

ORIGINAL ARTICLE

## 제주도 토양 중 비이온계 농약의 흡착 및 용탈 특성

전시범<sup>1)</sup> · 현익현<sup>2)</sup> · 이민규<sup>3)</sup> · 감상규\*

제주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>제주대학교 생명과학기술혁신센터, <sup>2)</sup>제주특별자치도 보건환경연구원,  
<sup>3)</sup>부경대학교 화학공학과

### Adsorption and Leaching Characteristics of Nonionic Pesticides in Soils of Jeju Island, Korea

Si-Bum Chun<sup>1)</sup>, Ik-Hyun Hyun<sup>2)</sup>, Min-Gyu Lee<sup>3)</sup>, Sang-Kyu Kam\*

Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

<sup>1)</sup>Jeju National University Biotechnology Regional Innovation Center, Jeju 63243, Korea

<sup>2)</sup>Research Institute of Health & Environment, Jeju Special-Governing Province, Jeju 63142, Korea

<sup>3)</sup>Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 48657, Korea

#### Abstract

Agricultural soils around springwaters heavily affected by pesticide run-off and around wells considering the regional characteristics were collected at 24 stations in Jeju Island, and the physicochemical properties and adsorption and leaching characteristics of four nonionic pesticides (diazinon, fenitrothion, alachlor, and metalaxyl) were investigated. The values of the major soil factors affecting the adsorption and leaching of pesticides, namely, soil pH(H<sub>2</sub>O), organic matter content, and cation exchange capacity (CEC), were in the range of 4.64 ~ 8.30, 0.9 ~ 13.1% and 12.7 ~ 31.7 meq/100 g, respectively. The Freundlich constant, K<sub>F</sub> value, which gives a measure of the adsorption capacity, decreased in the order of fenitrothion > diazinon > alachlor > metalaxyl, which was identical to their lower water solubility. Among the collected soils, the K<sub>F</sub> value was very highly correlated with organic matter content ( $r^2 = 0.800 \sim 0.876$ ) and CEC ( $r^2 = 0.715 \sim 0.825$ ) and showed a high correlation with clay content ( $r^2 = 0.473 \sim 0.575$ ) and soil pH(H<sub>2</sub>O) ( $r^2 = 0.401 \sim 0.452$ ). The leaching of pesticides in the soil column showed a reverse relationship with their adsorption in soils, i.e., the pesticides leached more quickly for the soils with lower values of organic matter content and CEC among the soils and for the pesticides with higher water solubility.

**Key words** : Adsorption, Leaching, Nonionic pesticides, Soils of Jeju Island, Physicochemical properties of soils, Freundlich constant (K<sub>F</sub>)

#### 1. 서론

농산물 증대를 위해 농약의 점차적인 증가로 인해 초래되는 환경오염문제가 전세계적인 이슈로 대두되

고 있으며(Nometh-Konda et al., 2002), 이들 물질의 토양, 지하수 및 지표수의 오염은 직접적인 노출 또는 음식물 및 음용수에서 잔류를 통해 환경 및 인간의 건강에 심각한 위해를 초래할 수 있다(Larson et al.,

Received 16 April, 2018; Revised 4 May, 2018;

Accepted 29 May, 2018

\*Corresponding author: Sang-Kyu Kam, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea  
Phone : +82-64-754-3444  
E-mail : sakyukam@jejunu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1997).

제주도 감귤원 등의 농경지에서는 diazinon (O,O-diethyl O-2-isopropyl-6-methylpyrimidin-4-yl phosphorothioate), fenitrothion (O,O-dimethyl O-4-nitro-m-tolyl phosphorothioate) 등의 유기인계 살충제, chloroacetamide계 제초제인 alachlor [2-chloro-N-(2,6-diethylphenyl)-N-(methoxymethyl) acetamide] 등의 비이온성 농약이 사용되고 있으며, 또한 비이온성 농약으로서 식물병원균에 대해 잔류성이고 침투성인 acylalanine계 살균제인 metalaxyl [methyl-N-(2,6-dimethylphenyl)-N-(2-methoxyacetyl)-DL-alaninate]은 전세계적으로 광범위하게 사용되고 있으며(Sharma and Awasthi, 1997), 제주도에 서도 과거에 많이 사용되었으나 지하수에 검출되어 이 농약을 2004년 제주특별자치도 고시 지하수 오염방지를 위한 공급 및 사용제한 농약품목으로 고시하였으나 이후에도 골프장에서 검출되었다고 보고되고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2008).

농경지 등에 살포되는 농약은 작물체에 부착되기도 하지만 이의 양은 적은 편이며 대부분 토양 중에 유입된다(Leonard, 1990). 토양 중에 농약이 유입되면 농약은 토양 중의 액상과 고상에 분배되고 이는 많은 다른 측면의 농약의 거동에 영향을 미친다. 특히, 토양 고상으로의 흡착과정은 휘발성, 생물이용률(효능, 분해율), 지하수 오염을 유발하는 표면하로 이동성(용탈)에 크게 영향을 미치며(Gustafson, 1989), 흡착 및 용탈은 토양의 물리화학적 성질(유기물 함량, 양이온 교환용량(CEC), 토성, 토양 pH, 화학적 성분 및 광물 조성), 기후조건(온도, 수분함량) 및 농약의 성질(물에 대한 용해도, 증기압, 친수성-소수성 성질, 이온상태, 화학적·광학적·생물학적 성질) 등의 요인에 의해 크게 달라진다(Kam et al., 1999; Kah and Brown, 2006). 일반적으로 토양에 강하게 흡착되고 물에 대해 낮은 용해도를 가지고 있는 농약은 토양 중에서 비교적 용탈되기 어렵다(Kim, 2001).

제주도 토양은 63개 토양통으로 육상에 비해서 매우 다양한 물리화학적 성질을 갖고 있으며, 크게 흑색 화산회토, 농암갈색 화산회토, 암갈색 비화산회토 및 갈색토 등 토양색에 의해 4개의 토양군으로 구분되며, 농암갈색 화산회토가 가장 많은 면적을 차지하고 있

다. 따라서 다양한 물리화학적 성질을 지니고 있는 제주도 토양에서 농약의 흡착 및 용탈을 포함한 거동은 크게 다를 것이다. 또한 제주도 토양은 분류학적으로 토양층이 완전히 형성되지 않은 Entisol 및 Inceptisol에 속하는 토양이 많아 표토층이 얇고 투수성이 매우 양호한 지질학적 특성을 갖고 있어 토양으로 유입된 오염물질은 용탈되어 지하수까지 이동할 가능성이 매우 높다(Hyun et al., 2007). 따라서 제주도 토양 중에 살포되는 농약은 지하수 오염과 직결될 수 있는 여러 요인을 갖고 있기 때문에 제주국제자유도시 특별법에 지하수 오염방지를 위한 농약사용의 제한이 가능하도록 개정하였다.

본 연구에서는 다양한 물리화학적 성질을 갖고 있는 제주도 토양에서 토양으로부터 농약의 유출에 의해 영향이 크게 나타나는 용천수가 위치하고 있는 주변 농경지 및 지역적 특성을 고려하여 주변에 지하수 관정이 있는 농경지 등 24개 지점의 토양에 대해 상기 언급한 비이온성 농약인 diazinon, fenitrothion 등의 유기인계 살충제, chloroacetamide계 제초제인 alachlor 그리고 acylalanine계 살균제인 metalaxyl에 대해 흡착 특성을 검토하였고, 또한 다양한 대표 토양에 대해 용탈 특성을 살펴 보았다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 토양시료 및 농약

토양시료 채취지점은 주로 토양으로부터 농약의 유출에 대해 영향이 크게 나타나는 용천수(해수의 영향을 받지 않고 상시 채수가 가능한 지점)가 위치하고 있는 주변 농경지 14개 지점과 제주도의 지역적 특성을 고려하여 주변에 지하수 관정이 있는 농경지 10개 지점 등 24개 지점을 선정하여 토양시료를 채취하였다(Fig. 1). 토양시료는 GPS (GARMIN, GPSmap 60CSx)로 시료채취 지점을 확인한 후 15 cm 내외의 지표층을 대상으로 토양오염공정시험방법에 따라 채취하였으며, 표면의 잡초, 유기물 등의 이물질을 제거하였다. 채취한 시료는 폴리에틸렌봉지에 보관하여 실험실로 운반하여 전처리를 실시하였다.

채취한 지점의 토양은 토양의 정밀조사(Agricultural Research Institute, 1976)에 의한 토양통, GPS로 측정된

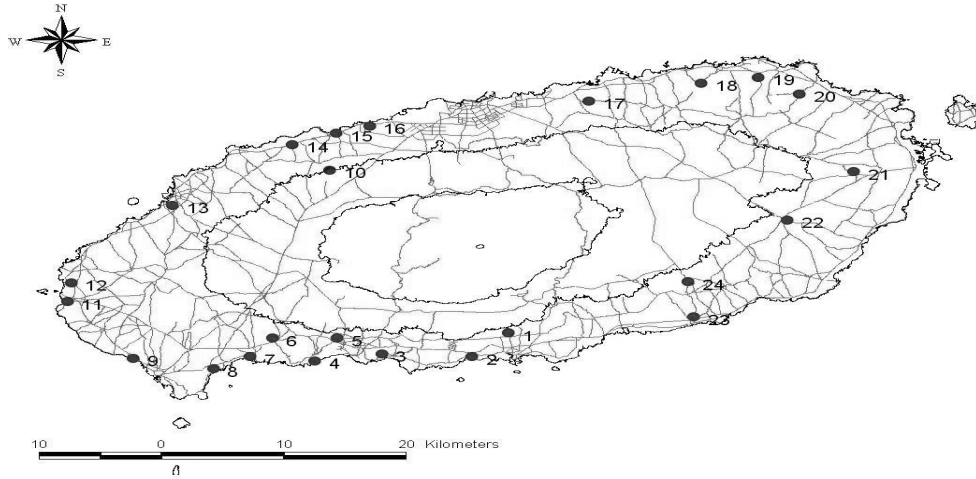


Fig. 1. Sampling sites of soils in Jeju Island in this study.

위·경도, 토지이용현황 및 주변 용천수 및 지하수관정을 Table 1에 나타내었다. 실험실로 운반된 토양시료는 스테인레스제 바트(vat)위에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘되게 헤쳐 놓고 풍건시킨 다음, 나무망치로 분쇄하여 눈금간격 2.0 mm의 표준체로 체걸음 한 것을 분석용 시료로 하였다.

본 시험에 사용된 비이온계 농약은 현재 감귤원 등의 농경지에 많이 사용되고 있는 유기인계 살충제인 diazinon, fenitrothion, chloroacetamide계 제초제인 alachlor 그리고 acylalanine계 살균제인 metalaxyl 등 4종을 공시농약으로 선정하였으며 이들 농약은 Supelco사(USA)에서 생산된 99.5%의 농약을 구입하여 사용하였다. 이들 각 농약 일정량을 취하여 잔류농약 분석용 acetone에 녹여 1000 µg/mL 되도록 stock solution을 제조하였다. 흡착시험에 사용된 용액의 농도는 농약의 물에 대한 용해도(diazinon 19 mg/L, fenitrothion 60 mg/L, alachlor 240 mg/L, metalaxyl 7,100 mg/L) (Tomlin, 1994)를 고려하여 모두 0.5 ~ 10 µg/mL의 범위에서 단계적으로 5개 농도가 되도록 1000 mL 용량플라스크에 stock solution의 일정량을 취하여 놓고, 용액의 전해질 농도를 일정하게 유지시키기 위하여 1 M CaCl<sub>2</sub> 10 mL를 가하여 0.01 M이 되게 하였다.

2.2. 실험 방법

채취한 토양 중의 물리화학적 성질을 파악하기 위해 토양 pH(H<sub>2</sub>O), 토양 pH(NaF), 토양 유기물함량, 양이온 치환용량(CEC), 토양색 및 토성(soil texture)을 분석하였으며, 토양 pH(H<sub>2</sub>O)는 토양:물 = 1:5법, 화산회토 여부를 확인하는 토양 pH(NaF)는 1:50법, 유기물 함량은 Walkley & Black법(1934), 양이온 치환용량(CEC)는 1 M CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>법(Page, 1985), 토양색은 Munsell color법, 토성은 피펫법(Choi et al., 2002)에 따라 수행하였다.

토양 중 상기 4종의 농약 흡착실험은 표준 batch equilibrium technique에 의해 수행하였다. 채취한 토양 1.0 g과 위에서 조제한 농약 시험용액 20 mL을 40 mL borosilicate glass vial에 취하고 screw cap으로 막은 후, 20℃로 유지한 항온수조에서 0.5~36시간 동안 일정시간 간격으로 변화시키면서 수평진폭 180 rpm으로 진탕시키고, 원심분리기를 사용하여 4000 rpm으로 30분간 원심분리하여 상징액 5 mL를 borosilicate glass vial에 분취하고 hexane과 ethyl acetate를 1:1 혼합한 추출용매 5 mL를 넣어 안쪽면이 teflon으로 처리된 septum을 가진 screw cap으로 막은 후 1분간 강하게 흔들어서 농약성분을 추출하였다. 그 후 30분간 방치한 다음 유기용매층 2 µL를 GC/MS/MS (Varian 240-MS)에 주입하여 상징액 중의 농약성분을 정량

**Table 1.** Soil series, location, land use and surrounding spring water or well of sampling sites

Symbol	Soil series	Location		Land use	Surrounding spring water and well No.
		Longitude	Latitude		
1	Ora series	126.33.31	33.16.05	orchard	Jijangsaem
2	Yongsu series	126.31.37	33.14.41	orchard	Sokgolmul
3	Ora series	126.26.49	33.14.41	orchard	Seonggwaetnaetmul
4	Ora series	126.33.13	33.14.18	farm products	Nonjitmul
5	Donggui series	126.24.28	33.15.42	orchard	Saengsumul
6	Ora series	126.21.07	33.15.41	orchard	Tongmul
7	Ora series	126.19.53	33.14.29	farm products	Hagangmul
8	Inseong series	126.17.56	33.13.40	-	Bungeomot
9	Haweon series	126.13.50	33.14.22	-	Halmangmul
10	Donggui series	126.24.01	33.26.31	orchard	Yusuamcheon
11	Ido series	126.10.17	33.17.59	farm products	D-181
12	Gangjeong series	126.10.27	33.19.14	farm products	F-011
13	Donggui series	126.15.44	33.24.15	farm products	Mundumul
14	Sara series	126.22.04	33.28.12	orchard	D-011
15	Donggui series	126.24.22	33.28.56	fallow ground	Paengpungmul
16	Ora series	126.26.06	33.29.24	farm products	Gumyeongmul
17	Jungeom series	126.37.40	33.31.04	orchard	F-375
18	Gujwa series	126.43.36	33.32.16	farm products	F-156
19	Gujwa series	126.46.34	33.32.40	farm products	D-019
20	Minag series	126.48.47	33.31.37	farm products	D-012
21	Jeju series	126.51.38	33.26.33	farm products	89Susan
22	Donggui series	126.48.14	33.23.25	farm products	D-020
23	Gueom serie	126.43.13	33.17.10	orchard	Jineungyo
24	Ora series	126.42.53	33.19.24	orchard	F-389

하였다.

흡착량 계산은 상징액 중 잔류량 외에는 흡착된 것으로 간주하여 계산하였으며, 토양을 가하지 않은 공 시험에 대해서도 시료에 동일한 방법으로 시험하여 검량선으로 사용하였다.

토양 중 농약의 용탈특성은 흡착특성에서 검토된 토양 중 농약의 흡착에 크게 기여하는 것으로 알려져 있는 유기물 농도(Singh et al., 1990; Kah and Brown, 2006)가 매우 높은 토양(24), 매우 낮은 토양(16) 및 중간 정도(3)의 3종류의 토양을 선정하여 PTFE 재질 stopcock가 부착된 내경 5 cm, 길이 30 cm인 glass column에서 20 cm (392.5 cm<sup>3</sup>) 까지 충전하여 수행하였

다(Fig. 2). 이 때 칼럼 하부에 grid를 끼우고 토양을 충전한 후 grid 및 산처리된 sea sand를 충전하였다. 토양의 용탈시험은 일반적으로 자연조건에서 토양의 용적밀도(bulk density)에 기인하여 수행하고(Sharma and Awasthi, 1997) 이 때 사용된 흑색 화산회토, 농암 갈색 화산회토 및 암갈색 비화산회토의 용적밀도(bulk density)는 각각 0.5~0.7, 0.9~1.0, 1.0~1.2의 범위에 있어(Hyun et al., 1995; Kam et al., 1999) 본 연구에서는 자연조건과 유사한 토양조건을 만들기 위해 토양 24, 토양 3 및 토양 16에 대해 용적밀도를 0.7, 0.9 및 1.0가 되도록 24번 토양은 313 g, 3번 토양은 376 g, 16번 토양은 413 g을 가하고 층위별로 같은

구조가 되도록 유리봉으로 잘 다지면서 충전하였다. 칼럼내 충전된 각 토양의 물리화학적 성질은 Table 2와 같다.

각 토양칼럼을 증류수로 포화시킨 후 농약 1000 µg/mL 4 mL를 각각 토주 표면에 끌고루 spiking 하고, 용탈액은 0.01 M CaCl<sub>2</sub> 용액을 사용하여 28일 동안 수행하였다. 유출속도는 3번 토양의 경우 14.0± 2.8 mL/hr, 16번 토양의 경우 13.2± 2.5 mL/hr, 24번 토양의 경우 4.1± 0.7 mL/hr 이며, 용탈수는 50 mL 액량계를 사용하여 20-40 mL 단위로 수집하여 흡착시험에서와 동일한 방법으로 농약의 용탈정도를 측정하였다.

용액 중의 농약은 HP-5MS capillary column (30 m x 0.25 mm ID x 0.25 µm film thickness, Agilent, USA)으로 분리하고 이를 질량분석기로 정량하는 GC/MS/MS (Varian 240-MS)에 주입하여 상징액 중

의 농약성분을 정량하였으며, 분석조건은 Table 3과 같다.

본 연구에서 사용된 농약의 분석조건에 대한 농약의 검출한계 및 회수율을 구하기 위하여 일반적으로 농약의 흡착에 크게 기여하는 유기물 함량을 기준으로 하여 유기물 농도가 가장 높은 토양(24) 및 가장 낮은 토양(16) 각각 7개 시료에 상기 농약 0.0625 µg/g 및 0.625 µg/g을 각각 가하고 전처리 및 분석조건에 따라 측정된 농도에 대한 표준편차와 자유도(6) 및 99% 신뢰수준의 계수 t값(3.707)을 곱하여 검출한계 (Method Detection Limit, MDL)를 구하였으며, 또한 첨가한 농도에 대한 회수율을 측정하였다. 토양 중 농약의 검출한계(MDL)는 diazinon, fenitrothion, alachlor 및 metalaxyl에 대해 6.04~6.45 ng/g, 8.34~9.38 ng/g, 8.23~9.65 ng/g, 8.97~ 9.34 ng/g 이었다. 그리고 농약의 회수율은 0.0625 µg/g, 0.625 µg/g에 대해 diazinon은 각각 85.3~93.8%, 87.0~90.7%, fenitrothion은 각각 70.4~77.8%, 76.2~81.8%, alachlor는 각각 82.5~91.4%, 83.2~88.59%, metalaxyl은 각각 86.6~97.1%, 89.6~97.0%의 범위로 농약 및 토양의 종류에 따라 차이를 보였으나 비교적 양호한 회수율을 보였다.

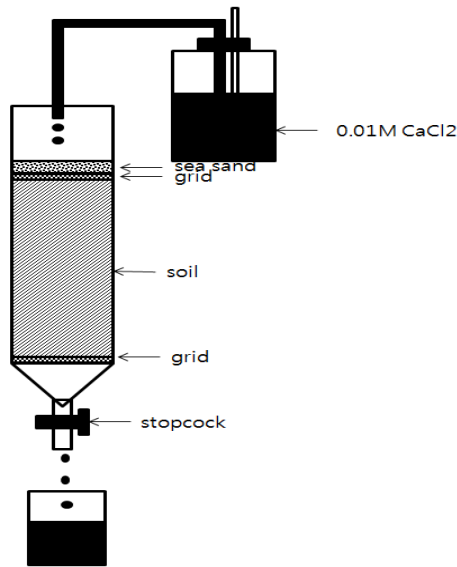


Fig. 2. A Schematic diagram of leaching experiment using soil column.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 토양 시료의 물리화학적 특성

본 연구에 사용된 토양의 물리화학적 특성을 Table 4에 나타내었다. 토양 pH(H<sub>2</sub>O)는 4.64~8.30(평균 6.09)로 채취지점에 따라 큰 차이를 보였으며, 오염되지 않은 제주도 63개 토양통에서 채취한 값(4.6~8.3)과 동일하였다(Kim et al., 2015). 그러나 본 채취지점의 평균값은 이들 지역의 평균값(5.5) 보다는 상대적으로 높은 값을 보였고, 전국 토양측정망 및 실태조사

Table 2. Physical properties of the soil column (5 cm × 20 cm) for leaching experiment

Soil No.	Added amount (g)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Particle density (g/cm <sup>3</sup> )	Pore volume (PV, mL)	Porosity (%)
3	376	0.9	2.06	221	56.3
16	413	1.0	2.07	203	51.6
24	313	0.7	2.01	256	65.2

**Table 3.** Analytical conditions of nonionic pesticides (diazinon, fenitrothion, alachlor and metalaxyl) by GC/MS/MS

Pesticides	MW	Column	Injection temp.	Oven temp.	Column flow	Q1	MRM1	MRM2	eV
Diazinon	304			100 °C (1 min) →		304	179	137	30
Fenitrothion	277	HP	270 °C	10 °C/min →	1.0	277	260	109	10
Alachlor	269	-5MS		270 °C (1 min) →	mL/min	188	131	160	15
Metalaxyl	279			3 °C/min		206	132	162	10

평균값인 6.6(Ministry of Environment, 2005) 보다 상대적으로 낮은 값을 보였다.

본 연구에 사용된 토양 중 화산회토/비화산회토의 분류 방법으로 미국 농무성 Soil Taxonomy Andepts의 중요한 기준으로 되어 있는 NaF 용액을 이용한 allophane test 반응이 이용되고 있으며, pH(NaF)>9.4이면 화산회토로 분류하고 있다(Calhoun et al., 1972). 본 연구에 사용된 전체 토양의 pH(NaF)는 7.34~11.29 범위(평균 8.96)에 있으며, pH(NaF)>9.4를 화산회토의 분류기준 적용하면 토양시료 중 화산회토는 10개(9.47~11.29, 평균 10.26), 비화산회토는 14개(7.34~8.81, 평균 8.05)로 분류되었다.

토양 유기물은 동식물의 잔재가 토양으로 유입되어 분해되어 생성된 것으로, 농약의 흡착에 있어서 가장 크게 영향을 미치는 요인이다. 즉, 유기물 농도가 높을수록 농약의 흡착량과는 매우 높은 상관성을 갖고 있다고 보고하고 있다(Singh et al., 1990; Kah and Brown, 2006). 전체 토양시료의 유기물 함량은 0.9~13.1%(평균 5.0%)을 보였으며, pH(NaF)로 분류한 화산회토 및 비화산회토의 유기물 함량은 각각 0.9~13.1%(평균 6.4%), 0.9~10.7%(평균 3.9%)로 화산회토, 비화산회토 관계없이 큰 차이를 보였고, 화산회토의 평균농도는 비화산회토에 비해 약 1.6배 높은 농도를 보임을 알 수 있다. 또한 육지부 일반토양의 유기물이 2%를 약간 상회하는 것과 비교하면 매우 높은 수준임을 알 수 있다.

제주도 토양에서 양이온치환용량(CEC)은 주로 유기물에 기인된다고 보고되고 있다(Park et al., 1985). 토양시료 전체의 CEC는 12.7~31.7 meq/100 g(평균 20.8 meq/100 g)으로 채취지점에 따라 큰 차이를 보

였지만, 화산회토 및 비화산회토의 CEC는 각각 14.8~31.5 meq/100 g(평균 23.9 meq/100 g), 12.7~31.7 meq/100 g(평균 18.9 meq/100 g)으로 평균값은 화산회토가 비화산회토보다 약 1.3배 높았다.

토양의 색은 모암, 유기물의 함량, 함수율 등에 따라 다양하게 나타나며 'Munsell Color Chart'를 이용하여 토양색을 측정된 결과 채취된 토양시료의 토색은 흑색 6개, 갈색 4개, 암갈색 3개, 농암회갈색 2개, 암황갈색 1개를 나타내었으며, 대체적으로 유기물 함량이 높은 토양일수록 흑색, 농암회색을 띄었다.

토성(soil texture)을 살펴보면, 점토(clay) 9.4~42.7%(평균 21.2%), 실트(silt) 9.8~58.1%(평균 22.6%), 모래(sand) 19.7~76.4%(평균 56.2%)로 채취지점에 따라 큰 차이를 보였으며, 평균적으로 모래 함량이 점토나 실트에 비해 약 2.5배 높은 것으로 나타났다. 점토나 실트함량은 비슷하였다. 이의 함량에 따른 토성은 식양토(clay loam) 7개, 경식토(light clay), 사질식양토(sandy clay loam) 및 사양토(sandy loam)이 각각 4개, 미사질양토(silty loam) 및 양토(loam)가 각각 2개, 사질식토(sandy clay)가 1개로 분류되었다.

### 3.2. 토양 중 비이온계 농약의 흡착 특성

#### 3.2.1. 흡착평형 도달시간

토양에서 농약의 흡착은 진탕시간이 흡착량에 많은 영향을 끼치기 때문에 토양의 농약 흡착에서 진탕 시간을 결정하는 것이 중요하다. 토양의 농약 흡착에는 여러 가지 요인의 토양의 물리화학적 특성이 관여하지만 가장 중요한 인자는 유기물 함량으로 알려져 있다(Singh et al., 1990; Kam et al., 1999; Kah and

**Table 4.** Physicochemical properties of the soils used in this study

Soil No	pH		Organic matter (%)	CEC (meq/100 g)	Soil color	Soil texture		
	H <sub>2</sub> O	NaF				Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
1	5.03	10.14	6.7	29.7	Black	12.2	Loam 21.4	66.4
2	4.69	8.60	7.4	26.1	Very dark grayish brown	16.5	Clay loam 24.7	58.8
3	5.15	9.71	7.5	21.9	Very dark gray	34	Light clay 13	53
4	5.49	10.23	3.8	19.6	Black	11.5	Loam 23.1	65.4
5	6.70	8.81	4.6	16.1	Very dark gray	16.4	Clay loam 24.7	58.9
6	5.29	9.56	4.3	30.3	Black	41.9	Light clay 23.9	34.2
7	8.30	8.44	4.2	13.8	Dark brown	17.1	Sandy clay loam 9.8	73.1
8	8.07	8.74	3.0	17.6	Very dark gray	17.1	Clay loam 34.2	48.7
9	6.87	7.40	2.5	16.7	Brown	12.4	Silty loam 58.1	29.5
10	6.11	7.68	10.7	31.7	Very dark gray	38.8	Light clay 20.6	40.6
11	6.56	7.86	3.6	16.1	Very dark gray	13.4	Sandy loam 13.4	73.2
12	4.92	7.34	0.9	12.7	Brown	14.9	Sandy loam 18.9	66.2
13	8.22	8.58	4.0	13.3	Brown	15.3	Clay loam 25.5	59.2
14	5.00	8.31	3.1	16	Dark brown	16.3	Clay loam 31.1	52.6
15	5.72	7.34	2.7	15.7	Dark brown	9.4	Sandy loam 14.2	76.4
16	6.82	7.50	1.2	16.1	Very dark grayish brown	17.1	Clay loam 25.8	57.1
17	5.47	8.01	1.4	25	Brown	24.9	Sandy clay loam 12.2	62.9
18	7.97	9.47	1.2	21.2	Very dark gray	42.7	Light clay 14.2	43.1
19	8.02	10.12	0.9	14.8	Dark yellowish brown	15.2	Clay loam 26.7	58.1
20	4.93	10.98	4.1	18.2	Black	22.6	Sandy clay loam 15.1	62.3
21	5.15	11.29	11.7	25.4	Black	29.3	Sandy clay 14.8	55.9
22	6.33	10.95	10.3	26.2	Black	17.8	Clay loam 22.2	60
23	4.64	8.12	7.5	23.6	Very dark gray	15.4	Sandy clay loam 9.8	74.8
24	4.76	10.20	13.1	31.5	Very dark gray	35.7	Silty clay 44.6	19.7

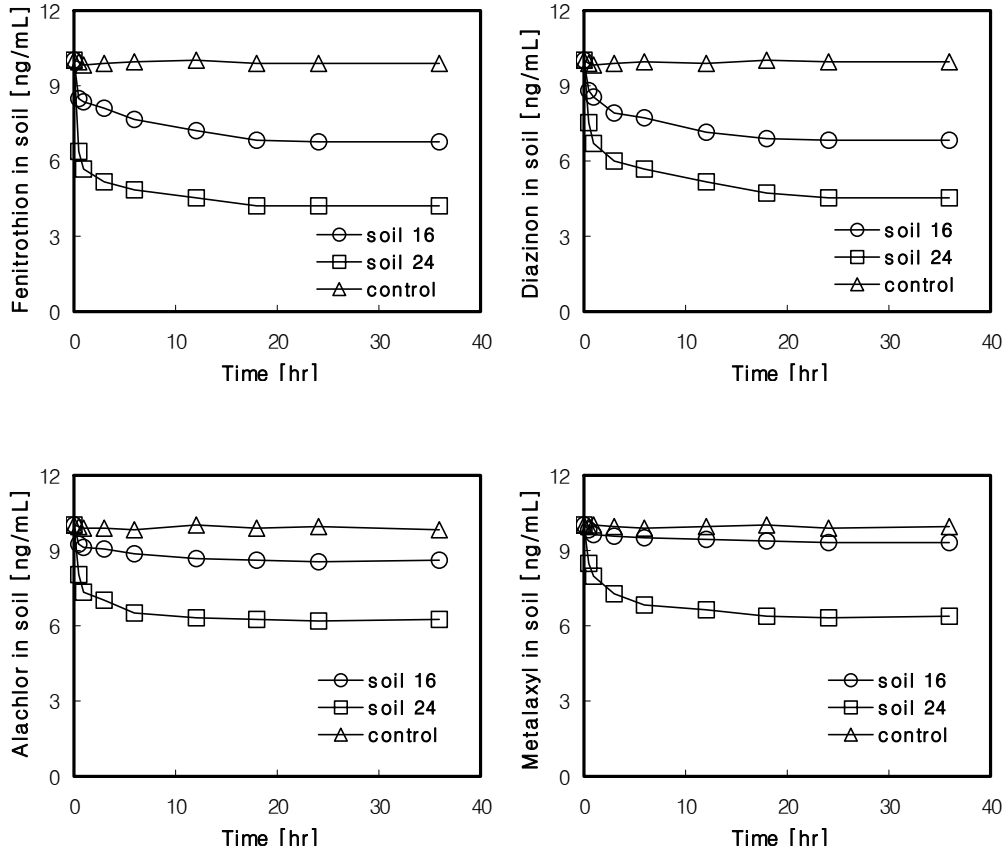


Fig. 3. The adsorption kinetics of diazinon, fenitrothion, alachlor, and metalaxyl in soils.

Brown, 2006).

토양의 농약 흡착시험에서 대부분의 연구자들이 흡착평형시간을 24시간으로 적용하고 있으나(Hu et al., 1998; Kam et al., 1999) 일부 연구자는 2~72시간 까지 다르게 적용하고 있어(Cheah et al., 1997; Niwas et al., 2000), 적정 흡착평형시간을 결정하기 위해 채취한 토양 중 유기물 농도가 가장 낮은 토양(16), 가장 높은 토양(24) 및 토양을 사용하지 않은 대조군을 사용하여 0.01 M CaCl<sub>2</sub>를 함유하는 상기 농약(diazinon, fenitrothion, alachlor, metalaxyl) 10 ng/mL 20 mL를 40 mL borosilicate vial에 취하고 0.5시간에서 36시간 까지 변화시키면서 20 °C의 항온수조에서 진탕시켜 상징액 중의 각 농약의 농도를 측정하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 토양의 종류에 따라 토양 24의 경우 6시간 이내 35~52% 흡착되고 이후 18시간까지 서서히 흡착되어 평형에 도달하였으며, 그 후 18시간 동안에는 흡착평형농도의 변화가 없었다. 토양 16의 경우 토양 24와 마찬가지로 흡착능에 차이를 보였지만 비슷한 흡착거동을 보임을 알 수 있었다. 또한 공시험액에서 유리유기에 흡착 또는 휘발성에 의한 농약의 손실이 없었다. 따라서 24시간 흡착 평형 후 농약의 농도변화는 흡착된 것으로 계산하였다.

### 3.2.2. 비이온계 농약의 흡착특성

본 연구에서 채취한 24개 토양시료의 농약 흡착능을 검토하기 위하여 각 토양시료 1.0 g을 농약의 용해도를 고려하여 조제한 0.5, 1, 2, 5, 10 µg/mL의 4개



농약(diazinon, fenitrothion, alachlor, metalaxyl)을 함유하는 0.01 M CaCl<sub>2</sub> 20 mL에 가하여 2.2의 농약의 흡착실험 방법에 따라 수행하였다. 흡착평형 후 그 결과를 농약 흡착 연구에 광범위하게 적용되고 있는 Freundlich 흡착등온식(Kim and Feagley, 1998; Kam et al., 1999)에 적용하였으며, 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\log(x/m) = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (1)$$

여기서 x/m는 단위 토양 무게당 흡착된 농약의 양 (µg/g), C<sub>e</sub>는 흡착평형 후 용액 중의 농약의 농도 (ng/mL), K<sub>F</sub>와 1/n는 Freundlich 상수이다. K<sub>F</sub>는 각 토양에 대한 농약의 상대적 흡착용량을 나타내는 지표이고, 1/n는 용액 중 평형농도와 흡착량 사이의 상대적 직선성 정도를 나타내는 흡착강도의 지표이다. x/m는 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{x}{m} = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad (2)$$

여기서 C<sub>0</sub>는 초기 농약의 농도, V는 용액의 부피 (mL), M는 토양의 양(g)이다.

상기 농약에 대한 Freundlich 흡착등온식 중 alachlor에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었고, 4종의 농약에 대해 Freundlich 흡착등온식으로부터 구한 흡착 파라미터 및 결정계수를 Table 5에 나타내었다.

Fig. 4 및 Table 5에서 보여지는 바와 같이 결정계수(r<sup>2</sup>)는 0.94 이상으로 이는 모든 흡착 데이터가 Freundlich 흡착등온식에 잘 부합된다는 것을 보여주고 있다(Cao et al., 2008).

토양에 따른 K<sub>F</sub> 값은 diazinon의 경우 6.0~36.8, fenitrothion의 경우 7.3~52.3, alachlor의 경우 2.8~21.0, metalaxyl의 경우 1.7~10.3으로 토양에 따라 큰 차이를 보였으며, 농약의 종류사이에서는 대체적으로 fenitrothion > diazinon > alachlor > metalaxyl의 순으로 흡착능을 보였다. 이러한 결과는 농약의 물에 대한 용해도가 낮을수록 높은 흡착량을 보인다는 결과와 일치하고 있다(Kim and Feagley, 1998; Kam et al.,

1999). 또한 토양의 종류에 따라서는 다소 차이는 있지만 대체적으로 soil 24 > soil 21 > soil 10 > soil 22 > soil 23 > soil 3 > soil 1 > soil 6 > soil 20 > soil 2 > soil 17 > soil 4 > soil 5 > soil 18 > soil 14 > soil 11 > soil 15 > soil 8 > soil 9 > soil 12 > soil 16 > soil soil 13 > soil 19, soil 7의 순서를 보였으며, 대체적으로 유기물 농도 및 CEC가 높은 토양이 높은 K<sub>F</sub> 값을 보였다.

토양 중의 농약의 흡착에 있어 K<sub>F</sub>값은 토양의 물리 화학적 특성과 상관성을 보인다고 보고되고 있어(Kah and Brown, 2006), 토양 중의 유기물 함량, CEC, 토성 중 점토 및 실트 함량 및 토양 pH와의 상관성을 검토하여 그 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 보여지는 바와 같이 K<sub>F</sub>값은 농약의 종류와 관계없이 유기물함량, CEC 및 점토함량과는 비교적 높은 상관성을 보이며, 특히 유기물 함량과는 매우 높은 상관성(r<sup>2</sup> = 0.800~0.876)을 보임을 알 수 있었으며, 다음으로 CEC(r<sup>2</sup> = 0.715~0.825), 점토함량(r<sup>2</sup> = 0.473~0.575), 토양 pH(r<sup>2</sup> = 0.40~0.45)의 순으로 상관성을 보였으며, 토성 중 silt 함량과는 상관성이 없음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 유기물 함량 및 점토함량이 높은 토양일수록 보통 더 많은 농약을 흡착하고 하부로의 이동을 지연시킨다는 연구결과(Inoue et al., 2004; Abate and Masini, 2005)와는 일치하고 있으나 토양 중 metalaxyl의 흡착에 있어서 상관성은 갖고 있으나 토성 중 점토함량(r = 0.99), CEC(r = 0.87)이나 유기물함량과는 이보다 낮은 상관성(r = 0.66)을 보인다는 결과와는 다소 상이함을 알 수 있었다(Sharma and Awasthi, 1997).

흡착강도를 나타내는 1/n 값은 diazinon의 경우 0.79~1.30, fenitrothion의 경우 0.59~0.75, alachlor의 경우 0.60~0.93, metalaxyl의 경우 0.64~0.93으로 대부분의 경우 0.5~0.9 범위의 L형 흡착을 보였는데(Giles et al., 1960), 이는 가장 일반적인 흡착형태로 초기 단계에서는 토양이 농약에 대한 친화성을 가지고 있는 것을 나타내며(Weber and Peter, 1982), 흡착이 진행될수록 흡착면적이 감소하여 흡착이 점점 어렵게 되는 것을 의미한다. 또한 diazinon의 경우 많은 토양에서 0.9~1.1 범위의 C형 흡착을 보였는데, 이는 농약이 액체상 보다는 토양으로 쉽게 침투하는

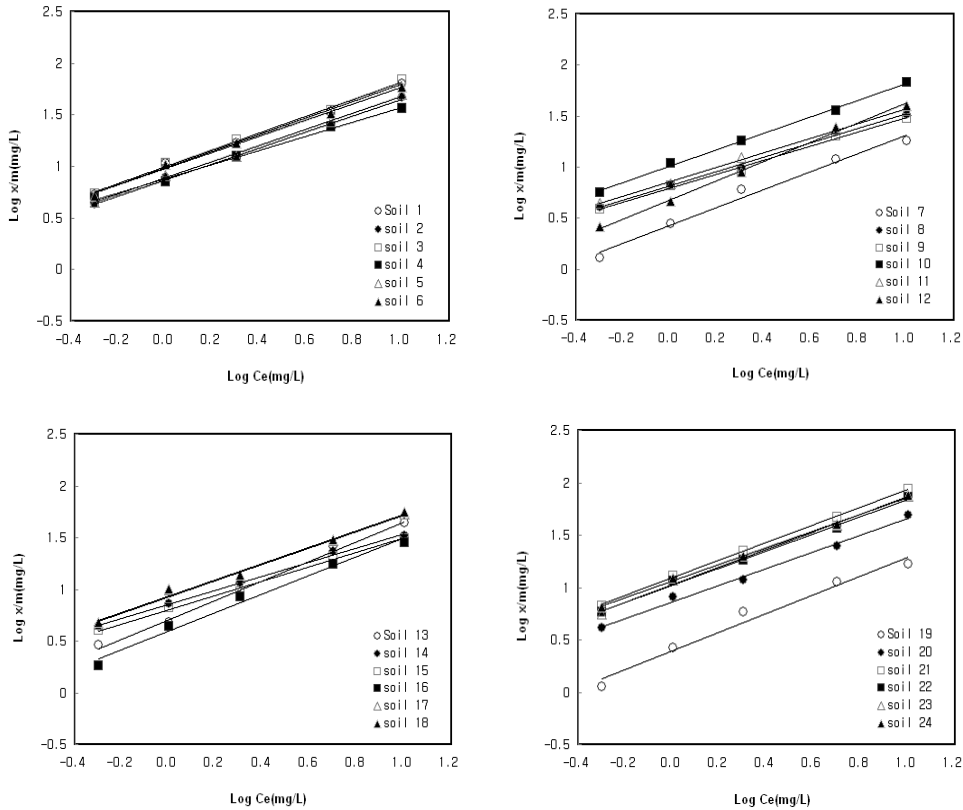


Fig. 4. Freundlich adsorption isotherms ofalachlor for 24 soils used in this study.

경우에 나타나므로 최대흡착량에 도달할 때 까지 일정한 속도로 흡착이 진행되며 최대치에 도달하면 직선형의 평균값을 나타내게 된다(Gregg and Sing, 1967).

3.3. 토양 중 비이온계 농약의 용탈특성

농약의 흡착특성에서 검토된 바와 같이 토양 중 농약의 흡착에 크게 기여하는 것으로 알려져 있는 유기물 농도를 기준으로 유기물 농도가 매우 높은 토양(24), 낮은 토양(16), 중간 정도(3)의 3종류의 토양을 선정하여 2.2의 용탈시험에 따라 수행하여 각 토양칼럼에 대해 Pore Volume (PV)과 농약의 누적용탈량과의 관계 및 각 농약에 대해 Pore Volume (PV)과 농약의 누적용탈량과의 관계를 각각 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 보여지는 바와 같이 모든 농약 항목별 용

탈이 가장 먼저 이루어지는 토양은 16번 토양이고 3번 토양, 24번 토양의 순으로, 토양의 유기물 함량과 역의 관계를 보임을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 Hyun et al.(1995)이 검토한 제주도 토양에서alachlor 및 chlorothalonil의 이동연구 및 Sharma and Awasthi(1997)이 연구한 불포화 조건의 토양에서 metalaxyl의 이동 연구에서 유기물 함량 및 CEC가 낮은 토양에서 농약이 가장 빨리 용출되었다는 결과와 일치하였다. 또한 24번 토양의 경우 유기물 농도 및 점토성분이 높아 다른 토양에 비해(3번 및 16번 토양의 경우 약 30 PV까지 유출) 유출속도가 느려 9 PV까지 유출하였다.

각 농약에 대해 토양칼럼에서의 용탈특성을 살펴보면(Fig. 6), metalaxyl은 3번 토양 칼럼에서 최초 검출이 1.0 PV에서 일어났으며, 3 PV까지 용탈이 급격히 증가하였으며(유입량의 70%), 이후 21.5 PV까지

**Table 5.** Freundlich parameters for the adsorption of diazinon, fenitrothion, alachlor and metalaxyl in soils

Soil No.	Diazinon			Fenitrothion			Alachlor			Metalaxyl		
	K <sub>F</sub>	1/n	r <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	1/n	r <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	1/n	r <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	1/n	r <sup>2</sup>
1	23.7	0.81	0.99	22.5	0.64	0.99	15.6	0.71	0.99	5.5	0.93	0.99
2	14.8	0.90	0.94	14.0	0.59	0.97	10.4	0.71	0.98	3.7	0.90	0.98
3	24.1	0.79	0.99	26.5	0.63	0.99	16.6	0.72	0.97	7.5	0.66	0.98
4	14.1	0.86	0.93	12.9	0.61	0.96	10.4	0.60	0.98	3.5	0.91	0.97
5	15.1	0.92	0.94	16.2	0.59	0.97	11.2	0.71	0.99	4.1	0.90	0.98
6	23.1	0.80	0.99	21.4	0.70	0.98	15.2	0.68	0.97	5.2	0.79	0.97
7	6.4	1.28	0.95	9.5	0.70	0.96	3.1	0.87	0.98	1.7	0.85	0.98
8	12.4	1.00	0.98	12.4	0.63	0.94	8.6	0.63	0.98	3.0	0.84	0.98
9	8.9	1.11	0.99	12.1	0.66	0.94	8.0	0.62	0.97	2.4	0.84	0.98
10	35.4	0.92	0.99	43.0	0.63	0.99	22.3	0.70	0.98	8.4	0.69	0.98
11	12.0	0.82	0.94	12.6	0.61	0.97	9.7	0.64	0.96	3.2	0.86	0.98
12	7.9	1.15	0.99	12.1	0.66	0.94	6.3	0.93	0.99	2.2	0.83	0.98
13	8.8	1.09	0.95	11.9	0.65	0.94	6.7	0.92	0.98	2.0	0.85	0.98
14	12.9	1.06	0.98	13.1	0.62	0.94	9.6	0.61	0.98	3.1	0.87	0.97
15	9.5	1.13	0.99	12.1	0.63	0.94	8.3	0.62	0.94	2.9	0.91	0.98
16	7.0	1.22	0.94	11.5	0.67	0.94	4.8	0.88	0.98	1.9	0.83	0.98
17	16.0	0.93	0.94	17.4	0.64	0.98	12.6	0.70	0.97	4.7	0.87	0.97
18	17.8	0.91	0.96	19.2	0.65	0.97	13.3	0.69	0.97	5.0	0.90	0.99
19	6.0	1.30	0.94	7.3	0.75	0.98	2.8	0.88	0.97	1.7	0.64	0.94
20	14.6	0.88	0.95	15.6	0.62	0.97	10.3	0.73	0.98	3.9	0.91	0.99
21	36.1	0.91	0.99	48.4	0.60	0.98	24.9	0.70	0.99	8.5	0.91	0.98
22	34.4	0.92	0.98	42.5	0.59	0.99	19.5	0.70	0.98	7.9	0.80	0.97
23	33.4	0.91	0.98	40.3	0.59	0.98	18.1	0.73	0.98	7.8	0.91	0.99
24	36.8	0.89	0.99	52.3	0.60	0.98	21.0	0.66	0.99	10.3	0.87	0.99

**Table 6.** Correlation between K<sub>F</sub> and physicochemical properties of soils for each pesticide

Pesticides	Correlation (r <sup>2</sup> )				
	Organic matter(%)	CEC (meq/100 g)	Soil pH	Soil texture	
				Clay (%)	Silt (%)
Diazinon	0.876	0.825	0.42	0.572	0.089
Fenitrothion	0.875	0.715	0.40	0.473	0.026
Alachlor	0.817	0.803	0.45	0.540	0.104
Metalaxyl	0.860	0.805	0.40	0.575	0.090

서서히 용탈되어 최대 누적용탈량은 유입량의 78%를 보였으며, 16번 토양칼럼에서 최초 검출은 0.5 PV이며 3 PV까지 용탈이 급격히 증가하였으며(유입량의 79%), 이후 21.5 PV까지 서서히 용탈되어 최대 누적

용탈량은 유입량의 85%를 보였으며, 24번 토양칼럼의 경우 최초 검출은 1.0 PV이며 이후 4 PV까지 용탈이 증가하였으며(유입량의 43%), 이후 서서히 용탈되고 있었으며, 유출된 9 PV까지 농약의 누적용탈율은

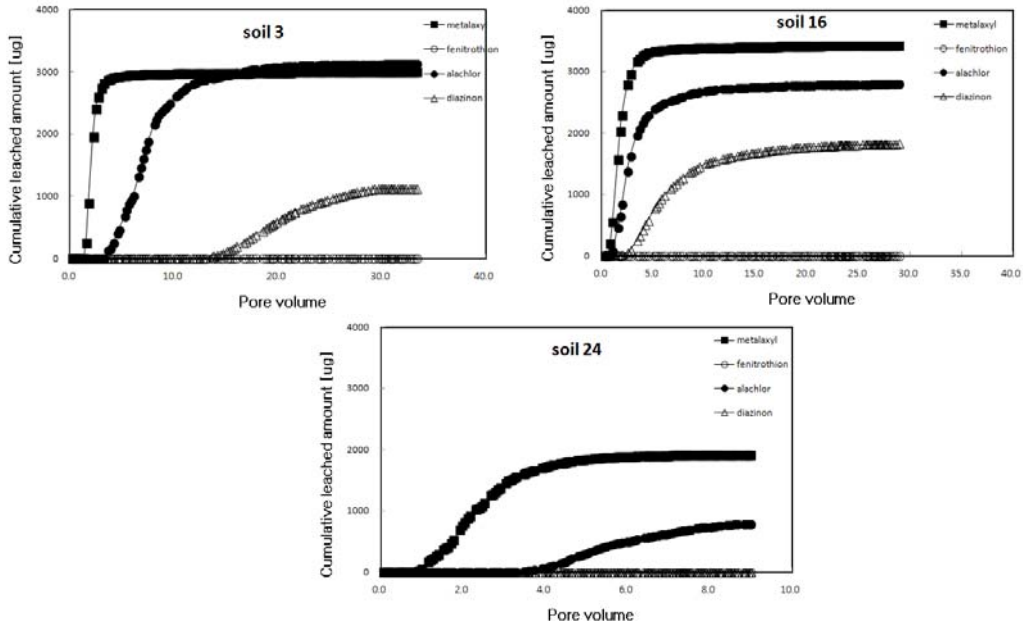


Fig. 5. Relationships between pore volume and cumulative leached amount of pesticide (diazinon, fenitrothion, alachlor, and metalaxyl) for each soil (3, 16, and 24) column.

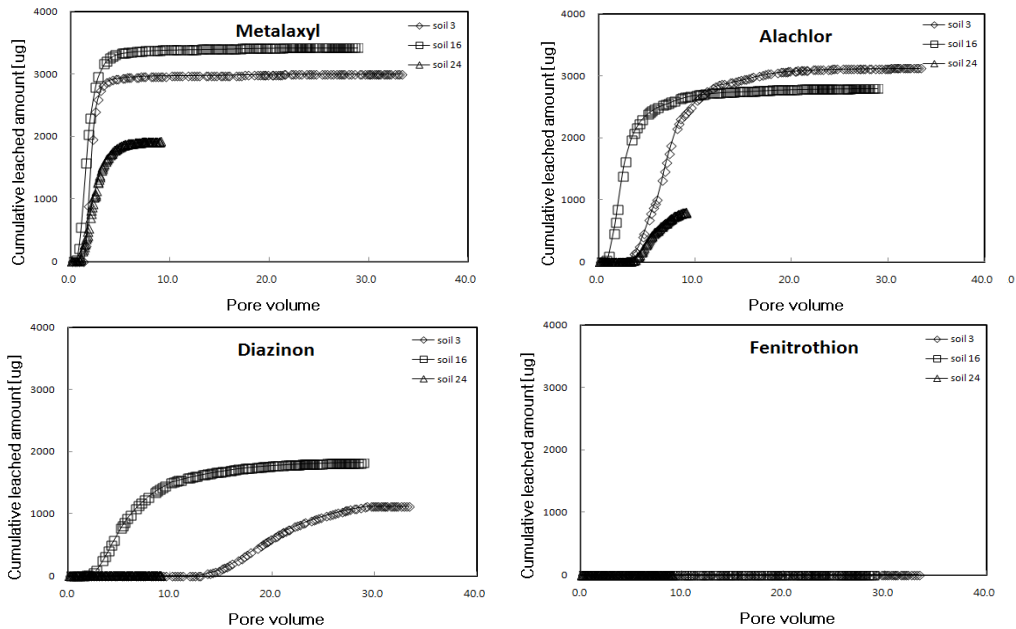


Fig. 6. Relationships between pore volume of soil column (3, 16 and 24) and cumulative leached amount of pesticide for each pesticide (metalaxyl, alachlor, diazinon, and fenitrothion).

유입량의 48%를 나타내었다.

Alachlor의 경우, 3번 토양 칼럼에서 최초 검출이 3.0 PV에서 일어났으며, 8 PV까지 용탈이 급격히 증가하였으며(유입량의 54%), 이후 29 PV까지 서서히 용탈되어 최대 누적용탈량은 유입량의 78%를 보였으며, 16번 토양칼럼에서 최초 검출은 0.8 PV이며 7 PV까지 용탈이 급격히 증가하였으며(유입량의 64%), 이후 25 PV까지 서서히 용탈되어 최대 누적용탈량은 유입량의 69%를 보였으며, 24번 토양칼럼의 경우 최초 검출은 3.3 PV이며 이후 서서히 용탈되고 있었으며, 유출된 9 PV까지 농약의 누적용탈율은 유입량의 20%를 나타내었다.

Diazinon의 경우, 3번 토양 칼럼에서 최초 검출이 13.6 PV에서 일어났으며, 이후 29 PV까지 서서히 용탈되어 최대 누적용탈량은 유입량의 28%를 보였으며, 16번 토양칼럼에서 최초 검출은 1.6 PV이며 12 PV까지 용탈이 급격히 증가하였으며(유입량의 40%), 이후 28 PV까지 서서히 용탈되어 최대 누적용탈량은 유입량의 45%를 보였으며, 24번 토양칼럼에서는 유출된 9 PV까지 농약이 검출되지 않았다. Fenitrothion의 경우 모든 토양칼럼에서 유출된 용액에서 검출되지 않았다.

이상의 결과로부터 토양칼럼에서의 농약의 용탈특성은 농약의 흡착특성에서 검토한 결과와 역의 관계를 보였는데, 즉, 토양사이에서는 유기물 함량, CEC 및 점토함량이 낮은 토양에서 농약의 종류에 관계없이 가장 먼저 용탈되었으며, 농약사이에서는 metalaxyl > alachlor > diazinon > fenitrothion의 순으로 토양에 대한 농약의 흡착능이 적을수록 빨리 용탈됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 흡착량이 많은 농약 및 흡착능이 큰 토양일수록 농약의 유출이 느리다는 타 연구자의 결과와 일치하였다(Weber and Peter, 1982; Kim and Peagley, 1998).

#### 4. 결론

다양한 물리화학적 성질을 갖고 있는 제주도 토양에서 토양으로부터 농약의 유출에 의해 영향이 크게 나타나는 용천수가 위치하고 있는 주변 농경지 및 지역적 특성을 고려하여 주변에 지하수 관정이 있는 농

경지 등 24개 지점의 토양에 대해 이들 토양의 물리화학적 성질을 살펴보고, diazinon, fenitrothion, alachlor 및 metalaxyl 등 4가지 농약에 대해 흡착 특성을 검토하였고, 또한 3개의 대표 토양에 대해 용탈 특성을 살펴보았다.

채취한 토양시료에서 농약의 흡착 및 용탈에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 주요한 물리화학적 성질을 살펴보면, 토양 pH는 4.64~8.30, 유기물 함량은 0.9~13.1%, CEC는 12.7~31.7 meq/100 g의 범위로 채취지점에 따라 큰 차이를 보였으며, 토성(soil texture)은 점토(clay) 9.4~42.7%(평균 21.2%), 실트(silt) 9.8~58.1%(평균 22.6%), 모래(sand) 19.7~76.4%(평균 56.2%)로 역시 채취지점에 따라 큰 차이를 보였으며, 평균적으로 모래 함량이 점토나 실트에 비해 약 2.5배 높은 것으로 나타났으며, 점토나 실트 함량은 비슷하였다. 이의 함량에 따른 토성은 식양토(clay loam) 7개, 경식토(light clay), 사질식양토(sandy clay loam) 및 사양토(sandy loam)이 각각 4개, 미사질양토(silty loam) 및 양토(loam)가 각각 2개, 사질식토(sandy clay)가 1개로 분류되었다.

농약의 흡착특성을 Freundlich 흡착등온식으로 검토한 결과, 토양에 대한 농약의 상대적 흡착용량을 나타내는 지표인  $K_F$  값은 diazinon의 경우 6.0~36.8, fenitrothion의 경우 7.3~52.3, alachlor의 경우 2.8~21.0, metalaxyl의 경우 1.7~10.3으로 토양에 따라 큰 차이를 보였으며, 농약의 종류사이에서는 대체적으로 fenitrothion > diazinon > alachlor > metalaxyl의 순으로 흡착능을 보였으며, 이러한 결과는 농약의 물에 대한 용해도와 역의 관계를 보였으며, 토양 사이에서는  $K_F$ 값은 농약의 종류와 관계없이 유기물 함량과는 매우 높은 상관성( $r^2 = 0.800 \sim 0.876$ )을 보임을 알 수 있었으며, 다음으로 CEC( $r^2 = 0.715 \sim 0.825$ ), 점토함량( $r^2 = 0.473 \sim 0.575$ ), 토양 pH( $r^2 = 0.401 \sim 0.452$ )의 순으로 상관성을 보였으며, silt 함량과는 상관성을 보이지 않았다.

Freundlich 흡착등온식에서 흡착강도를 나타내는  $1/n$  값은 fenitrothion, alachlor, atrazine 및 metalaxyl에 대해 대부분 토양에서 0.5~0.9 범위의 L형 흡착을 보였으며, diazinon의 경우 대부분 토양에서 0.9~1.1 범위의 C형 흡착을 보였다.

토양칼럼에서의 농약의 용탈특성은 농약의 흡착특성에서 검토한 결과와 역의 관계를 보였는데, 즉, 토양 사이에서는 유기물 함량, CEC 및 점토함량이 낮은 토양에서 농약의 종류에 관계없이 가장 먼저 용탈되었으며, 농약사이에서는 metalaxyl > atrazine > alachlor > diazinon > fenitrothion의 순으로 토양에 대한 농약의 흡착능이 적을수록 빨리 용탈되었다.

### 감사의 글

이 논문은 2017학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

### REFERENCES

- Abate, F., Masini, J. C., 2005, Adsorption of atrazine, hydroxyatrazine, deethylatrazine, and deisopropylatrazine onto Fe(III) polyhydroxy cations intercalated vermiculite and montmorillonite, *J. Agric. Food Chem.*, 53, 1612-1619.
- Calhoun, F. G., Carlisle, V. W., Luna, C., 1972, Properties and genesis of selected Columbian Andosols, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 480-485.
- Cao, J., Guo, H., Zhu, H. M., Jiang, L., Yang, H., 2008, Effects of SOM, surfactant and pH on the sorption-desorption and mobility of prometryne in soils, *Chemosphere*, 70, 2127-2134.
- Cheah, U. B., Kirkwood, R. C., Lum, K. Y., 1997, Adsorption, desorption and mobility of four commonly used pesticides in Malaysian agricultural soils, *Pesti. Sci.*, 50, 53-63.
- Choi, J., Yoo, K. S., Kim, B. J., 2002, *University Soil Science Experiment*, Yeongnam University Press.
- Giles, C. H., MacEwen, T. H., Nakhwa, S. N., Smith, D., 1960, Studies in adsorption, Part XI., A System of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids, *J. Chem. Soc.*, 3, 3973-3993.
- Gregg, S. J., Sing, K. S. W., 1967, *Adsorption, Surface Area and Porosity*, Academic Press, London, UK, 277-307.
- Gustafson, D. I., 1989, Groundwater ubiquity score: A Simple method for assessing pesticide leachability, *Environ. Toxicol. Chem.* 8, 339-357.
- Hu, J. Y., Aizawa, T., Ookubo, Y., Morita, T., Magara, Y., 1998, Adsorptive characteristics of ionogenic aromatic pesticides in water on powdered activated carbon, *Wat. Res.*, 32, 2593-2600.
- Hyun, H. N., Jang, G. M., Oh, S. S., Chung, J. B., 2007, Evaluation of groundwater contamination potential of pesticides using groundwater ubiquity score in Jeju Island soils, *Korean J. Pesti. Sci.*, 11, 144-153.
- Hyun, H. N., Oh, S. S., Yoo, S., 1995, Adsorption and movement of alachlor and chlorothalonil in the representative soil of Cheju Island, *Korean J. Environ. Agric.*, 14, 135-143.
- Inoue, M. H., Oliveria, R. S., Regitano, J. B., Tormena, C. A., Constantin, J., Tornisiello, V. L., 2004, Sorption kinetics of atrazine and diuron in soils from southern Brazil, *J. Environ. Sci. Health*, 39, 589-601.
- Jeju Special Self-governing Province, 2008, *Environmental White Paper*, 345-347.
- Jury, W. A., Focht, D. D., 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.
- Kah, M., Brown, C. D., 2006, Adsorption of ionisable pesticides in soils, *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 188, 149-217.
- Kam, S. K., Ko, B. C., Oh, Y. K., Lee, Y. D., Kim, J. H., 1999, Adsorption and leaching of organophosphorus pesticides, *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, 8, 379-386.
- Kim, J. H., Feagley, S. E., 1998, Adsorption and leaching of trifluralin, metolachlor, and metribuzin in a commerce soil, *J. Environ. Sci Health*, B33, 529-546.
- Kim, K. S., 2001, *Adsorption-desorption characteristics of the pesticides in natural and synthetic zeolites*, MS Thesis, Cheju National University.
- Kim, S. R., Hyun, S. S., Song, S. T., Lee, M. G., Kam, S. K., 2015, Concentration of heavy metals in natural soils of Jeju Island, Korea, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 175-188.
- Larson, S. J., Capel, P. D., Majewski, M. S., 1997, *Pesticides in Surface Waters: Distribution Trends, and Governing Factors*, Ann Arbor Press.
- Leonard, R. A., 1990, Movement of pesticides into surface waters, in: Cheng, H. (Ed.), *Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts and Modeling*, Soil

- Science Society of America, Madison, WI. 303-349.
- Ministry of Environment, 2005, Soil measuring network and results of research on the actual condition in 2004.
- Niwas, R., Gupta, U., Khan, A. A., Varshney, K. G., 2000, The adsorption of phosphamidon on the surface of styrene supported zirconium(IV) tungstophosphate: a thermodynamic study, *Colloids & Surfaces A*, 164, 115-119.
- Nometh-Konda, L., Füleky, G., Morovjan, G., Csokan, P., 2002, Sorption behaviour of acetochlor, atrazine, carbendazim, diazinon, imidacloprid and isoproturon on Hungarian agricultural soil, *Chemosphere*, 48, 545-552.
- Page, A. L., 1985, *Methods of Soil Analysis* (2nd ed.), Part 2, Chemical and Microbiological Properties, Am. Soc. Agron., Inc., Soil Soc. Am., Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Park, C. S., Kim, L. Y., Cho, S. J., 1985, Classification of volcanic ash soils and contribution of organic matter and clay to cation exchange capacity, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 18, 161-168.
- Sharma, D., Awasthi, M. D., 1997, Adsorption and movement of metalaxyl in soils under unsaturated flow conditions, *Plant and Soil*, 195, 293-298.
- Singh, N., Wahid, P. A., Murthy, M. V. R., Sethunathan, N., 1990, Sorption-desorption of methyl parathion, fenitrothion and carbofuran in soils, *J. Environ. Sci. Health*, B25, 713-728.
- Tomlin, 1994, *The Pesticide Manual* (10th Ed.), Crop Protection Publications.
- Walkley, A., Black, I. A., 1934, An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Sci.*, 37, 29-38.
- Wania, F., Mackay, D., 1996, Tracing the distribution of persistent organic pollutants, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 390-396.
- Weber, J. B., Peter, C. J., 1982, Adsorption, bioactivity, and evaluation of soil tests for alachlor, acetochlor, and metolachlor, *Weed Sci.*, 30, 14-20.