

## 작물 흡수를 고려한 3차원 토양수분 분포 모델 개발을 통한 최적 점적 관개 연구

노희명\* · 권재필<sup>1</sup> · 김승현<sup>1</sup> · 류순호<sup>2</sup>

농촌진흥청 원예연구소 원예환경과, <sup>1</sup>영남대학교 환경공학과, <sup>2</sup>서울대학교 응용생물·화학부

**초 록** : 작물이 자라는 토양에서 점적 관개에 의해 일어나는 토양 수분의 분포와 이동을 3차원 직교 좌표계로 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다. 모델은 지면 증발과 증산을 고려하였으며, 이들의 계절적 변화와 하루중의 시간변화 뿐 아니라 작물 뿌리의 성장 및 뿌리의 토양 중 분포형태도 고려하였다. 모델의 해는 block centered grid system 등을 적용하여 Crank-Nicolson법과 Gauss-Seidel 반복법을 사용하여 구하였다. 모델은 실험을 통해 검증하였으며, 점적 관개의 특성을 알기 위하여 모델을 이용한 컴퓨터 모사를 실시하였고, 본 연구의 조건으로부터 다음의 결과를 얻었다. (1) 관수된 물은 점적기에서 멀어짐에 따라 그 유속이 크게 감소하였고, 관수 시간이 증가함에 따라 습윤구역의 크기가 증가하는 속도도 급격히 감소하였다. (2) 1점 관수의 경우 습윤구역은 수평 방향보다는 수직 방향으로 더 깊어갈수록 도달하였다. (3) 본 연구조건에서 물 이용 효율은 지하 25 cm 지점의 4점 관수가 가장 좋았으며, 지표면 1점 관수보다 증산량은 10% 증가, 지면 증발량은 20% 감소하였다. (4) disk tension infiltrometer에 의한 토양의 수분보유도 함수는 토양수분 압출에 의한 젖음 곡선과는 상당한 차이를 나타내는 것도 알 수 있었다. (1999년 12월 8일 점수, 2000년 4월 6일 수리)

### 서 론

점적 관개는 과수원이나 시설 원예에서 수량 및 품질을 향상시키기 위해 물을 효율적으로 사용하여, 비료 및 농약 등에 의한 비점원 오염을 감소시킬 수 있는 방법으로 자주 고려되어 왔다. 점적 관개를 정확하고 효율적으로 하기 위해서는 토양의 수분 상태에 관한 정보가 필요하다. 작물과 반응하여 나타나는 토양 수분 상태는 수자원의 양과 질을 합리적으로 예측하는데 필수적이다. 더욱이, 이러한 정보는 관수를 제어하는 토양 수분 센서의 위치를 선정하는데도 필요하다.

점적 관개는 주로 근권에 물을 공급하므로 토양증발 및 지하배수에 의한 손실이 적고,<sup>1)</sup> 잡초와 병충해의 발생 억제 등 부수적인 효과도 얻을 수 있고, 비료를 물에 섞어 쉽게 공급할 수 있어서 노동력을 절감할 수 있을 뿐 아니라 잉여 비료에 의한 환경오염도 최소화할 수 있는 등의 장점이 있다.<sup>2)</sup> 따라서, 토양수분의 상태에 관한 정보는 정확하고 효율적인 점적 관개를 위해 필수적이다.<sup>3)</sup>

Philip<sup>4)</sup>은 Richards 방정식을 기초로 하여 관개 및 강우에 따른 습윤 전선(wetting front)의 진행속도에 관하여, Bresler<sup>5)</sup>는 점적 유량의 변화에 따른 습윤구역의 형상변화에 관하여, Longenecker와 De Tar<sup>6)</sup> 등은 수직방향으로 습윤 경계면이 이동한 거리와 그 속도에 관한 연구를 하였다. 우리나라 기후조건에 토양-작물-대기 연속계에서 점적 관개에 의한 토양수분 이동에 관한 이론적 연구는 노와 김<sup>8)</sup>이 수행한 바 있으나, 실증 실험과 다양한 점적 관개 방법에 대한 평가가 결여되었고, 현장 상황을 충분히 묘사할 수 없는 2차원 모델에 머무르는 등

이에 대한 연구는 아직 충분하지 않다. 앞으로 점적 관개를 현장에 널리 적용할 필요가 있고, 또 그 응용이 급속히 확산되고 있는 현실을 감안하면 이에 대한 연구는 절실하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 (1) 물 수지(收支)를 고려한 Richards 방정식을 이용하여 점적 관개시 토양수분의 분포 양상을 예측하는 직교 좌표상 3차원 수치모델을 수립하고, (2) 이를 현장에서 점적 관개 실험을 통하여 검증하며, (3) 점적기의 배열에 따른 근권의 수분분포와 지면증발 및 증산 등을 컴퓨터 모사를 통해 정량함으로써 최적 관개 조건을 얻고자 하였다. 또한, disk tension infiltrometer를 사용하여 토양수분의 불포화 흐름특성에 대한 파악을 시도하였으며, 이를 토양수분 압출에 의한 측정치와 비교함으로써 수분의 토양 침투 과정에서 일어나는 토양수분의 불포화 흐름특성을 보다 잘 파악하기 위한 기초적인 연구도 부수적으로 수행하였다.

### 수학적 모델링

#### 토양-작물-대기계에서의 수분이동

토양-작물-대기 연속계에서 일어나는 수분 이동을 정량적으로 기술하기 위해서는 먼저 토양에서의 수분 이동에 관한 물 수지 방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} + S + Q = 0 \quad (1)$$

으로부터 출발한다<sup>3)</sup>. 여기서  $\theta$ 는 토양의 용적수분함량( $m^3 m^{-3}$ ),  $t$ 는 시간(s), 그리고  $\vec{q}$ 는 Darcy 속도( $m s^{-1}$ )를 나타내고,  $S$ 와  $Q$ 는 각각 소멸과 생성을 나타낸다.

식(1)에 Darcy 법칙을 대입하여 지표면을 기준으로 지하가

찾는말 : 사과, 점적 관개, 수리모형, 토양수분, 보유, 분포  
\*연락처 : Tel : 82-331-240-3716; Fax : 82-331-295-9548  
E-mail : hmro@unitel.co.kr

양의 방향인 3차원 직교 좌표계로 전개하면

$$\frac{d\theta\partial\psi}{d\psi\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left[K\frac{\partial\psi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K\frac{\partial\psi}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K\left(\frac{\partial\psi}{\partial z} + I\right)\right] + S + Q = 0 \quad (2)$$

이 되며,<sup>9)</sup> 여기서  $x, y$  및  $z$ 는 기준점으로부터 각 방향의 거리,  $\psi$ 는 토양수분의 매트릭 수두(m),  $K$ 는 불포화 수리전도도 ( $m\ s^{-1}$ )로 매트릭 수두 또는 수분함량의 함수이다. 식(2)는 직교좌표로 나타낸 3차원 물 흐름 방정식으로, 원통좌표로 나타낸 2차원 모델<sup>8)</sup>에 비해 점적기의 위치와 배열 및 갯수를 다양하게 변화시킬 수 있고 토양 단면별로 물 흐름상태를 입체적으로 관찰할 수 있는 장점이 있다.

식(2)에서  $\frac{d\theta}{d\psi}$  (differential moisture capacity)는 토양의 수분 보유도 함수를 매트릭 포텐셜에 관해 미분하여 얻을 수 있는데, 본 연구에서는 수분보유도 함수 추정예 van Genuchten<sup>10)</sup>의 식

$$Se = \frac{I}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{1-1/n}} \quad (3)$$

을 적용하였다. 여기서  $Se$ 는 유효포화도로  $\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 를 나타내고,  $\theta_s$ 는 흙의 포화수분함량( $m^3\ m^{-3}$ ),  $\theta_r$ 는 잔존수분함량( $m^3\ m^{-3}$ ),  $\alpha$  및  $n$ 은 흙의 물리적 성질에 따른 상수이다. 한편, 불포화 수리전도도 함수는 van Genuchten<sup>10)</sup>의 식

$$K(\psi) = \frac{K_s \left\{ 1 - (\alpha\psi)^{mn} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{ml}} \quad (4)$$

을 적용하여 추정하였다. 여기서  $K_s$ 는 포화 수리전도도( $m\ s^{-1}$ ),  $m = 1 - \frac{1}{n}$  이고,  $l = 0.5$ 를 대입하였다.<sup>11)</sup> 토양의 수분 보유도 함수는 토양의 함수 이력에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있으나, 불포화 수리전도도는 그 영향이 거의 없는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup>

토양-작물-대기 연속계에서 기상에 의한 잠재 증발산을 산정하는데, 변형된 Gauss 분포식에 기초하여 3월~10월 사이에 수원 지방에서의 실측자료에 최적화 시킨 김과 고<sup>13)</sup>의 경험식을 이용하였다. 김과 고<sup>13)</sup>의 연구 결과에서 알 수 있듯이 이 방법은 실측치를 잘 대표하였으며, 잠재 증발산으로부터 실제 증발산을 산정하기 위해서 이전의 연구<sup>8)</sup>에서와 같이 뿌리의 흡수 능력은 흙의 수분함량에 의해 영향 받는다는 Feddes 등<sup>14)</sup>의 이론을 적용하였다. 지표면에서의 수분 증발은 지표면에서의 수리전도도와 대기중의 상대습도에 의해 제한되며,<sup>15)</sup> 이러한 현상을 수식으로 기술하는 구체적인 방법 역시 이전 연구<sup>8)</sup>에 상술 되어 있다.

### 뿌리의 분포 및 성장과 물 흡수

뿌리의 분포 및 성장, 그리고 물 흡수에 관한 이론도 주로 노와 김<sup>8)</sup>의 연구 결과를 이용하였으며, 중첩 내용은 그 근간만 간단히 설명한다. 뿌리의 성장에 관한 여러 이론 중에서 Borg와 Grimes<sup>16)</sup>가 많은 작물에 대한 문헌상의 실험 결과들을 토

대로 제시한 이론을 본 연구에 이용하였으며, 이는 뿌리의 성장이 작물 종류에 상관없이 일정한 경향을 보이며 적당한 환경에서의 뿌리의 성장 깊이는

$$Z_m = Z_T[0.5 + 0.5 \sin\{3.03(t/t_T) - 1.47\}] \quad (5)$$

와 같이 sigmoid 형태로 나타낼 수 있다. 여기서  $t_T$ 는 작물이 완전히 성장하는데 필요한 기간(year),  $Z_m$ 은 시간  $t$ (year)의 뿌리 깊이(cm),  $Z_T$ 는 작물이 최대로 자랐을 때 즉,  $t = t_T$ (year)의 최대 뿌리 깊이(cm)를 나타낸다. 뿌리의 횡적 성장은 깊이 성장에 비례하여 전체 생육 기간 중 근권의 형상은 일정하다고 가정하고, Michael<sup>2)</sup>의 관찰을 도입하여 이를 회전 타원체로 보았다.

본 연구에서는 뿌리에 의한 물 흡수를 기술하는 여러 방법<sup>17)</sup> 중 Gardner<sup>18)</sup>와 Feddes 등<sup>14)</sup>의 접근법을 적용하였다. 이는 흡수에 뿌리가 균일하게 분포되어 있어 물을 균일하게 흡수한다고 보는 것으로, Richards 방정식과 연계해서 불포화 토양에서의 물의 흐름을 묘사하는데 적합하다. 또한 Feddes 등<sup>14)</sup>은 여러 가지 식물에 대한 연구 결과, 뿌리에 의한 물의 흡수  $S$ 는 매트릭 수두 0에서 -400 cm까지  $S = S_{max}$ 로 일정하고, -400부터 -15,000 cm 사이에서  $S_{max}$ 로부터 0까지 수두에 비례하여 선형으로 감소한다고 하였으며, 이는

$$S = \frac{S_{max}}{14,600}(15,000 - \psi) \quad (6)$$

이 된다. 이 식에 포함된  $S_{max}$ 는 증산율의 함수이며, 지표면적 기준의 증산율을 근권 토양의 부피를 기준한 물 흡수율에 등치시켜

$$S_{max} = \frac{3T_h}{2Z_m} \quad (7)$$

를 얻었다. 여기서  $T_h$ 는 잠재 증발산율에서 잠재 증발율을 제외한 나머지 즉, 지면을 기준한 잠재 증산율(mm/hr)을 나타낸다.<sup>8)</sup> 하루중의 증산율 변화는 Rose 등<sup>19)</sup>이 제안한 삼각함수 모델을 Ritchie<sup>20)</sup>의 실험 결과에 적용하여 얻은 식을 사용하였으며, 이 식과 Ritchie<sup>20)</sup>의 실험결과는 잘 부합하였다.<sup>8)</sup>

## 실험방법

### 모델검증을 위한 점적관개 실험

**실험 현장** : 모델을 검증하기 위해 농촌진흥청 원예연구소(경기도 수원시 장안구 이목동 475)의 라이조트론 근처 나지 사과재배 시험 포장에서 점적관개 실험을 실시하여 토양 수분함량의 시간 및 공간 변화를 측정하였다. 시험장소 토양의 층위별 전용적 밀도, 포화 수리전도도 및 유기물 함량은 표 1과 같으며, 깊이 1.1 m까지 거의 균질한 사양토로 구성되어 있다. 내경 5.1 cm, 높이 3.0 cm의 core를 이용해 층위별로 불교란 토양 시료를 반복 채취하여 토양의 수분보유특성, 초기 수분함량 및 유기물 함량을, 정수두 투수시험에 의해 내경 11 cm, 높이 13 cm의 원통형 불교란 토양시료의 포화 수리전도도를 측정하였다.<sup>21,22)</sup> 토양의 공극율은 0.40-0.44로 평균은 0.42이었다.

Table 1. Some physical characteristics of the soil samples studied

Depth	Soil separates			Bulk density	Saturated hydraulic conductivity	Organic matter
	Sand	Silt	Clay			
cm		kg kg <sup>-1</sup>		Mg m <sup>-3</sup>	cm s <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
0-20	0.69	0.14	0.17	1.37	3.33×10 <sup>-4</sup>	6.7
20-40	0.72	0.15	0.14	1.43	2.53×10 <sup>-4</sup>	5.6
40-60	0.70	0.13	0.17	1.36	3.39×10 <sup>-4</sup>	7.1
60-80	0.68	0.15	0.17	1.38	3.36×10 <sup>-4</sup>	4.9
80-100	0.67	0.15	0.18	1.35	3.89×10 <sup>-4</sup>	4.9

**점적관개 실험** : 1998년 초 2.5 m×2.1 m의 재식 간격(재식 열 간격: 2.5 m)으로 사과나무 'Fuji/M.9 (*Malus domestica* Borkhi) 2년생을 정식하였다. 정식 후 높이 4.0 m의 비 가림 시설을 설치하고 주변에 깊이 0.6 m의 도랑을 파 외부 토양과의 수분간섭을 줄였다. 점적기는 주간(trunk)아래 지표면에 1개 설치하였다. 토양 수분함량은 점적기 중심부터 15 cm 간격으로 반지름 45 cm까지 동심원상에 간섭을 배제할 수 있는 위치에 4개의 알루미늄 진입관(access tube)을 1.3 m 깊이까지 매설하여 10 cm 간격으로 중성자 산란법(501DR, CPN, Marinez, CA, USA)에 의해 측정하였다. 나무를 심지 않은 토양에 대해서도 동일한 실험을 하였다. 관수율을 0.3 L hr<sup>-1</sup>로 하여 9월 11일부터 4일간 관수한 후 이를 중단하였고, 초기(9월 11일) 및 관수 중단시점(9월 15일)과 그 1일 후(9월 16일)에 토양 위치별로 수분함량을 측정하였다.

현장에서 중성자 수분측정기로 측정한 수치는 실험종료 후 중량법으로 측정한 수분함량에 의해 보정하여 토양수분 단면을 구하였으며, 이를 TDR probe(Trase, Soilmoisture Equipment, Corp., Santa Barbara, CA, USA)를 통해 측정한 수분단면과 비교하였다. TDR probe는 주간으로부터 각각 15 및 45 cm 떨어진 지점에 깊이 100 cm까지 10 cm 간격으로 설치하였으며, 두 측정 방법간 차이는 거의 없었다.

#### 토양수분 보유도 및 수리전도도 함수

토양의 불포화 물 흐름 특성을 알기 위해서는 불포화 수리전도도 함수인 식(4)의  $K_r$ ,  $\alpha$ , 그리고  $n$ 을 알아야 한다. 이들은 불포화 수리전도도 함수를 측정함으로써 얻을 수 있으나 그 측정이 쉽지 않아, 측정이 비교적 쉬운 토양수분 보유도 함수를 얻어  $\alpha$ 와  $n$ 을 간접적으로 구하고, 토양의 포화 수리전도도  $K_s$ 는 직접 측정하였다.<sup>23)</sup>

토양수분 보유곡선은 이력현상에 따라 달라지므로 마름 과정(drying)과 젖음 과정(wetting)의 두 가지 모두에 대해 구하였으나, 일반적으로 젖음 과정에서 측정된 수분보유곡선이 마름 과정에서 측정된 것보다 수분 이동을 잘 예측한다고 알려져 있다.<sup>24)</sup> 이와는 별도로 disk tension infiltrometer를 이용하여 물이 지속적으로 토양 속으로 흘러 드는 동안 토양의 수분보유 특성을 측정하였다.

Disk tension infiltrometer를 이용한 현장시험은 표층토(약 20 cm)를 제거한 후 실시하였고, 시험 결과로부터 Jarvis와 Messing<sup>25)</sup>이 제안한 Gardner 모델의 미세 수압구간 적용법을 이용하여 토양의 포화 수리전도도와  $\alpha$  및  $n$ 을 구했다. 포화 수

리전도도는  $1.36 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ , 그리고  $\alpha$ 와  $n$ 값들은 각각 0.045와 1.85로, 이 값들은 사양토에 전형적인 값들이다.<sup>23)</sup>

마름 과정의 토양수분 보유곡선 측정을 위해 내경 5.1 cm, 높이 3.0 cm의 core로 채취한 불교란 토양시료를 0.005 M CaCl<sub>2</sub> 용액(약간의 Thymol 첨가)으로 밑에서부터 천천히 24시간 동안 포화 시킨 후, Tempe pressure cell로 옮겨 다시 0.005 M CaCl<sub>2</sub> 용액으로 밑에서부터 포화시켜 전처리를 완료하였다. 조립을 완료한 후 질소가스로 압력을 주어 흘러 나오는 유출수의 양을 시간별로 기록하고, 평형에 도달하면 압력을 높여가는 과정을 수분장력 90 kPa까지 단계별로 반복하였다. 수분장력 90 kPa로 평형을 이룬 토양을 Tempe pressure cell에서 분리하여 수분정량 하였다. 포화 수분함량은 전용적 밀도로부터 추정하였으며, 각 장력별 수분함량은 90 kPa의 수분함량에 각 구간의 유출수의 양을 단계적으로 거슬러 합하여 구하였다. 한편, 수분장력 92, 132, 182, 220, 510, 1,000 및 1,400 kPa에서의 수분함량은 토양수분 압출장치(LAB0123, Soilmoisture Equipment, Corp., Santa Barbara, CA, USA)를 사용하여 구했다.

젖음 과정의 토양 수분 보유곡선 측정은 200 kPa까지 측정 가능한 토양수분 압출장치에 수분이력상태를 고려할 수 있는 장비를 부착하여 먼저 마름상태에 대한 측정을 182 kPa까지 실시하고 여기서부터 장치내의 압력을 15단계로 점차 낮추면서 모세관력에 의한 물의 흡수가 평형에 도달했을 때 수분함량을 측정하여 구하였다.

마름 및 젖음 과정에서 구한 토양수분 보유곡선을 그림 2에 나타내었다. 포화 상태에서부터 1,400 kPa까지를 포괄하는 주 마름곡선을 작성하였고, 이에 부합하는 van Genuchten 모델의  $\alpha$ 와  $n$ 값은 각각 0.026과 1.270이었다. 여기에서  $\theta_r$ 은 0.06을 사용하였고 이는 포장의 자연건조상태에서의 수분함량 실측치중 가장 작은 값으로, 보통의 경우  $\theta_r$ 로 사용하는 수분장력 1,500 kPa에서의 수분함량보다도 작은 값이었다. 젖음 곡선은 압출장치의 측정압 상한계 부근인 182 kPa까지만 승압하고 이로부터 포화상태까지 감압하여 1차 젖음 곡선만 얻었으므로<sup>23)</sup> 본 연구에 필요한 주 젖음 곡선은 젖음 곡선 측정결과와 문헌상의 전형적인 수분이력현상<sup>23)</sup>을 합성하여 그림 1에 실선으로 표시하였으며, 이때  $\alpha$ 와  $n$ 값들은 각각 0.073과 1.235로,  $\alpha$ 는 전형적인 사양토에 대한 값이었으나  $n$ 은 약간 작은 편이었다.<sup>23)</sup> 마름 곡선과 젖음 곡선에서 구한 값들의 비는 2.8로 Kool과 Parker<sup>26)</sup>가 제안한 2보다는 다소 큰 값이었다. 또한, 그림 1에 disk tension infiltrometer로 측정한  $\alpha$ 와  $n$ 에 의한 곡선도 나타내었으며 토양수분 압출에 의한 수분보유도 함수와는 상당

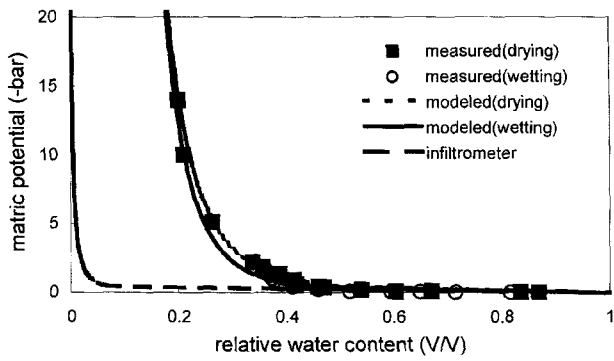


Fig. 1. Soil moisture retention curves measured using pressure-plate extractor and disk tension infiltrometer, and estimated using van Genuchten's model.

한 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다. 토양수분 압출에 의한 값은 실험결과로부터 안정한 값을 얻을 수 있는데 반하여, disk tension infiltrometer에 의한 방법은  $\alpha$ 와  $n$ 에 대한 모델의 민감도가 작아서 측정치에 대한 이들 값의 적정 범위가 매우 넓어 정밀한 값을 찾는 것이 어려운 특징이 있었다.

실내에서 정수두 투수시험에 의한 토양의 포화 수리전도도는 전형적인 사양토에 대한 값<sup>23)</sup>보다는 다소 작은 값들이었고(표 1), disk tension infiltrometer로 측정된 값은  $1.36 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ 로 전형적인 사양토에 대한 값이었다. 정수두 투수시험의 결과는 실제 수리전도도보다 더 작게 나왔을 것으로 판단되며, 그 이유는 실내 투수시험에서 시료를 물로 포화시킬 때 시료 내부의 공기를 먼저 이산화탄소로 치환하지 않아서 시료에 공기 입자가 잔존할 가능성이 있으며, 또한 운반 과정에서 시료의 다짐도 발생했을 것이기 때문이다. 본 연구에서는 현장에서 토양의 손상 없이 측정된 disk tension infiltrometer를 이용한 포화 수리전도도를 사용하였으며, 이를 이용한 모델 예측치가 실측치와 더 잘 일치하였다.

### 모델의 해

본 연구에서 개발한 모델의 지배방정식은 식(2)에 필요한 매개변수를 대입하여 얻는다. 이는 강한 비선형으로 인해 수치해법에 의해 해를 구할 수 있는데, Hills 등<sup>27)</sup>이 제안한 predictor-corrector법을 적용하였다. 수치해를 위한 grid system은 block-centered grid를 사용하였고, Crank-Nicolson scheme을 이용함으로써 토양수분 이동의 부정류 특성을 고려하였다. 지배방정식의 이산화에 의해 발생하는 연립방정식은 Gauss-Seidel 반복법에 의해서 풀었다. 모델의 풀이에는 64bit 컴퓨터인 알파 스테이션(digital사, USA)을 사용했다. 개발된 모델 및 이의 수치해는 검증이 필요하며, 이는 보통 간단한 경우의 해석해나 공인된 수치해와 비교를 통해서, 그리고 모델의 검증은 실험 결과와의 비교를 통해서 수행하였다.

### 기존 수치해와의 비교

수치해법의 적정성을 확인하기 위하여 본 연구의 수치해를 1차원 문제에 적용하여 기존의 해와 비교하였다. 식(2)의 1차원 형태에 source와 sink항이 없이 지표에 일정 물 흐름 경계조건을 적용한 경우에 대한 수치해를 구하여 Hills 등<sup>27)</sup>의 수치해와 비교하였으며, 두 해가 잘 일치하였다(자료 생략). 또한, grid block의 크기를 1 cm, 시간 간격을 0.5 s로 두었을 경우 물에 대한 물질수지 오차는 모든 경우에 1% 이내였다.

### 실험 결과와의 비교

개발된 모델이 근권에서의 수분이동 현상을 잘 묘사하는지 점검하기 위하여 실증실험 결과와 비교하였다. 표 2는 사과나무가 없는 포장의 초기 토양수분 함량(1998년 9월 11일), 한 점에서 0.3 L hr<sup>-1</sup>의 유량으로 4일간 관수하다 이를 중단한 직후(9월 15일), 그리고 관수중단 1일 후(9월 16일) 토양의 수분함량을 측정된 값이다. 토양의 초기 수분함량과 수원지방의 기상 자료를 적용한 모델 예측 결과 관수 4일 후의 토양 수분함량 분포는 그림 2와 같았고, 관수 중단 1일 후 토양 수분함량 분포는 그림 3과 같았으며, 이는 실측치(표 2)는 비교적 잘 일치하였다.

Table 2. Soil moisture content profiles measured on Sep. 11 (initial), Sep. 15 (4-day irrigation), and Sep. 16 (1 day after cessation of irrigation) from a surface drip emitter with a flow rate of 0.3 L hr<sup>-1</sup>

Depth cm	Distance from drip emitter (cm)											
	0			15			30			45		
	Sep.11	Sep.15	Sep.16	Sep.11	Sep.15	Sep.16	Sep.11	Sep.15	Sep.16	Sep.11	Sep.15	Sep.16
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$											
10	0.13	0.32	0.21	0.12	0.23	0.12	0.11	0.14	0.12	0.11	0.12	0.12
20	0.16	0.30	0.26	0.18	0.24	0.22	0.11	0.15	0.14	0.16	0.17	0.17
30	0.17	0.28	0.26	0.18	0.26	0.23	0.12	0.17	0.15	0.18	0.18	0.18
40	0.21	0.26	0.25	0.21	0.26	0.25	0.16	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19
50	0.23	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.19	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20
60	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.26	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23
70	0.25	0.25	0.25	0.27	0.27	0.27	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22
80	0.22	0.22	0.22	0.25	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21
90	0.21	0.21	0.21	0.23	0.23	0.23	0.21	0.20	0.20	0.22	0.21	0.21
100	0.23	0.23	0.22	0.25	0.24	0.25	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.23

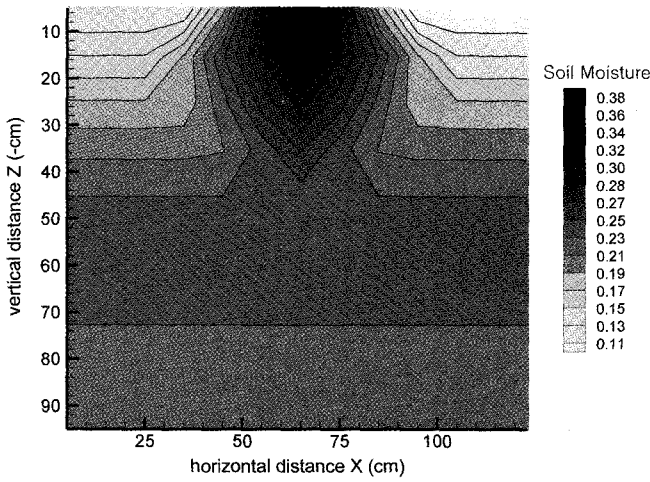


Fig. 2. Estimated soil moisture profile after 4-day irrigation from a surface drip emitter with flow rate of 0.3L hr<sup>-1</sup>.

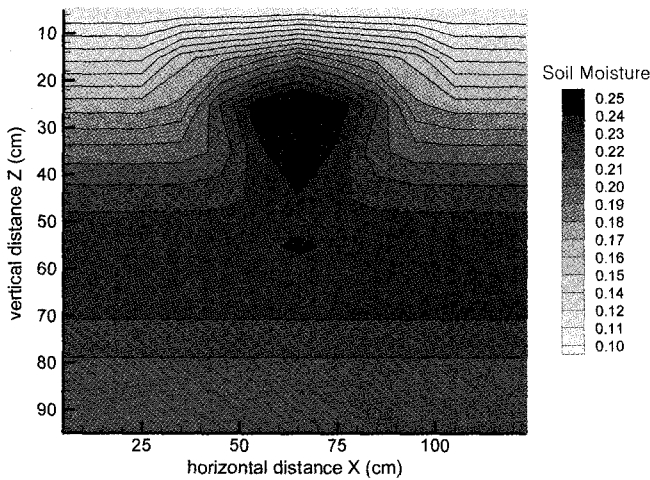


Fig. 3. Estimated soil moisture profile 1-day after cessation of irrigation from a surface drip emitter with flow rate of 0.3L hr<sup>-1</sup>.

모델을 이용한 예측 및 고찰

2차원 모델을 이용한 지표면 점적 관개 of 여러 특성은 노와 김<sup>8)</sup>에서 연구된 바 있으므로, 여기에서는 주로 3차원 모델을 이용하여 여러 가지 점적 관개 방식에 따른 토양수분의 분포양상을 비교하여 최적 점적 관개 방법을 찾고자 하였다. 모델을 이용한 모사에 사용된 매개변수 값 중 불포화 흐름에 관한 것들은 사양토에 대한 값<sup>23)</sup>들을 사용했고, 기후자료는 수원지방의 값들을 적용했으며, 과수 뿌리의 수평 및 수직 도달거리는 각각 1.2m와 1.0m로 하였으며, 토양의 초기 수분함량은 0.07 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>으로 가정하였다. 다른 변수 값은 모델 검증에 사용된 값들을 적용했다.

지면증발과 증산이 있는 경우 지표면의 1점에서 4일 동안 1L hr<sup>-1</sup>로 관수할 때 토양수분의 분포와 그 이동방향을 그림 4에 나타내었다. 모델운영 시기는 장마 후 증발산이 클 것으로 예상되는 8월 15일로 하였다. 토양수분은 김과 이<sup>7)</sup>의 실험 결과와는 달리 수평 방향보다 수직 방향으로 더 잘 이동함을 알 수 있었고, 이는 증력과 증발의 영향에 의한 것으로 판단된다.

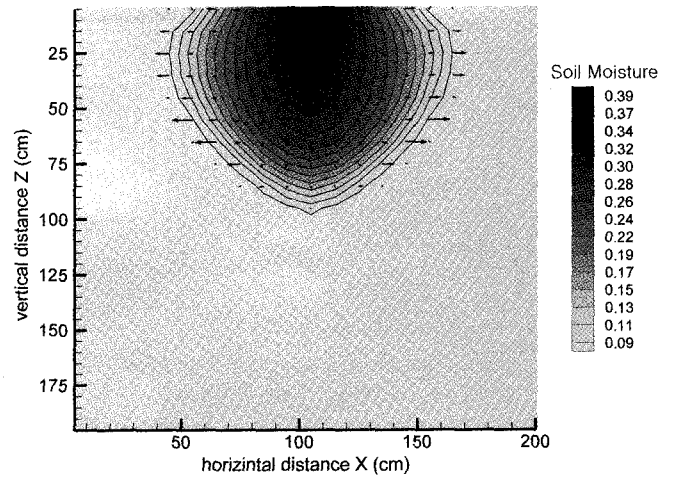


Fig. 4. Estimated soil moisture profile and its flow velocity distribution within wetting front after 4-day irrigation from a surface drip emitter with flow rate of 1L hr<sup>-1</sup>.

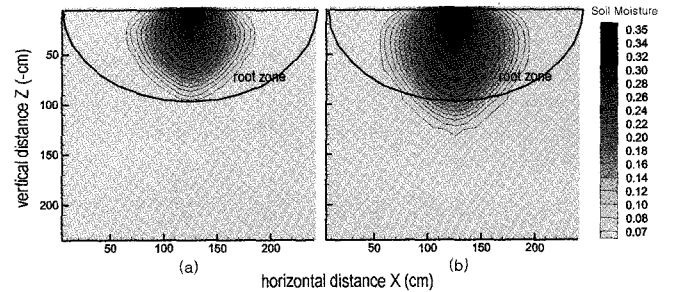


Fig. 5. Estimated soil moisture profiles at 14-day irrigation from a surface drip emitter with flow rates of (a) 0.35L hr<sup>-1</sup> and (b) 0.6L hr<sup>-1</sup>.

또한, 지표 부근의 수분흐름은 상향류이고, 점적기 부근의 유속은 상당히 크지만 점적기에서 멀어짐에 따라 유속이 급속히 감소함을 알 수 있다. 다만, 습윤구역의 경계면 부근에서는 특히 수평 유속이 다시 증가하지만 토양의 수분 보유도가 매우 작기 때문에 유량은 작을 것으로 판단된다. 증발에 의해 지표면 부근에서의 습윤구역의 수평 이동속도는 매우 느리며, 김과 이<sup>7)</sup>의 실험 결과보다도 더 느린 것으로 나타났다.

사과나무 주간아래 지표면의 1점에서 관수할 경우, 두 가지의 관수율에 대해 각각의 토양수분 분포양상을 예측하였다. 모사시기는 8월 15일이었다. 그림 5(a)는 0.35 L hr<sup>-1</sup>의 유량에서 수분의 분포양상을 나타낸 것이다. 작물에 의한 증산과 증발에 의해 습윤구역은 관수가 계속되어도 일정한 크기 이상으로는 커지지 않고 정상 상태에 도달하였으며, 본 모사 조건에서는 관수 후 14일까지 습윤 구역이 확장되어 수직 방향으로 근권의 끝까지 도달함을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 초기 토양수분 함량은 대기중 습도와의 평형치와 거의 같으므로 관수에 의한 습윤 구역 바깥의 수분함량은 모사기간을 매우 길게 취할 경우 결국 대기중 상대습도와 평형에 도달할 것이나 그 속도가 느려서 이를 무시하고 습윤구역의 크기변화가 매우 느려지는 시점을 정상 상태로 보았다. 그림 5(b)는 관수율만 0.6 L hr<sup>-1</sup>로 증가 시키고 나머지 입력자료는 그림 5(a)와 같이하여 14일 후의 수분분포를 나타낸 것이다. 이는 아직 정상 상태에 도

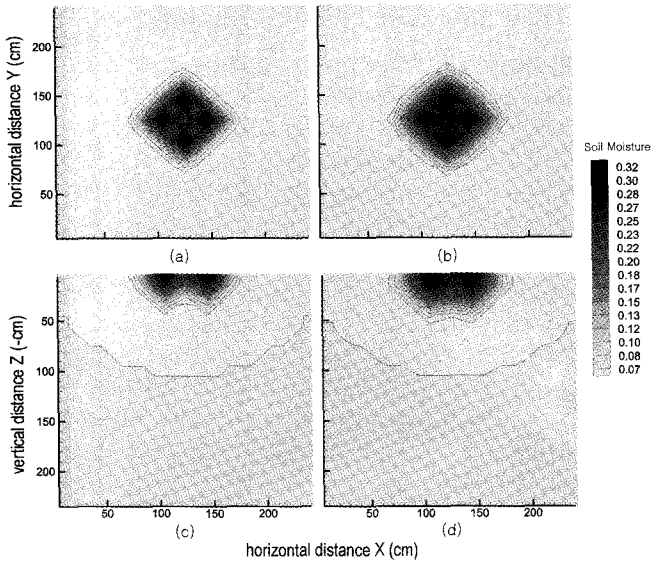


Fig. 6. Wetted soil moisture regimes irrigated from 4-buried-drip-emitters (at 25 cm below) equally spaced on the circumference 20 cm apart from the trunk: plan views at 1-day (a) and 2-day (b), and cross-sectional views at 1-day (c) and 2-day (d).

달하지는 않은 것으로, 많은 유량이 공급되어도 증발에 의해 근권의 수평 방향 끝까지 수분이 도달하지 않고 근권의 수직방향 바깥으로 수분이 낭비되고 있는 것을 알 수 있었다. 이로부터 지표면에서 점적 관개로 물을 공급할 때 토양 수분은 지면 증발과 중력의 영향에 의해 수직 방향으로 더 잘 이동하지만, 보통의 과수에서 뿌리의 성장은 수평 방향으로 더 활발하므로 근권 전체를 적시기 위해서는 1점에서 관수하는 것이 좋은 방법이 아님을 알 수 있었다.

사과나무의 주간을 중심으로 반경 20 cm되는 원주상의 지표면에 등 간격으로 설치된 4개의 관수지점으로부터 전체 관수를 0.6 L hr<sup>-1</sup>로 물을 공급할 때 습윤전선의 이동양상을 그림 6에 나타내었다. 습윤전선의 이동속도는 습윤구역이 확장됨에 따라 점차 느려지며 두 습윤전선이 겹쳐진 후부터는 습윤전선이 바깥쪽으로 빨리 확장함을 알 수 있었다. 또한, 한 점에서 관수할 경우보다 습윤구역의 형상이 근권의 형상과 더 비슷하여 작물의 뿌리에 의한 물 흡수가 더 많을 것으로 예측되며, 따라서 점적 관개는 1점 관수보다 여러 점으로 분할하여 관수하는 것이 더 효율적일 것으로 판단되었다.

과수의 주간에 인접한 지표에서 0.6 L hr<sup>-1</sup>로 1점 관수시와 주간을 중심으로 반경 20 cm되는 지표면의 원주상에 있는 등 간격의 4점에서 0.15 L hr<sup>-1</sup>씩 분할 관수시에 토양수분의 분포양상을 비교하였다. 1점 관수시 토양수분 분포는 그림 5(b)에 있고, 4점 분할 관수시 주간과 두 관수지점을 통과하는 단면의 토양수분 함량은 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서는 관수지점이 4점으로 많아진 것 이외에는 그림 5(b)에서의 입력자료를 그대로 사용하였다. 1점 관수시 습윤구역의 수직 도달거리는 4점 관수시보다 약 18% 정도 더 멀지만 최대 수평도달거리는 4점 관수시가 약 10% 더 멀었다. 이로부터 4점 관수시 습윤구역의 형상이 1점 관수시보다 근권의 형상에 더 가까운 것을 알 수 있었고 따라서 작물의 물 흡수량도 증가할 것으로 예상되었

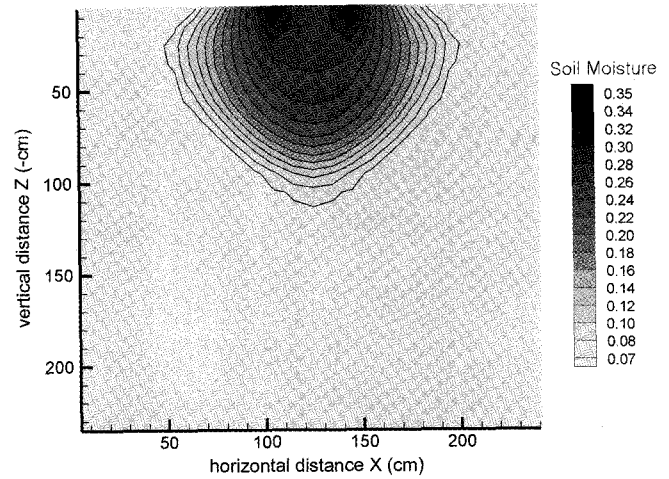


Fig. 7. Estimated soil moisture profile irrigated 14 days from 4 surface drip emitters equally spaced on the circumference 20 cm apart from the trunk with individual flow rate of 0.15 L hr<sup>-1</sup>.

다. 이를 확인하기 위해서 두 경우에 대한 증산량을 비교하였으며, 증산량 계산은 1점과 4점 관수시 관수시작부터 관수가 계속되는 14일간의 누적 증산량을 동일한 조건에서 측정하였다. 과수에 의한 누적 증산량은 1점 관수의 경우 66.5 L임에 비해 4점의 경우 62.5 L로 오히려 1점 관수시에 더 컸으며, 이는 지표면 4점 관수시 지표면에서의 습윤구역이 증가함에 따라 지면 증발량이 훨씬 많기 때문으로 판단되었다. 14일 동안의 1점 및 4점 관수시 지면 증발량은 각각 45.2 L와 56.5 L이었다.

이상에서 1점 관수시보다 4점으로 분할 관수시 습윤구역의 형상이 근권의 형상에 더 가깝지만, 지면증발에 의한 물의 낭비가 증가하여 증산량이 오히려 줄어드는 단점이 있음을 알 수 있었다. 지면 증발이 많아지면 물이 낭비될 뿐 아니라 관비(fertigation)시 지표에 염이 축적되는 단점도 있을 것으로 판단된다. 특히 점적 관개가 필요한 시기는 강우가 부족하여 지면 증발이 클 때이므로 이러한 부정적인 효과가 극대화할 것으로 예상된다. 이러한 문제점들은 관수지점을 지표면 아래로 옮길 경우 완화될 것으로 예상되고, 이 경우 관수에 의한 수분함량 분포를 그림 8에 나타내었다. 그림 8은 지하 25 cm에서 주간을 중심으로 반경 20 cm인 수평 원주상에 일정간격의 4점에서 각각 0.15 L hr<sup>-1</sup>의 유량으로 관수할 경우 관수시작 14일 후 관수지점과 주간을 통과하는 단면의 수분함량 분포이다. 지표면에서의 분할관수(그림 7)와 비교하면 습윤구역이 더 빨리 성장하는 것을 알 수 있으며, 이는 지면에서의 증발량 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 지하 25 cm에서 14일 관수시 과수에 의한 증산량은 73.2 L이었고 이는 지표면 4점 관수시의 62.5 L에 비해 약 17% 증가하며, 지면 증발량은 반대로 지면 관수시의 56.5 L에 비해 지하 관수시 36.3 L로 약 36% 감소하는 등 물 이용 효율이 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

### 요약 및 결론

점적 관개를 이용하여 토양에 물을 공급할 경우 토양수분의

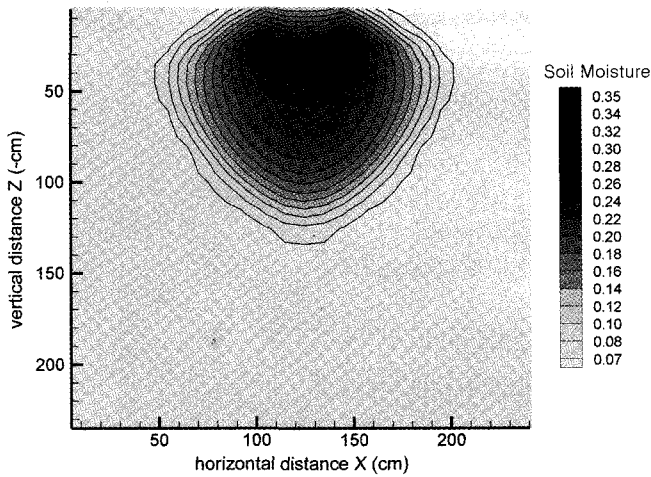


Fig. 8. Estimated soil moisture profile irrigated 14 days from 4-buried-drip-emitters (25 cm below) equally spaced on the circumference 20 cm apart from the trunk with individual flow rate of 0.15L hr<sup>-1</sup>.

분포와 이동을 예측하는 수학적 모델을 개발하였다. 모델은 3차원 직교좌표계를 이용하였으며, 지표면 증발과 작물에 의한 증산을 고려할 수 있고, 이들의 계절적 변화와 하루중의 시간에 따른 변화 뿐 아니라 작물 뿌리의 성장 및 뿌리의 토양 중 분포형태도 고려할 수 있도록 설계되었다. 모델의 해를 구하기 위해 Crank-Nicolson법과 block-centered grid system등을 이용한 유한차분법을 이용하였으며, 연립 방정식의 해법으로는 Gauss-Seidel 반복법을 사용하였다. 개발된 모델은 수학적으로 뿐 아니라 실험을 통해서도 검증하였으며, 점적 관개 실험결과를 비교적 잘 예측하였다. 모델을 이용한 컴퓨터 모사결과 점적 관개의 몇 가지 특성을 알 수 있었다. 관수된 물은 점적기에서 멀어짐에 따라 그 유속이 크게 감소하였고, 관수시간이 증가함에 따라 습윤구역의 크기가 증가하는 속도도 급격히 감소하였다. 1점 관수의 경우 습윤구역은 수평 방향보다는 수직 방향으로 더 멀리까지 도달하였으며, 일정 관수율로 물을 공급할 경우 습윤구역은 일정한 크기 이상으로 성장하지 않고 정상 상태에 이르는 것을 알 수 있었다. 보통의 과수에서는 근권의 수직방향 거리가 수평방향보다 더 길지 않으므로 지표면 1점 관수보다는 지하 4점으로 분할 관수하는 경우에 증산량은 10% 증가하나 지면 증발량은 20% 감소하는 등 물 이용 효율이 증가함을 알 수 있었다. 또한, disk tension infiltrometer에 의한 토양의 수분보유도 함수는 토양수분 압출에 의한 젖음 곡선과는 상당한 차이를 나타내었다.

### 감사의 글

본 연구는 농림기술개발연구과제 중 첨단농업 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Linsley, R. K. and Franzini, J. B. (1979) In 'Water-Resources

- Engineering,' 3rd Ed., pp. 391-392, McGraw Hill, New York.
2. Michael, A. M. (1978) In 'Irrigation-Theory and Practice,' 1st Ed., pp. 662-681, Vikus Publishing House Ltd., New Delhi.
3. Bear, J. (1988) In 'Dynamics of Fluids in Porous Media,' Dover Publications, Inc., New York.
4. Philip, J. K. (1957) The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science* **83**, 345-357.
5. Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Ben-Asher, I., Brant, A. and Goldberg, D. (1971) Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical prediction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**, 683-689.
6. Longenecker, G. W. and DeTar, W. R. (1980) New Techniques for Scheduling Trickle Irrigation. ASAE Technical Paper No. 80-2061, 1-14.
7. Kim, C. S. and Lee, K. H. (1989) Effect of the irrigation rate on wetted patterns in sandy loam soil under trickle condition. *J. of Korean Agricultural Engineering Society* **31**, 104-115.
8. Ro, H. M. and Kim, S. H. (1997) 2-dimensional moisture migration in dripirrigated root zone. *J. of Korean Society Soil Science & Fertilizer* **30**, 314-327.
9. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N. (1960) In 'Transport Phenomena,' John Wiley & Sons, Inc., New York.
10. van Genuchten, M. T. (1978) In 'Calculating the Unsaturated Hydraulic Conductivity with a New Closed-form Analytical Model,' Dept. of Civil Engr., Princeton Univ.
11. Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **12**, 513-522.
12. Vachaud, G. and Thony, J. L. (1971) Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resour. Res.* **7**, 111-127.
13. Kim, C. H. and Koh, C. K. (1977) A study on the development of a simulation model for predicting soil moisture content and scheduling irrigation. *J. of Korean Agricultural Engineering Society* **19**, 1-17.
14. Feddes, R. A., Kowalik, P., Kolinska-Malinka, K. and Zaradny, H. (1976) Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *J. of Hydrology* **31**, 13-26.
15. Ro, H. M. (1989) A Simulation Study of Water Redistribution in the Upland Soil of Jungdong Sandy Loam, Ph. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
16. Borg, H. and Grimes, D. W. (1986) Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans. ASAE.* **29**, 194-197.
17. Corapcioglu, M. Y. (1992) Modeling plant uptake and bioremediation of semi-volatile hydrocarbon compounds. *Water Sci. Technol.* **26**, 1651-1658.
18. Gardner, W. R. (1960) Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* **89**, 63-73.
19. Rose, C. W., Byrne, G. F. and Hansen, G. K. (1976) Water transport from soil through plant to atmosphere. A lumped-parameter model. *J. of Agric. Meteorol.* **16**, 171-184.
20. Ritchie, J. T. (1973) Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. *J. of Agron.* **65**, 893-897.
21. Klute, A. (1986) In 'Methods of soil analysis: Part 1-Physical

- and Mineralogical Methods,' 2nd Ed., Am. Soc. of Agr. & Soil Sci. Soc. of Am., Madison.
22. Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (1982) In 'Methods of Soil Analysis: Part 2-Chemical and Microbiological Properties,' 2nd Ed., Am. Soc. of Agr. & Soil Sci. Soc. of Am., Madison.
23. Guymon, G. L. (1994) In 'Unsaturated Zone Hydrology,' Prentice-Hall, London.
24. Whisler, F. D. and Watson, K. K. (1969) Analysis of infiltration into draining porous media. *J. of Irrig. Drain. Div. Proc. of ASCE*, **95(IR4)**, 481-491.
25. Jarvis, N. J. and Messing, I. (1995) Near saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **59**, 27-34.
26. Kool, J. B. and Parker, J. C. (1987) Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* **23**, 10-114.
27. Hills, R. G., Porro, I., Hudson, D. B. and Wierenga, P. J. (1989) Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils: 1. Model development and evaluation. *Water Resour. Res.* **25**, 1259-1269.

---

#### A Numerical Model of Three-dimensional Soil Water Distribution for Drip Irrigation Management under Cropped Conditions

Hee-Myong Ro\*, Jae-Phil Kwon<sup>1</sup>, Seung-Hyun Kim<sup>1</sup> and Sun-Ho Yoo<sup>2</sup>(*Department of Horticultural Environment, National Horticultural Research Institute, 475, Imok-dong Jangan-gu Suwon 440-310, Korea; <sup>1</sup>Department of Environment Engineering, College of Engineering, Yeung-Nam University Kyung-San 712-749, Korea; <sup>2</sup>College of Agricultural and Life Sciences Seoul National University Suwon 441-744, Korea*)

**Abstract :** A numerical model of three-dimensional soil water distribution for drip irrigation management under cropped conditions was developed using Richards equation in Cartesian coordinates. The model accounts for both seasonal and diurnal changes in evaporation and transpiration, and the growth of plant root and the shape of root zone. Solutions were numerically approximated using the Crank-Nicolson implicit finite difference technique on the block-centered grid system and the Gauss-Seidel elimination in tandem. The model was tested under several conditions to allow the flow rates and configurations of drip emitters vary. In general, simulation results agreed well with experimental results and were as follows. The velocity of soil-water flow decreased drastically with distance from the drip source, and the rate of expansion of the wetted zone decreased rapidly during irrigation. The wetting front of wetted zone from a surface drip emitter traveled farther in vertical direction than in horizontal direction. Under this experimental weather condition, water use efficiency of a drip-irrigated apple field was greatest for 4-drip-emitter system buried at 25 cm, resulting from 10% increase in transpiration but 20% reduction in soil evaporation compared to those for surface 1-drip emitter system. Soil moisture retention curve obtained using disk tension infiltrometer showed significant difference from the curve obtained with pressure plate extractor.

---

Key words : apple, drip irrigation, modeling, soil water, retention, distribution.

\*Corresponding author