점적관개에 따른 토양수분 재분배 균일성 평가

Uniformity Assessment of Soil Moisture Redistribution for Drip Irrigation

최순균* · 최진용**† · 남원호* · 허승오*** · 김학진**** · 정선옥***** · 한경화*****

Choi, Soon-Kun · Choi, Jin-Yong · Nam, Won-Ho · Hur, Seung-Oh · Kim, Hak-Jin · Chung, Sun-Ok · Han, Kyung-Hwa

ABSTRACT

Greenhouse cultivation has been increasing for high quality and four season crop production in South Korea. For the cultivation in a greenhouse, maintaining adequate soil moisture at each crop growth stage is quite important for yield stability and quality while the behavior of moisture movement in the soil has complexity and adequate moisture conditions for crops are vary. Drip irrigation systems have been disseminated in the greenhouse cultivation due to advantages including irrigation convenience and efficiency without savvy consideration of the soil moisture redistribution. This study aims to evaluate soil moisture movement of drip irrigation according to the soil moisture uniformity assessment. Richards equation and finite difference scheme were adapted to simulate soil moisture behavior in soil. Soil container experiment was conducted and the model was validated using the data from the experiment. Two discharge rate (1 l/hr and 2 l/hr) and three spaces between the emitters (10 cm, 20 cm, and 30 cm) were used for irrigation system evaluation. Christiansen uniformity coefficient was also calculated to assess soil moisture redistribution uniformity. The results would propose design guidelines for drip irrigation system installation in the greenhouse cultivation.

Keywords: Soil moisture; redistribution uniformity; drip irrigation; richards equation; finite difference scheme; christiansen uniformity coefficient

1. 서 론

우리나라는 연중 고품질의 농산물을 요구하는 소비자의 기대와 생산자의 경제적 목적이 부합되어 시설재배면적이 증가하고 있으며 질 높은 생산기술이 요구되고 있다 (Lee et al., 1998; Kim et al., 2001; Lee et al., 2008). 시설재배지 생산기술 중 정밀관개는 작물이 받는 수분스트레스를 최소화 하고 작물 생육에 필요한 수량을 적기에 투입함으로써 생산량과 품질을 향상시키고 물 소비량 및 양분의 집적과 용탈을 감소시키는 효과가 있다 (Postel, 2000; Kim et al., 2009). 정밀관개 기법 중 점적관개는 점적호스를 이용하여 작물의 근근역에 필요한 수량을 공급

함으로써 관개용수를 고효율로 사용할 수 있는 관개기법이다. 정밀관개 기술이 발달한 이스라엘에서는 기후, 토양의 종류, 식재 간격 등을 고려하여 점적관개 시스템을 평가하고 현장에 적용하고 있으며 이러한 선진화된 관개 시스템은 열악한 농업환경에서도 20 년간 12 배의 농업생산량 증가와 95 %의 식량자급률을 유지하는데 기여하였다 (Cho et al., 2000). 그러나 국내 시설재배지는 관개시스템의 구성 및 운영에 관한 기준이나 지침이 없기 때문에 관개시설 설계시 자재회사의 사양서나 재배자의 경험에 의존하는 경우가 대부분이다 (Lee et al., 1998). 그 결과 시설재배지의 토양에 적절하지 못한 관개자재가 사용되거나 항시 물을 공급하여야 한다는 관리자의 편견으로 인하여 과다관개가 이루어질 가능성이 있다. 필요수량 이상의 관개는 농산물의 품질에 부정적 요인으로 작용하고 용탈에 의한 수원오염을 유발한다. 따라서 시설재배지 토양특성을 고려하여 과다관개를 지양하고 작물의 유효 근근역에 생육시기별 적정 토양수분을 유지하도록 하는 관개시스템과 운영기준이 요구된다.

관개시스템에 대한 평가연구로서 Lee (1999)와 Nam and Kim (2006)은 관개자재의 성능과 수리적 특성을 판별하기 위하여 관개 균일성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 관개용수는 토양 내에서 재분배되어 식물에 흡수되므로 관개자재와 관개방법에 대한 평가는 관개 균일성 이외에도 토양수분거동과 토

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부
** 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수, 농업생명과학연구원 겸임연구원
*** 농촌진흥청 연구정책과
**** 서울대학교 바이오시스템·소재학부 조교수
***** 충남대학교 바이오시스템기계공학과 조교수
***** 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과
† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583
Fax: +82-2-873-2087
E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

2012년 3월 5일 투고
2012년 3월 27일 심사완료
2012년 4월 13일 게재확정

양수분 재분배의 균일성에 관한 연구가 병행되어야 한다. 토양 내 수분거동은 관개량과 토성에 따라 상이하기 때문에 현장실험을 통한 토양수분 재분배 균일성 평가는 시간적, 경제적 측면에서 어려움이 발생한다. 그러므로 관개에 의한 토양수분거동을 모의하여 토양수분 재분배 균일성을 평가하는 것이 타당하다.

토양과 같은 불포화 다공성 매질체 (variably saturated porous media)에서의 수분이동은 수자원, 생물환경분야 등 다양한 분야에서 연구가 이루어졌다 (Sadegh, 2011). Richards (1931)는 연속방정식과 Darcy 법칙을 결합하여 토양에서의 수분이동에 관한 식을 제시하였으며, van Genuchten (1980)은 용적수분함량 (volumetric soil water content)과 토양수분장력 (soil water potential), 수리전도도 (hydraulic conductivity)에 관한 관계식을 도출하여 Richards 방정식에 대한 해석의 정확도를 높였다. 관개에 의한 불포화 토양에서의 토양수분 이동에 관하여 Elmaloglou and Diamantopoulos (2010)는 원통형 토양수분 거동모형을 개발하여 점적기의 유량, 간격, 관개시간에 따른 토양수분의 균일성에 대해 연구하였다. 국내 연구의 경우, Ro and Kim (1997)은 점적관개에 대하여 원통좌표로 나타난 2차원 모델을 이용하여 관개에 의한 근근역에서의 수분이동 특성을 이해하고자 하였으며, Ro et al. (2000)은 과수를 대상으로 직교좌표로 나타난 3차원 모델을 이용하여 관개위치 변화에 따른 토양수분 재분배 양상을 모의하였다. 그러나 국내 시설재배지 토양 특성을 고려하여 점적관개방법에 의한 토양수분 상태를 평가하는 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 관개조건에 따른 근근역에서의 토양수분 재분배 균일성을 평가함으로써 시설재배지 점적관개기준을 평가하고자 하였다. 토양 내에서의 수분거동을 토양특성과 관개조건을 적용하여 모의할 수 있는 프로그램을 구성하였으며, 토조실험 (soil container experiment)을 수행하여 모의 결과와 실험값의 비교를 통해 모델의 적용성을 평가하였다. 이 결과를 바탕으로 모의 프로그램에서 점적관개조건을 가정하여 근근역에서의 토양수분 재분배 균일성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 근근역에서의 토양수분 재분배 균일성을 평가하기 위하여 현장에서 채취한 토양의 토성을 판별하여 매개변수를 추정하였으며 모의 프로그램을 구성하여 관개에 의한 토양수분 재분배 모의 결과를 도출하였다. 토조실험을 실시하여 관개에 의한 토양 내 각 지점의 토양수분 변화량을 실측 함으로써 모델의 적용성을 검토하였으며 점적기 관개 간격, 유량 및 관개 시간을 가정하여 토양수분 거동을 모의하고 토양수분 재분배 균일성을 평가하였다. 이와 같은 과정을 도식화하여 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1 Schematic process of the study

1. 토양수분거동 모의 프로그램

가. Governing Equation

토양에서의 수분이동을 정량적으로 기술하기 위한 물질보존 원리인 물수지 방정식은 다음과 같이 표현 된다 (Ro et al., 2000).

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

여기서, θ 는 수분함량 ($L^3 L^{-3}$), q 는 Darcy의 속도 ($L^3 L^{-2} T^{-1}$)를 의미한다. Darcy는 실험을 통하여 다공성매질내의 유체의 흐름에 관한 식을 제시하였다. 불포화 다공성매질 내의 Darcy의 법칙은 다음과 같다.

$$\vec{q} = -K(h) \nabla h = -K(h) \nabla (h - z) \quad (2)$$

h 는 수두 (L), $K(h)$ 는 불포화 수리전도도 함수 ($L T^{-1}$), z 는 중력방향을 양 (positive)으로 하였을 경우의 수직좌표 (L)이다. 불포화 다공성매질 내의 물은 인장응력을 받고 있으므로 압력수두 h 를 토양수분장력인 $-\psi$ 로 등치시켜 나타낼 수 있다. 따라서, 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 나타내면, mixed-form Richards equation인 식 (3)으로 표현된다 (Richards, 1931; Celia et al., 1990). 본 연구에서는 mixed-form Richards equation으로 점적관개에 의한 토양수분 이동을 해석하기 위하여 3차원 직교좌표계로 식을 전개하여 적용하였다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot K(\psi) \nabla \psi + \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Richards 방정식을 해석하기 위해서는 수리전도도와 수분함량, 수두에 대한 관계식이 필요하며, van Genuchten (1980)은 실험을 통하여 이에 대한 관계식을 도출하였다.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (4)$$

$$K(h) = \frac{K_s \{1 - (\alpha\psi)^{mn} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{ml}} \quad (5)$$

여기서, K_s 는 포화 수리전도도 ($L T^{-1}$), θ_s 는 포화수분함량 ($L^3 L^{-3}$), θ_r 은 잔존수분함량 ($L^3 L^{-3}$)을 의미한다. α , n 은 흙의 물리적 성질에 따른 상수이며 일반적으로 $m = 1 - 1/n$, $l = 0.5$ 을 대입한다 (Mualem, 1976).

나. Finite Difference Scheme

식 (3)은 고도의 비선형 미분방정식이므로 수치해석법을 적용하여야 한다 (Sadegh, 2011). Taylor 급수 전개를 이용하여 유한차분법으로 근사하는 방법에는 explicit, implicit 그리고 semi-implicit 방법이 있다. 본 연구에서는 비교적 간단한 해석 방법인 explicit 방법을 사용하였으며, Mixed-form Richards equation의 explicit difference scheme은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_{i,j,k}^{n+1} = & \theta_{i,j,k}^n - \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left\{ K_{i+1/2,j,k}^n (\psi_{i+1,j,k}^n - \psi_{i,j,k}^n) \right. \\ & \left. - K_{i-1/2,j,k}^n (\psi_{i,j,k}^n - \psi_{i-1,j,k}^n) \right\} \\ & - \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \left\{ K_{i,j+1/2,k}^n (\psi_{i,j+1,k}^n - \psi_{i,j,k}^n) \right. \\ & \left. - K_{i,j-1/2,k}^n (\psi_{i,j,k}^n - \psi_{i,j-1,k}^n) \right\} \\ & - \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \left\{ K_{i,j,k+1/2}^n (\psi_{i,j,k+1}^n - \psi_{i,j,k}^n + \Delta z) \right. \\ & \left. - K_{i,j,k-1/2}^n (\psi_{i,j,k}^n - \psi_{i,j,k-1}^n + \Delta z) \right\} + \Delta t \cdot Q \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, i, j, k 는 각각 x, y, z 방향으로의 유한차분 격자의 좌표를, Q 는 단위시간당 관개량 ($L^3 L^{-3} T^{-1}$)을 의미한다. 식 (6)은 격자중심형 모델 (block centered model)이며, 수리전도도는 식 (7)과 같이 인접한 노드사이의 값을 적용한다 (Sadegh, 2011).

$$K_{i \pm 1/2} = \frac{K(h_i) + K(h_{i \pm 1})}{2} \quad (7)$$

다. 모의 프로그램 계수 선정

일반적으로 토양수분함량은 토양의 물리적 특성에 영향을 받는다 (Hong et al., 2011). Schaap et al. (2001)은 van Genuchten (1980)에 의한 해석함수 (analytical function)계수를 미국 농무

Fig. 2 Soil texture classification using USDA soil taxonomy

Table 1 Soil hydraulic parameters for the function of van Genuchten (1980) obtained with the Rosetta Lite program (Schaap et al., 2001)

Textural class	θ_r	θ_s	α	n	K_s
	(m^3/m^3)	(m^3/m^3)	(cm^{-1})	—	(cm/day)
Sandy loam	0.039	0.387	0.027	1.45	38.20
Loam	0.061	0.399	0.011	1.47	12.00

성 (USDA, U. S. Department of Agriculture)의 입도조성에 의한 분류방법인 USDA 삼각토양분류법 (soil taxonomy)에 의해 구분된 토양의 종류에 따라 정리하였다. 실험에 사용된 토양의 종류를 파악하기 위하여 입도분석에 체가름 실험과 비중계 실험을 3 회 반복 실시하였다. 체가름 실험은 KS F 2309에 따라 수행하였으며, 비중계 실험은 KS F 2302에 따라 실시하였다. 입도 분석 결과 연구에 사용된 밭 토양은 Fig. 2와 같이 sandy loam과 loam의 특성을 갖는 것으로 나타났으며, sand, silt, clay 성분은 각각 평균 52.6 %, 34.0 %, 12.8 %로 나타났다. Schaap et al. (2001)에 의해 추정된 sandy loam과 loam의 van Genuchten 해석함수의 계수는 Table 1과 같다.

2. 토조 실험

모의 결과를 검증하기 위하여 Fig. 3 (a)와 같이 토조를 제작하여 통제용역에서의 토양수분 변화를 측정할 수 있는 실험조건을 형성하였으며, Fig. 3 (b)와 같이 15 cm 간격으로 토양수분 센서를 설치하였다. 국내 시설재배지 토양특성을 고려하여 $50 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$ 크기의 토조 (soil container)에 배수를 위한 자

Fig. 3 Soil container experiment system and position of FDR sensor

갈, 논토양 40 cm, 밭토양 50 cm를 차례대로 쌓아 점적관개에 의한 토양 내의 토양수분 함량 변화를 측정하기 위한 조건을 형성하였다. 초기토양수분함량을 측정하기 위하여 동일한 용적의 토양을 채취하여 노건조실험을 3 회 반복 실시하였다. 그 결과 밭 토양의 초기토양수분 함량은 21.0 %로 나타났다. 점적기는 설치 위치 조정이 용이한 점적버튼을 활용하였으며 시간 당 유량 측정결과 2.25 l/hr를 나타냈다. 관개는 4 시간을 실시하였으며 토양수분 센서를 이용하여 시간에 따른 각 지점의 토양수분 함량의 변화를 1 분 간격으로 측정하였다. 토양수분변화 측정 과정에서 증발에 의한 토양수분 손실을 차단하기 위하여 관개 이후 토조상부를 밀봉하였다.

토양수분 측정센서는 판형 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 센서인 Spectrum 사(社)의 SM100을 사용하였다. 센서의 측정오차는 3 %이며 측정 범위는 $6.0 \times 2.0 \times 0.3 \text{ cm}^3$ 이다. FDR 센서는 반복적인 파장을 생성하여 토양수분 함량에 따라 변화하는 주파수 변화를 탐지하도록 설계되어 매질체인 토양의 용적수분 함량을 측정하는 장비이다 (Hur et al., 2009).

3. 토양수분 재분배 모델 검정 및 평가 방법

토양수분 재분배 모델의 적용가능성을 평가하기 위하여 토조 실험결과를 바탕으로 모의결과를 검정하였다. 검정에는 결정계수 (R^2 : coefficient of determination), 평균제곱오차 (RMSE: Root Mean Square Error), 상대평균절대오차 (RMAE: Relative Mean Absolute Error), Nash-Sutcliffe 모형효율지수 (EI: Efficiency Index)를 적용하였다. R^2 는 0.0~1.0 사이의 값을 가지며 1.0에

가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영함을 의미한다. RMSE와 RMAE는 오차의 정도를 나타내며 작은 값을 가질수록 실측치와 모의치의 오차가 적음을 나타낸다. 모형의 효율을 평가하기위한 EI는 실측치와 모의치의 관계가 1:1 직선에 근접한 정도를 나타내며 EI의 산정결과가 0.0~1.0 사이에 있으면 모의치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 0보다 작은 경우 모형의 결과가 부정확하거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미한다 (Nash and Sutcliffe, 1970).

토양수분 재분배 평가 방법에는 근근역의 토양수분 재분배 균일성을 활용하였으며 토양수분 재분배 균일성을 판별하기 위하여 Christiansen Uniformity Coefficient (CUC)를 적용하였다. Christiansen (1942)은 스프링클러 관개에서 관개균일성을 판별하기 위하여 최초로 CUC를 적용하였으며 이후 Wu and Gitlin (1983)과 Kang et al. (1999)이 관개지역에서의 토양수분의 균일성을 판별하기 위하여 CUC를 적용하였다 (Elmaloglou and Diamantopoulos, 2010). CUC는 식 (8)과 같다.

$$\text{if, } \theta_{i,j,k} \in \text{Rootzone,} \quad (8)$$

$$\text{CUC} = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^I \left\{ \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^n |\theta_{i,j,k} - \theta_{\text{avg}}| \right) \right\}}{N \theta_{\text{avg}}} \right]$$

여기서, θ_{avg} 는 근근역의 평균 토양수분이며, N은 근근역에 포함된 격자의 수이다. CUC는 100에 가까울수록 적용영역에서의 토양수분이 균일하게 분포함을 의미한다.

Fig. 4 Simulation results of four hour irrigation in sandy loam soil

III. 결과 및 고찰

1. 토양수분 재분배 모의 결과

4 시간 관개 후 토양수분 재분배 모의 결과는 sandy loam과 loam에 대하여 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 토양수분의 거동은 포화 수리전도도가 높은 sandy loam이 loam에 비해 빠르게 나타났다. 상부토층의 포화로 인한 흐름발생을 고려하기 위하여 토양수분 재분배 모델에서 상부토층의 격자가 포화되면 초과수분량을 수평방향의 인접 격자로 분배시키도록 구성하였다. loam 토

양조건에서는 토양의 낮은 수리전도도로 인하여 관개 중 수평방향으로의 수분이동이 중력방향으로의 수분이동보다 빠른 양상을 보였으며 48 시간 후에도 50 cm 이하의 논 토층에는 토양수분의 변화가 없는 것으로 나타났다.

2. 토조 실험 결과

토양수분 재분배 모델의 검정을 위한 4 시간 관개 이후 토조의 토양수분 분포는 Fig. 6와 같다. 관개 중에는 토양의 낮은 수리전도도로 인하여 상부토층이 포화되어 흐름이 발생하였다. 따

Fig. 5 Simulation results of four hour irrigation in loam soil

라서 수평방향의 수분이동이 중력방향의 수분이동보다 빠른 것으로 측정되었으며 관개 후에는 중력방향의 수분이동이 수평방향의 수분이동보다 빠른 결과를 얻었다. 또한 토양의 낮은 수리전도도로 인하여 관개 시작 후 48 시간이 지나도 50 cm 이하의 논 토양에는 영향이 없는 것으로 확인되었다.

3. 모델 검정 결과

토양수분 재분배 평가모델의 검정을 위하여 sandy loam 과 loam의 토양특성계수를 적용한 모의결과와 실험결과를 비교하

였으며, R^2 와 RMSE, RMAE, EI를 각 측정 깊이에 대하여 산정하였다 (Table 2). 산정 결과 RMSE는 모두 센서의 오차인 3 % 이하로 나타났다. 토양수분변화가 적은 -35 cm 토층과 -50 cm 토층에서 R^2 와 EI가 낮게 산정된 이유는 모의값과 실측값의 변화 경향이 없기 때문에 R^2 와 EI가 실측값의 기기오차에 영향을 받은 것으로 판단된다. 따라서 토양수분의 유의미한 변화가 있는 9 개 지점에 대하여 R^2 와 EI를 산정한 결과 loam의 토양특성계수를 적용한 모델은 R^2 와 EI가 0.84, 0.77, sandy loam의 토양특성계수를 적용한 모델은 R^2 와 EI가 0.57, 0.49로 나타났다.

Fig. 6 Observation results of four hour irrigation

Table 2 Validation results of the model for soil hydraulic parameters

Soil texture	Sandy loam				Loam			
	RMSE	RMAE	R ²	EI	RMSE	RMAE	R ²	EI
Section	%	%			%	%		
- 5 cm	1.87	6.56	0.73	0.70	2.06	6.29	0.84	0.64
- 20 cm	2.30	7.74	0.44	0.36	1.11	3.64	0.85	0.85
- 35 cm	1.30	4.25	0.33	-0.59	1.39	4.79	0.68	-0.81
- 50 cm	0.80	3.20	0.21	-6.13	0.28	1.20	0.17	0.15
9 points	2.00	6.43	0.57	0.49	1.36	3.60	0.84	0.77

4. 관개기준 적용

시설재배지 점적관개기준을 평가하기 위하여 국내에 상용되는 점적테이프의 유량 및 간격을 고려하여 시간에 따른 토양에서의 토양수분 균일성지수의 변화를 모의하였다. 관개량은 작물생육에 적합한 토양수분상태인 30 kPa~40 kPa을 기준으로 결정하였으며 평가에 적용된 점적관개기준은 Table 3과 같다.

관개기준 적용 결과 sandy loam과 loam토양에서의 CUC의 변화는 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 관개시작 후 상부 토양의 토양수분

상승으로 인하여 CUC가 급격히 감소하며 관개 종료 후 재분배를 통해 서서히 증가한다. 토양수분 재분배는 포화수리전도도가 높은 sandy loam에서 더욱 빠르게 진행될 것으로 예상하였으나 포화수리전도도가 낮은 loam토양에서 빠르게 진행되었다. 이는 토양의 수리적 특성에 기인한 것으로서 토성에 따라 토양수분 장력과 토양수분 함량관계가 상이하기 때문이다. 포화수리전도도는 sandy loam이 38.2 cm/day, loam이 12 cm/day이지만 40 kPa 기준으로 불포화수리전도도는 sandy loam이 0.0020 cm/day, loam이 0.0089 cm/day이다.

Sandy loam과 loam 토양에 대하여 상이한 관개 조건을 적용한 결과 장기적으로는 CUC변화 양상이 다르지 않았다. 단기적

으로는 간격이 좁은 점적기를 사용한 Case #1이 토양수분균일성이 안정적으로 나타날 것으로 예상되었으나 적은 유량과 작물 식재간격에 맞는 점적기를 사용한 Case #3이 가장 안정적인 토양수분 재분배 결과를 나타냈다. 따라서 과다설계와 과다관개를

Table 3 Case of irrigation standard

Irrigation standard	Case #1	Case #2	Case #3	Case #4	Case #5	Case #6
Discharge rate (l/hr)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0
Emitter spacing (cm)	10	20	30	10	20	30
Irrigation time (minute)	Sandy loam	14	28	42	7	14
	Loam	18	36	54	9	18

(a) CUC in the range of 24 hour

(b) CUC in the range of 2 hour

Fig. 7 CUC variation in sandy loam soil

(a) CUC in the range of 24 hour

(b) CUC in the range of 2 hour

Fig. 8 CUC variation in loam soil

지양하기 위해서는 식재간격에 맞는 점적기를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 시설재배지 점적관개기준을 평가하기 위하여 다양한 관개조건에 대하여 토양수분 재분배 균일성을 판별하였다. 토양 내에서의 수분거동을 모의할 수 있는 프로그램을 구성하기 위하여 3 차원 직교좌표계로 나타낸 Richards equation을 explicit finite difference scheme으로 해석하였으며 모의프로그램의 계수는 체가름실험을 통한 토성분류와 기 구축된 토성별 수리적 특성 계수를 이용하여 모델에 적용하였다. 토조실험을 수행하여 관개에 의한 토양수분 상태의 변화를 실측하였으며 실측값과 모의값을 비교함으로써 모형을 검증하였다. 토양수분 재분배평가에는 CUC를 적용하였으며 국내 상용되는 점적관개자재의 특성을 고려하여 다양한 관개조건에 대한 CUC 변화를 모의하였다.

1. 실험에 사용된 토양은 체가름실험 결과 sand, silt, clay 성분은 각각 평균 52.6 %, 34.0 %, 12.8 %로서 sandy loam과 loam으로 분류되었으며 초기토양수분 함량은 21 %로 나타났다. 관개시간은 4 시간 관개로 가정하였으며 이때의 유량은 2.25 ℓ/hr이다. 모의 결과 sandy loam의 경우가 loam에 비하여 재분배가 빠르게 진행되는 것으로 나타났으며, loam은 낮은 수리전도도로 인하여 상부격자가 포화되어 관개 초기에 중력방향의 수분이동에 비해 수평방향의 수분이동이 빠른 것으로 나타났다.

2. 모의결과와 실측값을 비교하여 수분변화가 일어난 9 개 지점에 대하여 RMSE, RMAE, R^2 , EI를 산정하였으며 sandy loam에서는 각각 2.00 %, 0.06, 0.57, 0.49, loam에서는 각각 1.36 %, 0.04, 0.84, 0.77로 산정되어 모의결과가 실측값에 근접한 것으로 판단된다.

3. 관개기준을 가정하여 CUC를 모의한 결과 상이한 관개조건 하에서 CUC의 변화는 장기적으로 큰 차이를 보이지 않았으며 토양수분 재분배는 sandy loam 보다 loam 토양에서 빠른 것으로 나타났다. 이는 토양수분 장력 40 kPa 기준으로 불포화 수리전도도가 loam이 sandy loam에 비하여 높기 때문인 것으로 판단된다. 단기적으로는 낮은 유량으로 장시간 관개하고 작물 식재간격과 점적기 간격이 동일한 점적테이프를 사용한 Case #3이 가장 안정적인 토양수분 재분배 결과를 반영하였다.

본 연구에서 산정한 토양수분 균일성 변화는 시설재배지 관개시스템 설계시 의사결정을 위한 자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단되며 과다설계와 부적절한 관개자재의 사용 및 운영 여부를 평가하는데 적용될 수 있을 것이다. 하지만 본 연구는 증발과 뿌리흡수를 고려하지 않아 장기적인 평가에는 한계가 있으

로 향후 상부토층에서의 증발과 작물의 뿌리흡수를 고려한 장기 관개에 따른 토양수분 상태에 관한 평가가 진행될 수 있을 것이다.

본 연구는 농촌진흥청의 “IT를 이용한 시설재배지 관개시스템 개발 연구” 연구비 지원으로 국립농업과학원과 공동으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다 (Project No. PJ 007401042011).

REFERENCES

- Christiansen, J. E., 1942. Hydraulics of Sprinkling Systems for Irrigation. *Transaction of the American Society of Agriculture Engineering* 107: 221-239.
- Celia, M. A., E. T. Bouloutas, and R. L. Zarba, 1990. A General Mass Conservative Numerical Solution for Unsaturated Flow Equation. *Water Resource Research* 26: 1483-1496.
- Cho, C. Y., J. S. Park, and T. S. Kwack, 2000. Study on the Israeli Agricultural Technology to Convert the Desert Lands into Prosperous Green Lands. *Korean Society of International Agriculture* 12(3): 217-225 (in Korean).
- Elmaloglou, S. and E. Diamantopoulos, 2010. Soil Water Dynamics under Surface Trickle Irrigation as Affected by Soil Hydraulic Properties, Discharge Rate, Dripper Spacing and Irrigation Duration. *Irrigation and Drainage* 59: 254-263.
- Hong, E. M., J. Y. Choi, W. H. Nam, and S. H. Yoo, 2011. Analysis of Soil Moisture Recession Characteristics in Conifer Forest. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 1-9 (in Korean).
- Hur, S. O., S. K. Ha, and J. G. Kim, 2009. Verification of TDR and FDR Sensor for Volumetric Soil Water Content Measurement in Sandy Loam Soil. *Korean Journal of Soil Science* 42(2): 110-116 (in Korean).
- Kang, N. J., W. C. Myeong, K. K. Joon, C. R. Han, and H. C. Young, 2006. Effect of Deficit Irrigation of the Total Soluble Solids and Fruit Yield of Fresh Tomato. *Journal of Bio-Environment Control* 15(4): 335-339 (in Korean).
- Kim, H. J., D. W. Son, S. O. Hur, M. Y. Roh, K. Y. Jung, J. M. Park, J. Y. Rhee, and D. H. Lee, 2009.

- Comparison of Wetting and Drying Characteristics in Differently Textured Soils under Drip Irrigation. *Journal of Bio-Environment Control* 18(4): 309-315 (in Korean).
9. Kim, L. Y., H. J. Cho, B. K. Hyun, and W. P. Park, 2001. Effects of Physical Improvement Practices at Plastic Film House Soil. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 34(2): 92-97 (in Korean).
 10. Lee, D. H., K. S. Lee, and Y. C. Chang, 2008. Development of an Automatic Water Control System for Greenhouse Soil Water Content Management. *Journal of Biosystems Engineering* 33(2): 115-123 (in Korean).
 11. Lee, N. H., 1999. Performance and Hydraulic Characteristics of Drip Emitters. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 41(3): 33-40 (in Korean).
 12. Lee, N. H., H. C. Hwang, S. W. Nam, S. G. Hong, and W. J. Jeon, 1998. A Study on the Utilization of Irrigation Water for Greenhouse Farming. *Korean Society of Rural Planning* 4(2): 96-102. (in Korean)
 13. Mualem, Y., 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resource Research* 12: 513-522.
 14. Nash, J. E. and, J. V. Sutcliffe, 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I-A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
 15. Nam, S. W. and Y. S. Kim, 2007. Discharge Variation of Perforated Hoses and Drip Irrigation Systems for Protected Cultivation. *Journal of Bio-Environment Control* 16(4): 297-302 (in Korean).
 16. Postel, S. L., 2000. Entering an Era of Water Scarcity: the Challenge Ahead. *Ecological Society of America* 10: 941-948.
 17. Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*. 1: 318-333.
 18. Ro, H. M., J. P. Kwon, S. H. Kim, and S. H. Ryu, 2000. Research on Effect of Drip Irrigation to Three-Dimensional Soil Moisture Distribution Considering Crop Uptake. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 43(2): 116-123 (in Korean).
 19. Ro, H. M. and S. H. Kim, 1997. 2-Dimensional Moisture Migration Modeling in Drip-Irrigated Root Zone. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 30(4): 314-327 (in Korean).
 20. Sadegh, Z. K., 2011. A Mass-conservative Switching Algorithm for Modeling Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media. *Journal of computational physics* 230: 664-679.
 21. Schaap M. G., F. J. Leij, and M. T. van Genuchten, 2001. Rosetta: a Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology* 251: 163-176.
 22. van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *American Journal of Soil Science Society* 44: 892-898.
 23. Wu, I. P. and H. M. Gitlin, 1983. Drip Irrigation Application Efficiency and Schedules. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 26: 92-99.