

# 농경지의 비료, 농약의 지하유실량 추정

- Preferential 흐름모형 -

## Estimating Leaching of Nutrients and Pesticides in Agricultural Lands

- A Preferential Flow Model -

이        남        호\* · 타모스틴 후이스\*\*  
Lee,     Nam     Ho · Steenhuis, Tammo S.

### Summary

The application of nutrients and pesticides to agricultural lands has been reported to contribute to groundwater contamination, which can be explained by preferential flow in lieu of convective-dispersive flow. An one-dimensional numerical model depicting preferential water and solute movement was modified to describe multi-layer flows. The model is based on a piecewise linear conductivity function. By combining conservation of mass and Darcy's law and using the method of characteristics a solution is obtained for water flow in which water moves at distinct velocities in different flow regions instead of an average velocity for the whole profile. The model allows transfer of solutes between pore groups. The transfer is characterized by assuming mixing coefficients. The model was applied to undisturbed soil columns and an experiment site with structured sandy clay loam soil. Chloride, bromide, and 2,4-D were used as tracers. Simulated solutes concentrations were in good agreement with the soil column data and field data in which preferential flow of solute is significant. The proposed model is capable of describing preferential solute transport under laboratory and field conditions.

### I. 서     론

농약 및 비료등 농업화학물질의 이용량이

증가하고 있는데, 농업화학물질의 이용은 농업생산량의 증가에 큰 기여를 해온 것이 사실이다. 그러나, 이로 인하여 하류하천의 수질환

\* 안성산업대학교 농촌개발학과  
\*\* Cornell대학교 농업생물공학과

키워드 : 비료, 농약, 지하유실량, 토양오염 지하수오염, preferential유동

경의 피폐화 뿐만아니라 토양의 근역 및 지하수의 오염도 유발시키고 있다. 특히 농약과 화학물질이 지하수에서 검출되고 있는 것으로 보고되고 있다(Steenhuis et al., 1990a; Kladviko et al., 1991). 이에 따라 토양내에서의 농약과 비료의 거동에 대해 재조명이 필요하게 되었다. 왜냐하면 농약은 소량이라도 인간 생활에 치명적인 영향을 줄 수 있기 때문이다.

물은 자연에서 용해된 화학물질의 일차적인 운송수단이다. 물은 인간의 중요한 자원이므로 많은 수문모형들이 개발되어 물의 순환과정(예를들면 유역유출과 지하수유입등)을 예측하는데 사용되고 있다. 극소수를 제외하면 이들 수문모형들은 macropore로 통칭되는 crack, 지렁이굴, 부패된 식물의 뿌리등과 같은 토양의 preferential 경로에서의 물의 움직임에 대해 제대로 설명하지 못한다. 대부분의 토양수분 이동방정식에서는 토양내에서의 물의 이동은 평균단면에서의 평균유속에 의해 정의되기 때문에 macropore내에서의 preferential 유동에 의한 영향이 무시되고 있다(Parlange et al., 1988).

불포화 토양내에서 수분과 용질의 유동을 해석하기 위한 접근은 Richards(1931)의 이론에 근거를 두고 있다. Van der Molen(1956)은 Richards의 이론과 분산이론을 조합한 대류-분산방정식을 제안하였는데 이는 수분과 용질은 토양의 평균경로를 통해 이동한다고 가정하고 있다. 이 가정에 근거를 두고 물질의 유동을 해석하기 위한 연구(Van Genuchten and Wierenga, 1976; Rao et al., 1979, 1980; Valocchi, 1985, Steenhuis et al., 1988)들이 실시되었으나 좋은 결과를 보여주지 못한 것으로 보고되고 있다(Bouma et al., 1977; Scotter, 1978; Everts and Kanwar, 1988; Richards and Steenhuis, 1988; Rice et al., 1988). Preferential 흐름에 의해 운반되는 농업화학물질이 지하수 오염의 주요한

원인이 되고 있는 것으로 보고되고 있다(White, 1984; Germann, 1988; Andreini and Steenhuis, 1990; Ghodrati and Jury, 1990; Kluitenberg and Horton, 1990; Smith et al., 1990; Shipitalo et al., 1990; Steenhuis et al., 1990a; Gish et al., 1991; Kladviko et al., 1991).

토양내에서의 물과 용질의 preferential 유동을 예측하기 위해 실험실조건(Nijssen et al., 1991; Corwin et al., 1991; Chen and Wagnet, 1992; Grochulska and Kladviko, 1994; Li and Ghodrati, 1994)과 포장조건(Butters and Jury, 1989; Jarvis et al., 1991)에서 적용할 수 있는 많은 모형들이 개발되어 오고 있다. 실험실 모형은 관리가 가능하고 토양특성이 알려진 조건에서의 토양기둥(soil column)을 대상으로 하기 때문에 용질의 이동을 어느정도 정확하게 설명할 수 있다. 그러나 포장조건에서 용질의 이동을 정확하게 설명할 수 있는 모형은 거의 없는 실정이다. 포장에서의 용질이동을 해석하기 위한 모형화의 문제점은 토양의 불균일성과 macropore와 관련된 불확실성에 기인된다. 실험실 모형을 포장에 적용하는데는 토양특성의 시간적, 공간적변화가 문제가 된다. 토양특성의 수직적 변화와 macropore의 특성을 만족하게 다룰수 있는 preferential 흐름 모형은 현재까지는 없다(Beven, 1991).

환경내에서의 농약 및 비료와 같은 농업화학물질의 거동을 종합적으로 이해하면 농업화학물질에 의한 지하수오염의 잠재력을 모니터링하고 평가할 수 있고, 이와 같은 잠재력의 영향을 최소화 할 수 있는 최적관리기법(Best Management Practices)을 설계할 수 있고, 농약류출에 따른 오염을 처리하는 것이 가능해 질 수 있다(Triegel and Guo, 1994)

본 연구에서는 농경지에서 macropores에 의한 토양수분, 비료, 농약의 preferential 유

등의 특성을 재현할 수 있고 토양특성의 수직적 변화를 고려할 수 있는 수치모형을 개발하고, 실험실 조건과 포장조건에서 모형의 적용성을 검토하고 중요한 매개변수들에 의한 모형의 예민도를 분석하고자 한다.

## II. 기본이론

토양내에서 흐름의 경로(flow path)는 다양하게 분포되어 있지만 그 경로들은 서로 연결되고 군(group)을 이루고 있다고 생각할 수 있다. 흐름의 경로들이 연결되면 공극군간에 용질의 혼합작용이 발생된다. Steehuis와 Parlange(1988)는 이와 같은 공극을 군락화할 수 있는 방법을 제시하였다.

토양수분과 용질운반을 해석하기 위한 기본적인 가정은 다음과 같다.

- (1) 투수계수는 각 공극군내에서는 토양수분함량의 선형함수이다.
- (2) 수직방향의 흐름은 중력에 의해 지배된다. 수리경사(hydraulic gradient)는 일정한 값 1을 갖는다.
- (3) 토양수분과 용질은 공극군간에 서로 교환되며 용질은 토양수분과 함께 이동한다.
- (4) 증발산량은 토양근역에서만 발생된다.
- (5) 강우량과 증발산량은 지역내에서 균일하게 분포한다.

### 1. 토양수분의 이동

이와 같은 가정하에서 토양수분의 이동을 해석할 수 있는 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t} + \frac{\partial q_p}{\partial x} = A_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $\theta$ 는 토양수분함량,  $q$ 는 단위면적당 평균유량,  $t$ 는 시간,  $x$ 는 거리,  $p$ 는 토양공극

군,  $A$ 는 sink term이다. 토양근역내에서는  $A$ 는 증발산량, 강우량, 공극군간의 혼합등에 의해 정의된다. 위의 기본 가정(2), Darcy 법칙과 chain 법칙을 이용하면

$$q_p = K(\theta_p) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial q_p}{\partial x} = \frac{dK(\theta)_p}{d\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $K$ 는 투수계수이다. 식 (3)를 식 (1)에 대입하면

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t} + \frac{dK(\theta)_p}{d\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} = A_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)의 특성방정식은 식 (5)와 같은 상미분방정식을 이용해서 풀 수 있다.

$$\frac{dt}{1} = \frac{dx}{dK(\theta_p)/d\theta} = \frac{d\theta}{A} \quad \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)의 전반부는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dK(\theta_p)}{d\theta} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\frac{dx}{dt}$ 는 거리의 시간변화율이므로 식 (7)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = v_p \quad \dots\dots\dots (7)$$

식 (6)을 식 (4)에 대입하면

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t} = A_p \quad \dots\dots\dots (8)$$

식 (7)을 적분하면

$$x = v_p \cdot t + x_0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $x_0$ 는  $t=0$  일때의  $x$ 값이다. 식 (8)을 적분하면

$$\theta_p = \int_0^t A_p dt + \theta_p(x_0), \quad x \geq v_p t \quad \dots\dots\dots (10)$$

공극군  $p$ 의 모든 수분은 평균유속  $v_p$ 에 의해 이동한다고 가정하면, 임의의 시간간격  $\Delta t$  동안에 토양수분의 이동거리  $\Delta x_p$ 는 다음과 같다.

$$\Delta x_p = v_p \Delta t \quad \dots\dots\dots (11)$$

공극군  $p$ 의 토양수분함량은

$$\theta_p(x, t) = \theta_p(x - \Delta x_p, t - \Delta t) + I_p(x, t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$I_p(x, t) = \int_{t-\Delta t}^t A_p(x, t) dt \quad \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $I_p$ 는 증발산량, 강우량, 혼합도의 함수이다.

평균유속이 가장 느린 공극군( $p$ )을 1이라고 하고, 이때 토양수분의 이동거리를  $\Delta x_1$ 이라 하면, 임의의 공극군  $p$ 의 이동거리는  $\Delta x_1$ 의 값으로 표시할 수 있다.

$$\Delta x_p = R_p \Delta x_1 : R_1 = 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

따라서 공극군  $p$ 에서는  $\Delta t/R_p$  동안에,  $\Delta x_1$  만큼 이동하게 된다.

계산을 위한  $x-t$ 공간의 격자구성은 다음과 같다.

$$x = i \cdot \Delta x_1 ; i = 0, 1, 2, \dots, L/\Delta x_1 \quad \dots (15)$$

$$t = j \cdot \left(\frac{\Delta t}{R_p}\right) ; j = 0, 1, 2, \dots \quad \dots\dots (16)$$

여기서  $L$ 는 토양의 깊이이고  $n$ 는 가장 유속이 빠른 공극군이다.

토양수분이동을 계산하기 위한 식은 식 (12)와 식 (13)을 식 (10)에 대입하면 얻을 수 있다.

$$\theta_p^{(i,j)} = \theta_p^{(i-\delta_p R_p, j-1)} + I_p^{(i,j)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

여기서

$$\delta_p = \begin{cases} 0 : j \bmod R_p \neq 0 \\ 1 : j \bmod R_p = 0 \end{cases}$$

## 2. 용질운반

용질의 농도  $C(x, t)$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$C(x, t) = \frac{S(x, t)}{\theta(x, t)} = \sum_{p=1}^n C_p^{(i,j)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$C_p^{(i,j)} = \frac{S_p^{(i,j)}}{\theta_p^{(i,j)}}$$

여기서  $S_p$ 는 토양군  $p$ 의 용질이다. 따라서 용질의 운반은 다음과 같다.

$$S_p^{(i,j)} = S_p^{(i-\delta_p R_p, j-1)} + SI_p^{(i,j)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

여기서  $SI_p$ 는  $\Delta t/R_p$  시간동안에 강우량, 증발산, 혼합에 의해 가감되는 총 용질의 양이다.

## 3. 혼합(mixing)

토양공극간의 토양수분 및 용질의 혼합은 아직도 잘 알려져 있지 않다. 본 모형에서는 공극군간에 직접적으로 혼합이 이루어지지 않고 가상의 저류지(common pool)를 통해서 혼합이 이루어지는 것으로 하였다. 토양군  $p$ 로 부터 저류지로 유입되는 용질의 양( $I_p$ )은 다음과 같다.

$$I_p = a_p \times S_p \quad \dots\dots\dots (20)$$

여기서  $a_p$ 는 토양군  $p$ 의 혼합계수이다. 각

공극군의 토양수분  $\theta_p$ 중에서  $\alpha_p \theta_p$ 만큼 저류지로 유입되어 혼합이 이루어진 후 토양수분은 각 공극군으로  $\beta \sum_{i=1}^n \alpha_i \theta_i$  만큼씩 복귀한다. 여기서  $\alpha_p$ 와  $\beta_p$ 는 혼합계수이다.  $\alpha_p$ 와  $\beta_p$ 는 토양 특성에 의해 결정될 것으로 생각되나, 아직 이에 대한 연구결과는 발표된 바 없다. 이와 같은 과정을 갖는 혼합은 완전혼합, 부분혼합, 무혼합의 경우를 고려할 수 있다. 완전혼합은  $\alpha_p=1$ , 부분혼합은,  $0 < \alpha_p < 1$ , 무혼합은  $\alpha_p=1$ 에서 발생한다.

4. 다층 토양에서의 유동

Steenhuis et al.(1990)에 의해 개발된 모형은 토양특성의 수직적 변화가 없는 토양내에서 만 토양수분과 용질의 이동에 대해 해석이 가능하도록 되어있다. 그러나 토양내의 용질의 유동을 시각적으로 이해하기 위한 염료(dye) 시험과 기타 시험등(Ritsema et al., 1993 ; shalit and steehuis, 1995)에 의하면 상부토양은 하부토양보다 공극이 상대적으로 잘 분포되어 있고 특히 하부토양은 crack등과 같은 preferential경로가 주류를 이루고 있다(Fig. 1). 또한 여러 개의 각기 다른 특성을 가진 토양층으로 구성되어 있기도 하다(Fig. 2).

5. 토양의 흡착

농업화학물질이 지표면에서 지하수에 도달되는 동안 이들은 토양에 의해 흡착되거나, 휘발되고 분해되는 과정을 거친다. 흡착(adsorption)이란 노출된 표면에서 서로 다른 상의 분자들이나 이온들 사이에서 일어나는 인력과 반발력의 차이에서 생기는 계면현상(Hillel, 1980)인데 일반적으로 토양에 의한 용질의 보류를 흡착이라고 한다. 평형상태에서 당초 용액속의 용질의 양과 흡착된 후의 용질의 양의 차이를 흡착된 양으로 한다. 일정한 용액의 농도 범위내에서는 토양에 흡착된 양  $x$ 와 평형

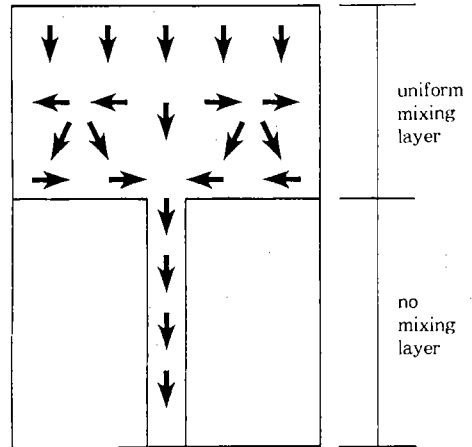


Fig. 1. Schematic description of two-layer flow of water and solutes

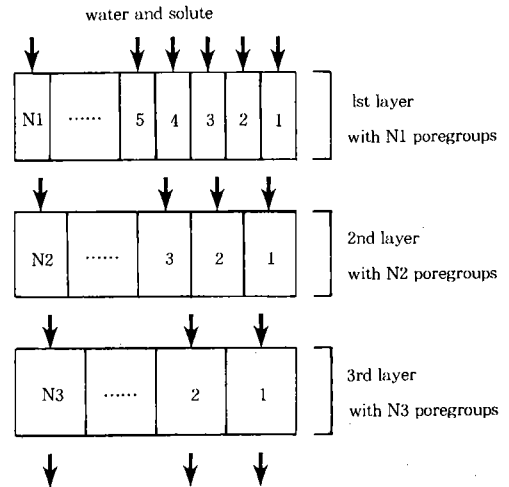


Fig. 2. Schematic description of multi-layer flow of water and solutes

상태의 농도  $C$ 는 선형관계를 이루고 있다 (Wild, 1993). 선형기울기  $x/c$ 는 흡착계수 (adsorption coefficient) 또는 분포흡착상수 (distribution adsorption constant) “ $K$ ”이라고 하는데 아래와 같이 표현되며 이를 Freundlich방정식이라고 한다.

$$\frac{x}{c} = K \dots\dots\dots (21)$$

이 식은 실험공식으로서  $K$ 는 농업화학물질

의 물리화학적 특성과 토양특성에 따라 좌우된다.

### III. 시험자료

모형의 적용성을 검토하기 위해서 실내실험실과 포장에서 얻어진 자료들이 사용되었다. Cornell대학의 Willsboro 시험연구농장에서 채취된 불교란 토양시료가 사용된 실내실험자료 (Andreini and Steenhuis, 1990)와 동일 농장에서의 포장실험(Shalit and Steenhuis, 1995; Bordnar, 1995) 자료가 이용되었다. Willsboro 농장의 토양은 약간 배수불량으로 삼각분류법에 의하면 sandy clay loam이다.

#### 1. 실내실험

무경운포장과 경운포장에서 각각 1개씩의 불교란 토양시료가 채취되었다. 채취된 토양시료들은 실험실에서 단면적이 35cm×35cm, 높이가 46cm인 직사각형의 토양기둥으로 정리되어 격자형 라이시메타(grid lysimeter) 위에 정치되었다. 이 라이시메타는 높이가 5cm 이고 2.5cm×5cm의 직사각형단면을 갖는 76개의 cell로 되어있으며 각 cell은 개별적인 시료채취용 용기와 연결된다.

불교란시료들에 대한 관개는 강우발생기를 이용해서 실시되었다. 관개량은 2cm/일로 30일간 정류상태가 유지되도록 계속되었다. 이 실험에서는 bromide가 tracer로 사용되었는데 이는 bromide 이온의 토양속에서의 이동이 물과 거의 흡사하기 때문이다. 0.1M의 bromide가 실험 첫날 24시간동안 공급되었다. 토양기둥으로부터 채취된 bromide의 농도는 Orion Model 94-35 bromide electrode에 의해 측정되었다. 토양시료의 포화투수계수는 1.35m/hr, 포화수분함량은 0.48, 초기수분함량은 0.32이었다.

### 2. 포장실험

지표면하 80cm에 지하배수시설이 설치되어 있는 실험포장에서 배수실험이 실시되었다. 본 시험에서는 염소와 제초제인 2,4-D가 tracer로 사용되었다. 제초제 2,4-D(2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)가 1,68kg/ha의 비율로 살포되었고 관개는 스프링클러를 이용하여 4.8mm/hr 강도로 7-8시간동안 실시되었다. 1차 관개후 1주일이 경과한 다음 비흡착 tracer인 염소가 CaCl<sub>2</sub>·5H<sub>2</sub>O의 형태로 275 lb가 지표면에 살포되었는데 염소 살포후 2시간 후에 7.6mm/hr 강도로 관개를 7-9시간동안 실시하였다. 지하배수관을 통한 유출량은 각 배수관 끝 부분의 맨홀에 설치된 자료수집장치에 연결된 tipping bucket을 이용하여 측정되었고 수질시료는 맨홀에서 채취되어 분석되었다. 염소농도는 Buchler Instruments Digital Chloridometer가 사용되었고 2,4-D는 Ohmicron사의 Rapid Assay immuno-assay kit가 사용되었다.

### IV. 모형의 적용 및 고찰

#### 1. 실내실험

Andreini and Steenhuis(1990)에 의해 실시된 염료실험을 근거로 한 각 시험포장의 토양단면의 특성은 Table-1과 같다. 두 포장 모두 3개의 토양층으로 구성되었는데 무경운 포장은 상부토층이 경운포장에 비해 상대적으로 얇다. 상부토층은 공극이 잘 발달되어 있어 용질의 혼합이 활발한 반면에 하부토층은 preferential경로가 잘 발달되어 용질의 혼합이 거의 없고 중간토층은 상하부 토층의 전이 지대이다.

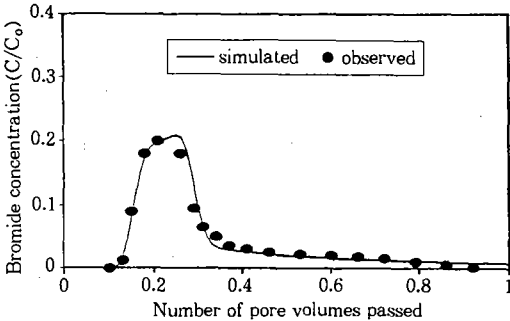
모형의 모의조작을 통해 선정된 최적 매개변수의 조합은 Table-2와 같다. 상부 1, 2층은 3개, 하부토층은 preferential경로만이 있

**Table-1. Description of the soil profiles of the Willsboro site**

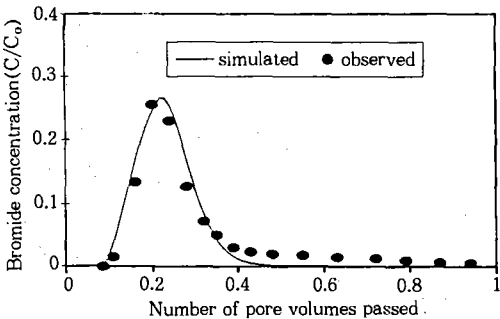
Layer	무경운포장	경운포장
1	2cm	15cm
2	33cm	11cm
3	10cm	19cm

**Table-2. Selected parameters of the model for column data of the Willsboro site**

매개변수	무경운포장			경운포장		
	1층	2층	3층	1층	2층	3층
공극군의 수	3	3	1	3	3	1
혼합계수						
- 공극군 1	0.01	0.001	0.0	0.001	0.0005	0.0
- 공극군 2	0.5	0.5	0.32	0.5	0.5	
- 공극군 3	1.0	1.0		1.0	1.0	
초기토양수분함량	0.32	0.32		0.32	0.32	0.32



**Fig. 3. Observed and simulated relative bromide concentrations for no-till plot at the Willsboro site**



**Fig. 4. Observed and simulated relative bromide concentrations for tilled plot at the Willsboro site**

는 1개의 공극군으로 구성되었다. 모형연구의 단순화를 위하여 1, 2층의 공극군 2, 3의 혼합계수는 각각 0.5, 1.0으로 고정되었고 공극군 1의 혼합계수는 실험결과에 fitting 하기 위해서 조정되었다. 하부토층에서는 혼합이 없는 것으로 하였다. 공극군 1의 혼합계수는 무경운포장이 경운포장에 비해 큰것으로 나타났다. 최적 매개변수의 조합을 이용하여 모의 발생한 bromide의 농도를 상대농도로 나타내고 이를 공극용적수(number of pore volumes)에 대해 정리하였다. 실측 상대농도와 비교한 결과가 Fig. 3과 Fig. 4에 도시되어 있다. Fig. 3은 무경운 포장, 그리고 Fig. 4는 경운 포장의 토양시료에 대한 결과이다. 경운 방법에 따른 bromide 유실량이 큰 차이는 보이지 않지만 경운의 경우에 약간 유실량이 많았는데 이는 무경운 포장에서 혼합이 이루어지는 깊이(1층과 2층)가 35cm로 경운포장의 26cm보다 큰것에 기인된 것으로 판단된다.

**2. 포장실험**

지하배수시설이 설치된 포장에서 행해진 실험결과는 시험포 간에 상당한 차이를 보이는데 이는 토양의 공간적 불균일성에 기인되고 또한 지하수위 및 초기 토양수분함량에 영향을 받은것으로 추측된다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보면 용질의 피이크농도는 염소의 경우 124-531mg/l이고 2,4-D의 경우는 19-82mg/l으로 많은 차이를 나타내고 있고 격변곡선의 형태도 변화를 보이고 있다.

각 시험포별 매개변수의 조합이 Table-3에 정리되어 있다. 실험실자료를 이용한 전 보와 같이 상부 1, 2층은 3개, 하부토층은 1개의 공극군으로 구성하였다. 염소와 2,4-D에 대한 매개변수는 동일하게 적용되었는데 초기 토양수분함량은 Table-4와 같이 염소와 2,4-D에 대해 각각 다른값이 적용되었다. Fig. 5는 3개 포장에 대한 염소유실량의 모의발생결과이

고 Fig. 6은 2,4-D에 대한 결과를 나타내고 있다. 모의발생결과들이 실측치에 잘 부합되

고 있다.

bromide나 염소의 경우에는 토양에 의한 흡

Table-3. Selected parameters of the model for the Willsboro site

매개변수	A 포장			B 포장			C 포장		
	1 층	2 층	3 층	1 층	2 층	3 층	1 층	2 층	3 층
공극군의 수	3	3	1	3	3	1	3	3	1
혼합계수									
- 공극군 1	0.002	0.003	0.0	0.003	0.00015	0.0	0.003	0.00015	0.0
- 공극군 2	0.5	0.5		0.5	0.5		0.5	0.5	
- 공극군 3	1.0	1.0		1.0	1.0		1.0	1.0	

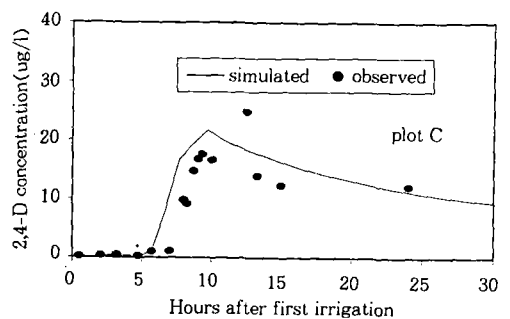
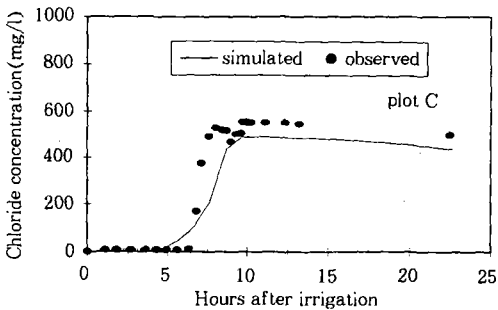
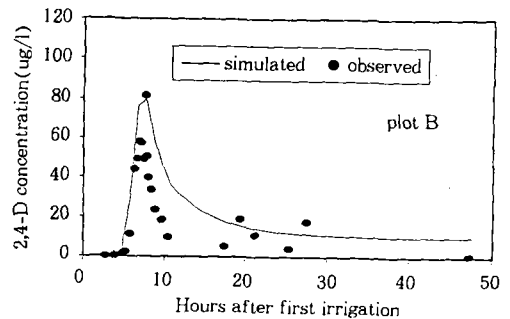
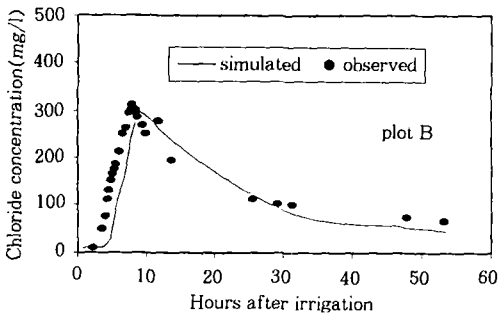
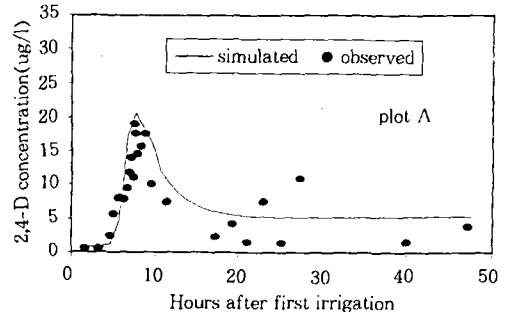
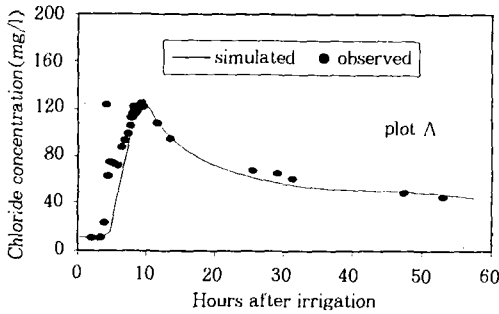


Fig. 5. Observed and simulated chloride concentrations for plots at the willsboro site

Fig. 6. Observed and simulated 2,4-D concentrations for plots at the Willsboro site



Table 4. Initial moisture contents for Chloride and 2,4-D

초기토양 수분함량	A 포장			B 포장			C 포장		
	1 층	2 층	3 층	1 층	2 층	3 층	1 층	2 층	3 층
염 소	0.4	0.39	0.39	0.40	0.38	0.38	0.40	0.39	0.39
2,4-D	0.33	0.33	0.33	0.33	0.325	0.325	0.35	0.34	0.34

작을 고려하지 않았으나 2,4-D의 경우는 매우 소량만이 유실되어 흡착계수를 매개변수로 사용하였다. 포장 A, B, C별 흡착계수는 65, 65, 200cm<sup>3</sup>/g이었다.

### 3. 모형의 거동

Willsboro 농장의 A포장을 대상으로 하여 매개변수의 변화에 대한 모형의 거동을 살펴보기로 한다. 최적매개변수의 조합을 이용하였고, 본 논문에서는 가장 예민하게 반응하는 매개변수인 혼합계수와 초기토양수분함량에 의한 결과만을 정리하였다. 1층 토양의 공극군1의 혼합계수의 변화에 대한 격변곡선의 변화는 Fig. 7과 같다. 공극군1은 비이동성 공극인데 이 곳에서 혼합이 적게 발생할 수록 (혼합계수가 적을 수록) 용질의 출현이 빨라진다. 비이동성 공극에서는 물의 이동은 없고 용질의 이동만이 발생하는 관계로 일단 혼합 작용에 의해 common pool에 유입된 용질은 혼합계수가 큰 경우에 많은 양의 용질이 머무

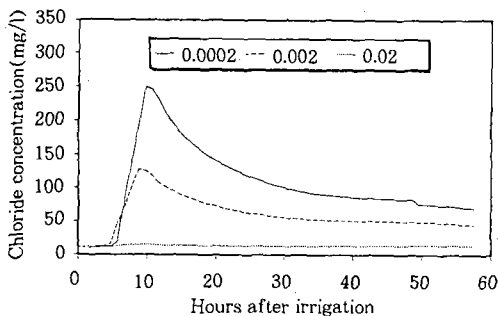


Fig. 7. Comparison of model performance for different mixing coefficients for the immobile pore groups

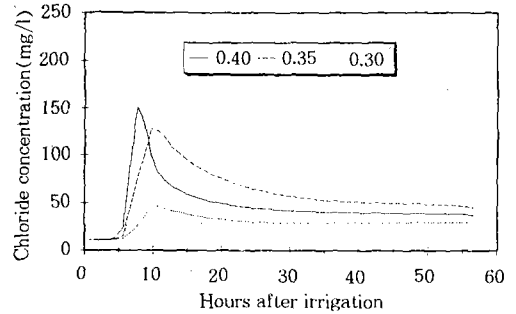


Fig. 8. Comparison of model performance for different initial moisture content

르게 된다. 따라서 이 경우에 용질의 출현이 지연된다.

홍수 유출량 예측을 위한 수문모형과 마찬가지로 토양내에서의 용질이동예측을 위한 모형에서 초기토양수분은 격변곡선의 형태를 결정하는 중요한 역할을 한다. Fig. 8은 초기토양수분함량의 변화에 따른 모형의 거동을 보이고 있는데, 초기토양수분함량이 적을 수록 용질의 출현이 늦고 그 양이 적고 클 수록 용질의 출현이 빨라지는 것으로 나타났다.

### V. 요약 및 결론

농경지에서 비료, 농약등과 같은 농업화학물질의 지하유실량 추정을 목적으로 1차원 수치모형을 개발하고 실험실자료와 포장시험자료를 사용하여 그 적용성을 검토하고 매개변수의 변화에 따른 모형의 거동을 살펴본 결과는 다음과 같다.

1. 토양특성이 수직적으로 변화하는 여러 층으로 구성된 토양에 적용할 수 있고 토양에 의한 화학물질의 흡착을 고려할 수 있도록 모

형이 개발되었다.

2. Willsboro농장은 토양이 3개층으로 구성된 모형을 적용하여 좋은 결과를 얻었다.
3. Willsboro농장의 포장실험자료의 경우, 동일한 매개변수를 사용하여 염소와 2,4-D의 격변곡 선을 재현할 수 있었다.
4. 토양의 농약흡착계수는  $65-200\text{cm}^3/\text{g}$ 의 값을 나타내고 있다.
5. 예민도를 분석한 결과 혼합계수와 초기 토양수분함량에 대해 모형이 예민하게 반응하는 것으로 나타났다.
6. 본 모형은 실험실조건하에서 토양에서의 토양수분과 용질의 이동을 예측하는데 그 사용 가능성을 보였으나 이에 대한 보다 많은 연구와 적용성 검토가 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. Andreini, M. S. and T. S. Steenhuis, 1990, Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage, *Geoderma*, 46:85-102.
2. Beven, K., 1991, Modeling of preferential flow : An uncertain future?, *ASAE, Proc. of the national symposium on preferential flow, Chicago, Illinois, 16-17 December, 1991, 1-11.*
3. Bordnar, M., 1995, Preferential transport of pesticides and chloride to agricultural tile lines and their fate in a small natural stream, Unpublished M.S. thesis, Cornell University, Ithaca, NY, 124pp.
4. Bouma, J., A. Jongerius, O. Boersma, A., and D. Schoonderbeek, 1977, The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling horizons, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 945-950.
5. Butters, G. L. and W. A. Jury, 1989, Field Scale Transport of bromide in an unsaturated soil. 2. Dispersion modeling, *Water Resour. Res.*, 25 : 1583-1589.
6. Chen, C. and R. J. Wagnet, 1992, Simulation of water and chemicals in macropore soils, Part 2. Application of linear filter theory, *J. of Hydrology*, 130 : 127-149.
7. Corwin, D. L., B. L. Waggener, and J. D. Rhoades, 1991, A functional model of solute transport that accounts for bypass, *J. Environ. Qual.*, 20 : 647-658.
8. Everts, C. J., and R. S. Kanwar, 1988, Quantifying preferential flow to a tile line with tracers. *ASAE Paper No. 88-2635, 15pp.*
9. Germann, P. F., 1988, Approaches to rapid and for reaching hydrological process in the vadose zone, *J. Contam. Hydrology*, 3 : 115-127.
10. Ghodrati, M. and W. A. Jury, 1990, A field study using dyes to characterize preferential flow of water, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 1558-1563.
11. Gish, T. J., A. R. Isensee, R. G. Nash, and C. S. Helling, 1991, Impact of pesticides on shallow groundwater quality, *Tran. ASAE*, 34 : 1745-1753.
12. Grochulska, J. and E. J. Klavivko, 1994, A two-region model of preferential flow of chemicals using a transfer function approach, *J. Environ. Qual.*, 23 : 498-507.
13. Hillel, D., 1980, *Fundamentals of Soil Physics*, Academic Press, Inc..
14. Jarvis, N. J., P-E. Jansson, P. E. Dik, and I. Messing, 1991, Modeling water and solute transport in macroporous soil.

- I. Model description and sensitivity analysis, *J. Soil Sci.*, 42 : 59-70.
15. Kladvik, E. J., G. E. Van Scoyoc, E. J. Monke, K. M. Oates, and W. Pask, 1991, Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana, *J. Environ. Qual.*, 20 : 264-270.
  16. Kluitenberg, G. J. and R. Horton, 1990, Effect of solute application method on preferential flow transport of solutes in soil, *Geoderma* 46 : 59-71.
  17. Li, Y. and M. Ghodrati, 1994, Preferential transport of nitrate through soil columns containing root channels, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58 : 653-659.
  18. Nijssen, B. M., T. S. Steenhuis, G. J. Kluitenberg, F. Stagnitti, and J.-Y. Parlange, 1991, Moving water and solute through the soil : testing of a preferential flow model, ASAE, Proc. of the national symposium on preferential flow, Chicago, Illinois, 16-17 December, 1991, 223-232.
  19. Parlange, J.-Y., T. S. Steenhuis, R. J. Glass, T. L. Richard, N. B. Pickering, W. J. Waltman, N. O. Bailey, M. S. Andreini, and J. A. Throop, 1988, The flow of pesticides through preferential paths in soils, *Quarterly New York's Food & Life Sciences*, 18 : 20-23.
  20. Rao, P. S. C., J. M. Davidson, and R. E. q Jessup, 1979, Evaluation of conceptual models for describing nonequilibrium and adsorption-desorption of pesticides during steady flow in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43 : 22-28.
  21. Rao, P. S. C., J. M. Davidson, R. E. Jessup, D. E. Rolston, and D. P. Kilcrease, 1980, Experimental and mathematical description of nonadsorbed solute transfer by diffusion in spherical aggregates, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44 : 684-688.
  22. Rice, R.C., D.B. Jaynes, and R.S. Bowman, 1988, Preferential flow of solutes and herbicides under irrigated fields, ASAE Paper No. 88-2634, 10pp.
  23. Richards, L. A., 1931, Capillary conduction of liquids in porous medium, *Physics*, 1 : 318-333.
  24. Richard, T. L., and T. S. Steenhuis, 1988, Tile drain sampling of preferential flow on a field scale, *J. Contam. Hydrol.*, 3 : 307-325.
  25. Ritsema, C. J., L. W. Dekker, J. M. H. Hendricks, and W. Hamminga, 1993, Preferential flow mechanism in a water repellent soil, *Water Resour. Res.*, 29 : 2183-2193.
  26. Shalit, G. and T. S. Steenhuis, 1995, A simple mixing layer model predicting solute flow to drainage lines under preferential flow, *J. Hydrology* (In press).
  27. Shipitalo, M. J., W. M. Edwards, W. A. Dick, and L. B. Owens, 1990, Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no-till soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 1530-1536.
  28. Smith, M. C., D. L. Thomas, A. B. Bottcher, and K. L. Campbell, 1990, Measurement of pesticide transport to shallow groundwater, *Trans. ASAE*, 33 : 1573-1582.
  29. Steenhuis, T. S., J.-Y. Parlange, 1988, Simulating preferential flow of water and solutes on hillslopes, Proc. of the co-

- nference on validation of flow and transport models for the unsaturated zone, Ruidoso, New Mexico, May 23-26, 1988.
30. Steenhuis, T. S., W. Staubitz, M. S. Andreini, J. Surface, T. L. Richard, R. Paulsen, N. B. Pickering, J. R. Hagerman, and L. D. Geohring, 1990a, Preferential movement of pesticides and tracers in agricultural soils, ASCE, J. Irri. and Drain. Eng., 116(1) : 50-66.
31. Steenhuis, T. S., J.-Y. Parlange, and M. S. Andreini, 1990b, A numerical model for preferential solute movement in structured soils, Geoderma, 46 : 193-208.
32. Triguel, E. K. and L. Guo, 1994, Overview of the fate of pesticides in the environment, water balance; runoff vs. leaching, Mechanisms of pesticide movement into groundwater, Edited by R. C. Honeycutt and D. J. Schabacker, Lewis Pub., 181pp.
33. Valocchi, A. J., 1985, Validity of the local equilibrium assumption for modeling sorbing solute transport through homogeneous soils, Water Resources Res., 21 : 808-820.
34. van der Molen, W. H., 1956, Desalination of saline soils as a column process, Soil Sci., 81:19-35. van Genuchten M. Th., and P. J. Wierenga, 1976, Mass transfer studies in sorbing porous media : 1. Analytical solution, Soil Sci. Soc. Am. J., 473-480.
36. White, R. E., 1984, The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil, Adv. Soil Sci., 3 : 95-119.

(접수일자 : 1996년 2월 16일)