 물의 이동속도에 비해 3배 이상 느리게 이동하는 것으로 예측되어 이동성이 낮은 농약으로

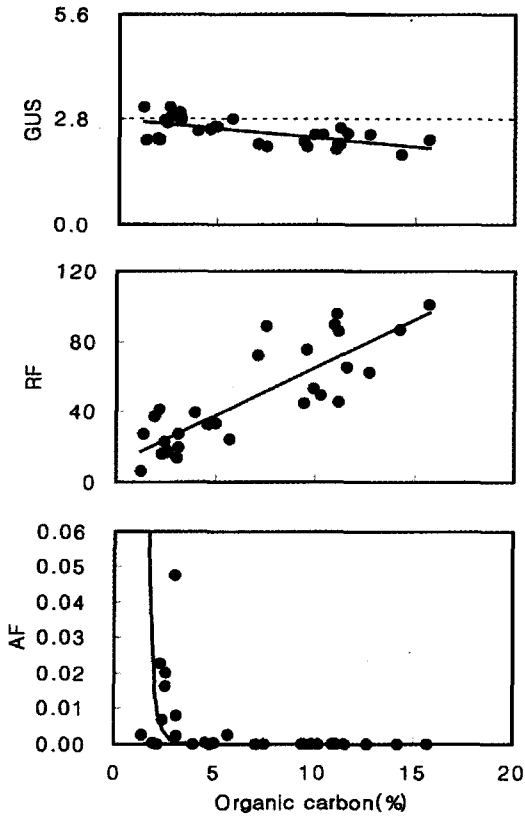


Fig. 5. Values of GUS, RF, and AF estimated for diuron in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

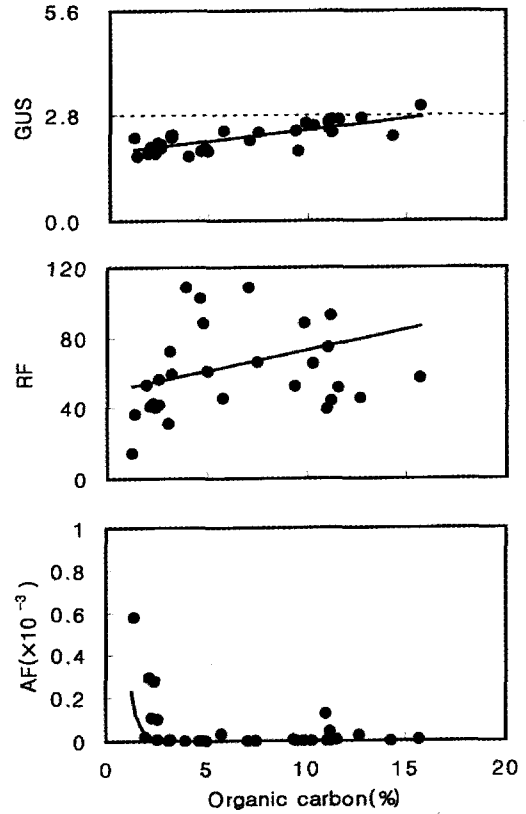


Fig. 6. Values of GUS, RF, and AF estimated for diniconazole in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

분류되었다. 두 약제에 대한 AF 값은 0.0001~0.03, 0.001~0.55 범위로 평가되어 metolachlor는 대부분 토양에 대해 보통 이상의 용탈성을 가진 반면, alachlor는 대부분 토양에 대해 보통 이하인 것으로 분류되었다. 두 약제 모두 유기탄소 함량이 증가에 따라 비화산회토에서는 용탈성이 토양간 큰 차이로 감소하는 경향을 보였으나, 화산회토에서는 차이가 없이 낮은 것으로 평가되었다.

농약의 흡착특성과 반감기만을 이용한 GUS에 의한 평가에서는 metolachlor가 모든 토양에서 지하수 오염 위험성이 큰 것으로 나타났지만, alachlor의 경우는 유기탄소 함량이 5%이하의 토양에서 GUS 2.8 부근에 근접해 있는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 RF 및 AF에 의한 평가의 결과 유기물 함량이 낮은 토양일수록 용탈 가능성이 큰 것으로 분류되는 것과 반대되는 경향이 다. 특히, 외국의 지하수중 alachlor의 검출사례가 조사된 지하수 중 10%의 검출율을 보인 것과<sup>16)</sup> 지하수중에서 0.1~10 µg/L의 농도로 검출되었다는 보고<sup>17)</sup>, Kladviko 등이 살포된 alachlor 중 연간 0.01%까지 용탈되는 것으로 보고 한 것<sup>18)</sup>, 현재 제주도 내에

서 사용되는 양이 30,000 kg에 달하는 것<sup>2)</sup> 등을 고려할 때, 제주도내 지하수중에서 검출 가능성을 배제할 수 없는 것으로 판단된다.

#### Linuron과 diuron의 용탈잠재성

Linuron과 diuron은 urea계 제초제로서 제주도 감귤원 토양에 대해 평가된 용탈잠재성 지수 GUS, RF 및 AF를 토양 유기물 함량의 함수로 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 두 농약의 GUS는 각각 2.2~4.2, 1.3~3.1로서 유기물 함량에 따라 감소하는 경향을 보였다. linuron은 대부분의 토양에서 GUS 2.8 이상으로 지하수에서 검출될 가능성이 높은 농약으로 분류된 반면, diuron은 대부분의 토양에서 GUS 2.8 이하로 유기물 함량이 증가할수록 지하수 검출가능성이 비례적으로 감소하는 것으로 나타났다. RF 값은 두 농약 모두 토양의 유기탄소 함량 증가에 따라 비례적으로 증가하였으며, 비화산회토 일부를 제외한 대부분 토양에서, 모든 토양에서 10 이상으로 토양중의 이동성이 매우 낮은 농

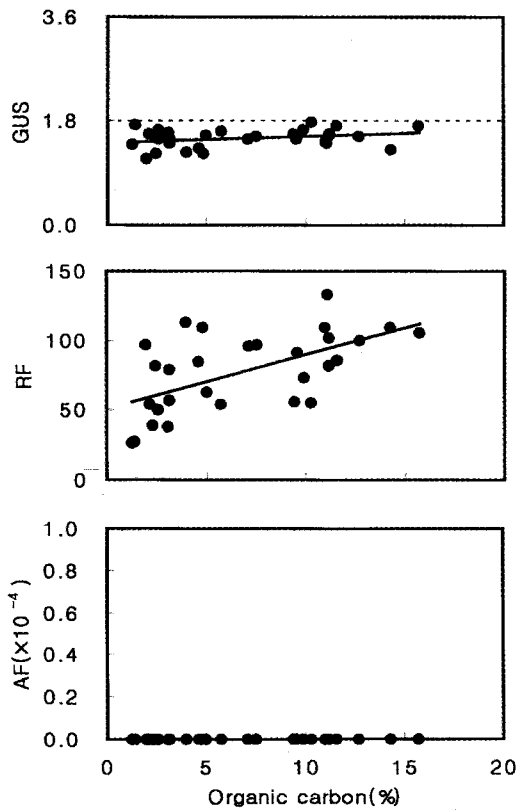


Fig. 7. Values of GUS, RF, and AF estimated for chlorothalonil in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

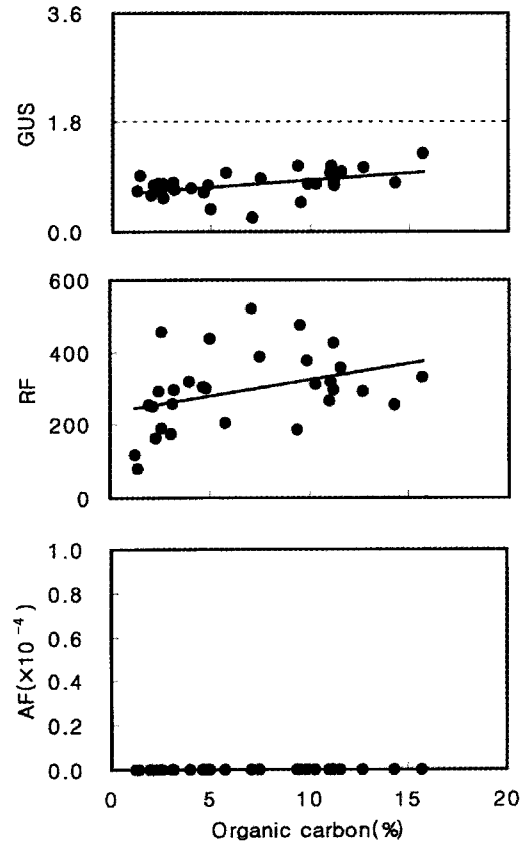


Fig. 8. Values of GUS, RF, and AF estimated for chlorpyrifos in 30 different soils of Cheju citrus orchards as a function of soil organic matter content.

약으로 평가되었다. 이러한 결과는 linuron<sup>18,22)</sup>, diuron<sup>22,23)</sup>을 이동성이 있는 것으로 분류한 것과, 특히 diuron이 linuron보다 이동성이 큰 것으로 보고한 것과는<sup>23)</sup> 반대의 결과를 나타내었는데, 이는 토양중 유기물 함량의 차이와 두 약제의 유기물에 대한 높은 친화성 때문인 것으로 생각되었다<sup>15)</sup>. 두 농약의 AF 값은 유기탄소함량 5% 이하의 비화산회토에서는 각각 0.0001~0.45, 0.0001~0.05로서 토양별로 큰 차이를 보였으며, linuron은 보통 이상, diuron은 보통 이하의 용탈성을 갖는 것으로 분류되었다. 반면, 화산회토에서는 용탈 가능성이 0에 가까운 분포를 나타내어 일부 비화산회토양을 제외하면 대부분의 토양에서 근권 이하로 용탈될 가능성은 매우 낮은 것으로 평가되었다.

평가방법에 따라 약간씩 차이는 있었지만, 비화산회토에서는 3가지의 평가지수 모두에서 제초제 linuron의 지하수 오염 위험성은 큰 것으로 나타났다. Diuron도 Linuron과 비슷한 경향을 나타내었으나, 지하수 오염 위험성은 낮은 것으로 평가되었다.

#### Diniconazole의 용탈잠재성

제주도 감귤원 토양에서 평가된 살균제 diniconazole의 용탈잠재성 지수 GUS, RF 및 AF를 토양 유기물 함량의 함수로 Fig. 6에 나타내었다. 살균제 diniconazole이 지하수에서 검출될 가능성을 나타내는 GUS는 1.7~2.9로 1개 토양통을 제외한 모든 토양통에서 지하수중 검출가능성은 없는 농약으로 분류되었다. RF 값은 전 토양에서 10 이상으로 제주도 토양에서 diniconazole의 이동성은 매우 낮은 것으로 분류되었으며, 유기물 함량과는 일정한 관계를 나타내지 않았다. AF 값은 오라통을 비롯한 몇 개의 토양통에서 0.0001~0.0006의 분포로서 용탈 가능성이 낮은 것으로 분류되었으며, 이외의 다른 모든 토양에서는 용탈 가능성이 극히 낮은 것으로 분류되었다.

Diniconazole은 GUS에 의해서는 용탈 가능성이 일부 있는 농약으로 분류되었지만, RF와 AF를 기준으로 할 때는 대부분의 토양통에서 지하수 오염 위험성이 없는 것으로 평가되었다. 그러나

골프장과 같은 배수가 잘되는 투수조건 (39 cm/hr)에서는 살포량의 1.78%와 0.46%가 0.75 m 깊이에 설치된 용탈계에서 채취한 용액 중에서 검출되었다고 보고되었다<sup>24)</sup>. 따라서 토양이 diniconazole 흡착에 의해서 나타나는 이동성의 지면에서는 지하수 오염 위험성은 극히 낮지만 골프장과 같이 투수성이 양호한 조건에서는 용탈의 잠재성이 있는 것으로 판단된다.

### Chlorothalonil의 용탈잠재성

제주도 감귤원 토양에서 평가된 살균제 chlorothalonil의 용탈 잠재성 지수 GUS, RF 및 AF를 토양 유기물 함량의 함수로 Fig. 7에 나타내었다. Chlorothalonil은 물에 대한 용해도가 극히 낮은 약제로서 토양별 GUS는 1.2~1.7의 범위에 분포하였다. 따라서 대상 30개 토양 모두에서 지하수로의 용탈 가능성은 없는 농약으로 분류되었다. Gustafson도 chlorothalonil의 GUS를 1.6으로 보고하였다<sup>3)</sup>.

Chlorothalonil의 RF 값은 모든 토양통에서 10 이상으로 나타나 화산회토와 비화산회토에 관계없이 이동성이 매우 낮은 농약으로 분류되었다. AF 값도 0.0001 이하로 감귤원의 근권 토양층 이하로 용탈 가능성도 극히 낮은 것으로 분류되었다. 따라서 물에 대한 용해도가 낮고 흡착성이 강하며 잔류성이 짧은 chlorothalonil의 경우 3가지의 지수로 평가된 결과를 보면 화산회토, 비화산회토 모두에서 용탈에 의한 지하수 오염 잠재성은 없는 것으로 나타났다.

Chlorothalonil이 지하수에서 검출된 사례로는 캐나다에서 98개의 농업용 관정 중 1개에서 0.065 µg/L의 농도로 검출된 것이 처음이며<sup>25)</sup>, 대부분의 모니터링에서는 검출되지 않는 것으로 보고되어 있다<sup>26)</sup>.

### Chlorpyrifos의 용탈잠재성

제주도 감귤원 토양에서 평가된 살충제 chlorpyrifos의 용탈 잠재성 지수 GUS, RF 및 AF를 토양 유기물 함량의 함수로 Fig. 8에 나타내었다. Chlorpyrifos는 물에 대한 용해도가 극히 낮고 토양층에서 흡착이 아주 잘 되는 약제로서 GUS는 1.3 이하의 분포를 나타내어 지하수로의 용탈 가능성은 없는 농약으로 분류되었으며, Gustafson도 chlorpyrifos의 GUS를 0.37로 보고하였다<sup>3)</sup>. RF 값도 10 이상으로서 이동성이 매우 낮은 농약으로 분류되었으며, AF 값 또한 0.0001 이하로서 감귤원의 근권 토양층 이하까지의 용탈 가능성도 극히 낮은 것으로 분류되었다.

Chlorpyrifos는 제주도에서 연간 3,600 kg이 사용되는 살충제로서 토양 중 잔류성이 길기 때문에 농경지 토양에서 검출율은 매우 높다<sup>27)</sup>. 이와 같은 물에 대한 용해도가 낮고 잔류성이 길면서 토양 표층에 흡착성이 강한 농약은 용탈 측면에서는 안정한 것으로 볼 수 있으나, 강우시 지표면 토양의 침식과 함께 주변 하천 및 해양으로 유출될 잠재성이 크다는 것 또한 염두에 두어

야할 것이다<sup>28,29)</sup>.

## 요 약

유기물함량이 다른 감귤원 토양을 대상으로 GUS, RF 및 AF 값을 비교하여 감귤원에서 많이 사용되고 있는 농약 종류별 지하수 오염 잠재성을 평가하였다.

GUS에 의하면 metribuzin과 metolachlor는 조사된 모든 토양통에서 용탈 가능성이 큰 것으로 평가되었으며,alachlor와 linuron도 대부분 토양에서 용탈가능성이 높은 것으로 평가되었으며 linuron의 경우에는 특히 비화산회토양에서 용탈의 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. Diuron과 diniconazole은 대부분 토양에서 용탈 가능성이 없는 것으로 평가되었고, chlorothalonil과 chlorpyrifos는 유기물 함량에 관계없이 용탈 가능성이 없는 것으로 평가되었다.

RF에 의한 평가에서는 diniconazole, chlorothalonil, chlorpyrifos는 모든 토양에서, linuron과 diuron은 일부 비화산회토를 제외한 모든 토양에서 이동성이 매우 낮은 것으로 분류되었으며, metolachlor와alachlor는 대부분의 토양에서 이동성이 보통인 것으로, metribuzin은 유기탄소함량이 낮은 토양에서 오염 잠재성이 있는 것으로 평가되었다.

AF에 의하면 diniconazole, chlorothalonil, chlorpyrifos는 화산회토, 비화산회토에 관계없이 지하수 오염 잠재성이 없는 것으로 평가되었으며, 반면 metribuzin은 화산회토, 비화산회토에 관계없이 오염 잠재성이 있는 것으로 평가되었다. Metolachlor는 비화산회토에서 지하수 오염 잠재성이 있는 것으로 평가되었고,alachlor, linuron 및 diuron은 유기물 함량이 낮은 일부 비화산회토에서만 지하수 오염 잠재성이 우려되는 것으로 나타났다.

농약의 용탈잠재성은 용해도, 흡착성, 잔류성 등의 약제 자체의 특성과 함께 유기물 함량, 투수성 등 토양의 물리화학적 특성에 따라서 결정된다. 본 연구의 결과를 보면 이러한 일반적인 원칙이 각 농약의 용탈잠재성 지수에 그대로 반영되었는데, 용해도가 높고, 흡착성이 약하며 잔류성이 긴 약제일수록 대부분의 토양에서 용탈잠재성이 큰 것으로 나타났다. 토양의 특성 중에서는 특히 농약의 흡착에 직접 영향을 미치는 유기물 함량이 용탈잠재성 지수를 결정하는 중요한 요인으로 볼 수 있는데, 본 연구의 결과에서도 일반적으로 유기물 함량이 높은 화산회 토양에서는 농약의 용탈잠재성이 비화산회토양에 비교하여 낮은 것으로 나타났다. 용해도가 높고 흡착성이 매우 낮은 약제인 metribuzin의 경우에도 투수성이 상대적으로 높은 화산회 토양에서보다 투수성이 낮은 비화산회토양에서 용탈 가능성이 높게 평가된 것으로 보아 대부분 농약의 용탈잠재성을 결정하는데 있어 토양의 투수성보다도 유기물 함량이 더욱 중요하게 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.



따라서 비화산회토를 위주로 한 유기물 함량이 낮은 토양이 분포된 지역의 지하수가 농약의 오염에 취약할 것으로 판단할 수 있으며, 이들 지역에서는 용탈잠재성이 높은 것으로 평가된 약제들의 사용을 최대한 제한함으로써 제주도 지하수의 농약 오염을 방지할 수 있을 것이다. 물론 제주도 감귤원에서는 토양의 유기물 함량과 약제의 흡착성을 우선적으로 고려하여 사용할 농약을 선택해야 할 것으로 보이나, 그 외 약제의 잔류성, 사용량, 사용시기와 함께 기후조건, 토양의 투수성, 토층의 깊이, 지하수 깊이 등의 지역적인 특성들이 농약의 용탈잠재성에 미치는 영향도 더욱 구체적으로 파악되어야 할 것이며 농약의 선택 과정에서도 이러한 특성들이 앞으로 고려되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 1998년도 학술진흥재단 과학기술기초중점연구 지원과제로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 양하백 (1998) GIS를 활용한 제주도중산간 지역의 환경보전적 토지이용계획, 한자원환경지질학회·대한지하수환경학회 공동학술발표회 발표논문요약집. p.77-99.
2. 제주도 (1996) 제주도환경백서.
3. Gustafson, D. I. (1989) Hazard assessment groundwater ubiquity score : A simple method for assessing pesticide leachability, *Environ. Tox. Chem.* 8, 339-357.
4. Davidson, J. M. and Chang, R. K. (1972) Transport of picloram in relation to soil physical conditions and porewater velocity, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 257-261.
5. 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.
6. Helling, C. S. and Dragun, J. (1980) Soil leaching tests for toxic organic chemicals, In *Proc. Symp. on Test Protocols for Environmental Fate and Movement of Toxicants*, p.43-88. Assoc. of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
7. Rao, P. S. C., Hornsby, A. G. and Jessup, R. E. (1985) Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater, *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 44, 1-8.
8. Khan, M. A. and Liang, T. (1989) Mapping pesticide contamination potential. *Environ. Manage.* 13, 233-242.
9. Kleveno, J. J., Loague, K. and Green, R. E. (1992) An evaluation of pesticide mobility index: Impact of recharge variation and soil profile heterogeneity, *J. Contam. Hydrol.* 11, 83-99.
10. Loague, K., Bernknopf, R. L., Green, R. E. and Giambelluca, T. W. (1996) Uncertainty of groundwater vulnerability assessments for agricultural regions in Hawaii : Review, *J. Environ. Qual.* 25, 475-490.
11. Diaz-Diaz, R., Carcia-Hernandez, J. E. and Loague, K. (1998) Leaching potentials of four pesticides used for bananas in the Canary Islands, *J. Environ. Qual.* 27, 562-572.
12. Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1982) Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Page, A. L. et al. (ed). p.539-579. Soil Science Society of America. Madison, WI.
13. Blake, G. R. and Hartge, K. H. (1986) Bulk Density. In *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Properties*. Klute, A. (ed). p.363-382. Soil Science Society of America. Madison, WI.
14. Blake, G. R. and Hartge, K. H. (1986) Particle Density. In *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Properties*. Klute, A. (ed). p.383-411. Soil Science Society of America. Madison, WI.
15. Oh, S. S., Hyun, H. N. and Moon, D. K. (2000) Adsorption coefficients of eight pesticides for citrus orchard soils with different soils organic matter, *Kor. J. Environ. Agric.* 19, 6-12.
16. Vighi, M., Donati, L., Sandroni, D. and Funari, E. (1995) Pesticide levels in groundwater: Value and limitations of monitoring. In *Pesticide Risk in Groundwater*. M. Vighi and Funari, E. (ed). Lewis Publishers.
17. Cohen, S. Z., Eiden, C. and Lober, M. N. (1986) Monitoring ground water for pesticides. In *Evaluation of Pesticides in Groundwater, Symposium Series 315*. Garner, W. Y. et al. (ed). p.170-196. American Chemical Society. Washington DC.
18. Klavivko, E. J., van Scoyoc, G. E., Monke, E. J., Oates, K. M. and Pask, W. (1991) Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. *J. Environ. Qual.* 20, 264-270.
19. Burnside, O. C., Fenster, C. R., Wicks, G. A. and Drew, J. V. (1969) Effect of soil and climate on herbicide dissipation, *Weed Sci.* 17, 241-245.
20. Dubey, H. D. and Freeman, J. F. (1965) Leaching of linuron and diphenamid in soils. *Weeds.* 13, 360-362.
21. Harris, C. I. (1967) Movement of herbicides in soil, *Weeds*

- 15, 214-216.
22. Shahied, S. and Andrews, H. (1966) Leaching of trifluralin, linuron, prometryns, and cotran in soil columns. *Proc. south. Weed Conf.* 19, 522-534.
  23. Miller, J. H., Keeley, P. E., Thullen, R. J. and Carter, C. H. (1978) Persistence and movement of ten herbicides in soil, *Weed Sci.* 26, 20-27.
  24. 오상실, 김병모, 조인숙, 송상택, 현익현, 김미금, 문성배 (1997) 농약 및 비료의 용탈률 분석. *제주도보건환경연구원보* 8, 117-138
  25. Ivey, M. J. and Andrews, H. (1965) Leaching of simazine, atrazine, diuron, and DCPA in soil columns, *Proc. South. Weed Conf.* 18, 670-684.
  26. Government of Nova Scotia (1990) Nova Scotia farm well water quality assurance study.
  27. O'Neill, H. J., Millburn, P., Leger, D. A., Macleod, J. and Richards, J. A. (1992) Screening survey for chlorothalonil residues in waters proximal to areas of intensive agriculture, *Can. Water Resour. J.* 17, 7-19.
  28. 오상실, 조인숙, 송상택, 현익현, 송영철, 김미금, 장정환 (1999) 농경지 농약 잔류량 조사. *제주도보건환경연구원보* 10, 231-232.
  29. Vinten, J. A., Yaron, B. and Nye, P. H. (1983) Vertical transport of pesticides into soil when adsorbed on suspended particles, *J. Agric. Food Chem.* 31, 662-664.
  30. Dunnivant, F. M., Jardine, P. M., Taylor, D. L. and McCarthy, J. F. (1992) Transport of naturally occurring dissolved organic carbon in laboratory columns containing aquifer material, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 437-444.
  31. Tomlin, C. D. S. (1997) *The Pesticide Manual*, 11th ed. British Crop Protection Council. Surrey, UK.
  32. Weed, D. A., Kanwar, R. S., Stoltenberg, D. E. and Pfeiffer, R. L. (1995) Dissipation and distribution of herbicides in the soil profile, *J. Environ. Qual.* 24, 68-79.
  33. Vogue, P. A., Kerle, E. A. and Jenkins, J. J. (1994) OSU Extension pesticide properties database, <http://ace.orst.edu/info/nptn/ppdmove.htm>.
  34. Lee, S. R., Lee, H. G. and Hur, J. H. (1996) Information sources for the establishment of tolerance standards on pesticide residues in soils, *Kor. J. Environ. Agric.* 15, 128-144.