

HYDRUS를 이용한 작물재배용 암면배지에서의 수분 이동 시뮬레이션

Simulation of Water Movement in Rockwool Slab as Soil-less Cultivation Using HYDRUS

김동현¹, 김종순^{2*}, 권순홍², 박종민², 최원식²

Dong-Hyun Kim¹, Jong-Soon Kim^{2*}, Soon-Hong Kwon², Jong-Min Park², Won-Sik Choi²

〈Abstract〉

It is important to determine water movement at the growing substrate used in soil-less cultivation for better management of water supply. Numerical simulation is a fast and versatile approach to evaluate highly accurate water distribution. The objective of this study is to simulate the water movement in rockwool as a soil-less medium using HYDRUS-2D. HYDRUS-2D was used to simulate the spatial and temporal water movement in two types of rockwool slabs (Floriculture (FL), high density; Expert (EP), low density). The simulation was performed at two pulse conditions: 10 min ON and 50 min OFF (case A), 20 min ON and 40 min OFF (case B). The total irrigation amounts were the same at both cases. In case A, during the irrigation ON, the water contents at FL increased 1.93-fold faster than the values at EP. Whereas, during the irrigation OFF, the decreasing rate of water contents at FL was almost the same as one at EP. At case B, these values were not changed much from case A. However, the duration of optimum water content (50% - 80%) was 15.0 min and 23.5 min at case A and case B, respectively. Thus, FL and 20 min ON and 40 min OFF (case B) could supply water to rockwool much faster and longer than EP. Once qualitatively validated, this simulation of water movement in rockwool could be used to design an effective optimum irrigation method for vegetables.

Keywords : *Rockwool, Irrigation Simulation, HYDRUS, Water Movement*

1 국립농업과학원 농업환경부 토양비료과

1 Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences

2 부산대학교 바이오산업기계공학과

2 Dept. of Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National University

2* 정회원, 교신저자, 부산대학교, 바이오산업기계공학과, 교수 2* Corresponding Author, Professor, Dept. of Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National University
E-mail: jongsoon-kim@pusan.ac.kr

1. 서론

시설재배란 유리 온실이나 비닐하우스 같은 시설에서 채소, 과수등을 재배하는 농사 기술이며, 노지에서 재배가 불가능한 시기에도 재배가 가능하여 연중 신선 농산물의 공급이 가능하다. 우리나라의 시설재배 면적은 점점 증가하고 있는 추세이며, 인공배지와 양액 공급 시스템에 대한 지속적인 개발로 국내 시설농업에서 수경재배가 차지하고 있는 비중도 점점 증가하고 있다. 현재 우리나라의 시설 원예 재배 면적은 57,380ha이며 이 중 양액재배 면적은 전체의 10% (5,634ha)를 차지하고 있다[1].

고형배지에 양액을 공급하며 작물을 재배하는 수경재배에서는 고형배지의 수분함량이 작물의 뿌리, 생육 뿐만 아니라 과실의 수량과 품질에 큰 영향을 미친다[2]. 배지의 수분함수율이 높으면 뿌리가 발달하지 못하고, 함수율이 낮으면 배지가 마르기 때문에 뿌리가 발달하지 못한다. 따라서 관수를 통한 배지의 적절한 수분함수를 유지는 근권환경의 안정화를 통한 고품질 과실의 수량확보에 중요하다[3].

농가에서 수경재배 시 주로 유기배지인 코이어와 무기배지인 암면이 사용된다. 이 중에서 암면은 공극이 약 95% 정도로 용존산소량이 풍부하고, 배지 내 수분 확산성도 뛰어나다. 또한, 수분 조절이 가능하여 정밀관수를 통한 제어가 가능하다[4]. 무기배지인 암면은 유기배지인 코이어에 비해 폐암면 처리가 어려운 단점이 있지만[5], 재사용이 가능하다[6]. 국내에서는 파프리카, 멜론, 토마토 재배에 암면이 주로 사용되고 있다[7][8].

배지에서 작물을 재배 할 때, 재배환경, 양액, 관수의 관리가 작물의 생육 및 과실의 품질에 영향을 미친다. 배지의 수분함량 조절은 적산 일사량법, 중량을 이용하여 증산량을 측정하는 방법,

배지의 수분장력법, TDR센서를 이용하는 방법 등이 있다[9][10][11][12]. TDR센서를 이용하여 배지의 수분함량, 수분분포를 측정하여 관수를 하는 방법이 비교적 정확하지만, 배지 내의 전체적인 수분의 흐름을 알기는 어렵다.

노지 작물의 토양 환경에서 수분 이동에 대하여 실험적인 방법[13] 뿐만 아니라 수학적인 모형들도 널리 사용되어 왔다. SWAP 모델은 토양 수리학적 매개변수와 기상자료를 이용하여 다양한 조건에서의 토양수분을 산정할 수 있는 모형이다[14]. APEX 모델은 농장 및 소유역 규모의 농업지역에서 농업 활동이 토양 및 물 환경에 미치는 영향을 평가하는 모델로 토양, 기상, 재배관리 등의 입력자료로 수문, 양분인자, 작물생육 등을 모의할 수 있다[15]. Noah-LSM 모델은 WRF(Weather Research and Forecasting model) 같은 모형과 결합된 방식으로 구동될 수 있으며, 4개의 토양층을 초기조건으로 설정하여 에너지 선속(Energy Flux)과 물 선속(Water Flux) 등의 수문기상인자들을 모의할 수 있다[16]. HYDRUS[17]는 토양에서 수분 이동을 구현하는 대표적인 프로그램의 하나로 고랑 관개[18], 스프링클러 관개[19], 점적 관개[20][21][22], 배수[23], 용질 이동[24]등에 적용되었다. 또한, 1차원 뿐만 아니라 2,3차원에서의 시뮬레이션 영역을 자유롭게 설정하여 시뮬레이션할 수 있다. 하지만 HYDRUS 프로그램이 시설 재배에서 많이 사용되고 있는 암면의 수분 분포 시뮬레이션에 적용된 경우는 전무하다. 시설 재배에서 암면의 수분 분포는 단순한 1차원적인 흐름이 아니기 때문에 HYDRUS를 이용하여 모의하였다.

따라서, 본 연구에서는 암면에서의 정밀 관수를 위해 암면 배지의 종류와 관수방법에 따른 배지에서의 수분 흐름을 분석하기 위해, 관수 시 배지 내부의 수분을 시뮬레이션하였다. 배지에서의 수분 흐름을 알고 이를 수경재배의 적정 관수기술의

개발에 이용한다면, 수경재배 작물의 생산성 향상 및 고품질화에 도움이 될 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 HYDRUS-2D 프로그램

암면에서 물의 움직임을 시뮬레이션하기 위하여 HYDRUS-2D 프로그램[23]을 사용하였다. HYDRUS-2D는 다공성 매질에서 물, 열 및 용질의 움직임을 시뮬레이션 할 수 있다. 다공성 매질에서의 물 흐름은 토양 수리학적 매개변수를 사용하여 수치적으로 분석되며 Richards 방정식을 사용하여 시뮬레이션되었다[24].

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h)$$

여기서 θ 는 체적 수분 함량(cm^3/cm^3), h 는 토양의 압력 수두(cm), $K(h)$ 는 수리 전도도(cm/min), z 는 토양의 깊이(cm), t 는 시간(min), S 는 뿌리가 흡수하는 물의 양(cm/min)이다. Richards 방정식은 불포화 수리 전도도, 압력 수두 및 토양 수분 함량을 주 매개변수로 이용하는 비선형 방정식이다. 토양 수분 보유 곡선 $\theta(h)$ 와 불포화 수리 전도도 $K(h)$ 는 van Genuchten- Mualem 모델을 사용하여 설명되었다[25].

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}$$

$$K(h) = K_s Se^l [1 - (1 - Se^{l/m})^m]^2$$

여기서 θ_r 및 θ_s 는 각각 잔류 수분 및 포화 수분 함량(cm^3/cm^3)이다. α ($1/\text{cm}$), $n(-)$ 및 $m(-)$ 은

경험적 매개변수이다. K_s 는 포화 수리 전도도(cm/min), l 은 기공 연결 매개변수이다. 유효 포화 S_e 는 다음 식으로 표현된다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Richards 방정식은 비선형 편미분 방정식이고, $K(h)$ 의 계수는 종속 변수 θ 의 함수이다. Richards 방정식은 비선형적이기 때문에 대부분의 실제 적용에는 수치해석적인 방법이 사용된다.

2.2 시뮬레이션 조건과 변수

본 연구에서는 원예 작물의 수경 재배에 널리 사용되고 있는 Grodan 회사의 두 암면(Floriculture(FL)와 Expert(EP))을 대상으로 하였다. 암면의 밀도는 $40 \text{ kg}/\text{m}^3$ 과 $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ 사이에서 측정되며, FL은 밀도가 $67.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 이고 EP는 밀도가 $46.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 이다[28]. 또한 두 암면의 공극률은 각각 96.9%(FL)와 97.6%(EP)로 모세관 현상에 의해 유체가 주로 이동한다. 한편 암면은 섬유(fiber)의 방향에 따라 특성이 다른 이방성(anisotropic) 성질을 띠고 있다. FL의 경우는 섬유의 방향이 슬래브와 평행하고 EP는 섬유의 방향이 슬래브와 수직하다.

시뮬레이션에 필요한 수리학적 매개변수는 HYDRUS에서 제공하는 ROSETTA 매개변수 추정 프로그램에 의해 추정할 수 있지만, 암면의 경우 토양이 아니기 때문에 입력값인 기본 토양자료가 없다. HYDRUS는 토양에서의 수분이동을 시뮬레이션하는 모델이므로 배지의 섬유 방향을 직접적으로 적용시키지는 않는다. 그러나 섬유 방향이 다름에 따라 밀도, 공극률 등의 물리적인 특성이 달라지게 되고, 그 특성에 따른 암면의 수리학적 매개변수는 Bougoul 등의 실험[28]에 의해 구해

진 압면의 매개변수를 이용하였다(Table 1). 실험에 의해 구해진 압면의 특성은 섬유의 방향에 따라 차이가 있지만, 포화 수분함량이 매우 높았고, 수리 전도도가 높은 것으로 나타났다. 수리 전도도가 높기때문에, 압면의 수분함량이 낮으면 작물에 충분한 물 공급을 하지 못한다. 이러한 점을 방지하기 위해서는 압면의 수분 함량을 다소 높은 수준으로 유지하여야 한다.

시뮬레이션 영역은 농가에서 주로 사용하는 가로 100cm, 높이 7.5cm의 압면 슬래브 위에 가로 10cm, 높이 6.5cm의 압면 큐브가 4개 올려진 상태로 구현되었다. 각각의 압면 큐브에서는 지름 2cm의 점적관을 이용하여 점적관수를 시행하며, 압면 슬래브 가운데 수직배수를 위해 10cm의 배수구를 설치하였다. 시뮬레이션 도메인은 좌우 대칭이기 때문에 왼쪽 절반을 Fig. 1에 나타내었다. 압면 슬래브와 압면 큐브의 경계조건은 물의 이동이 없는 제로 유량(no flux)조건으로 하였으며, 압면 큐브의 윗면만 대기 선속(atmospheric flux)조건으로 하여 증발산을 고려하였다. 대기 유량 조건은 HYDURS에서 기본값으로 적용되는 대기조건을 입력하여 두 압면에서 동일한 증발량을 고려하였으며, 작물의 증산은 고휘 배지에서 많이

재배되는 토마토의 증산을 고려하였다.

두 압면 모두 슬래브 전체에서의 초기 수분 함량은 동일한 값(0.5 m³/m³)으로 가정하였다. 압면을 수경 재배에 이용할 경우 적정 수분 함량은 50-80%이다[29]. 또한 압면은 초기에 물을 흡수시켜 적정 수분 함량에 도달한 이후 작물 재배에 이용된다.

압면의 경우 수리 전도도가 일반 토양보다 매우 크기 때문에, 낮은 점적 유량 속도에서도 쉽게 포화 상태에 도달하게 된다. 따라서, 작물의 물 이용 효율을 증가시키기 위하여 펄스(pulse) 관개를 적용하였다. 즉 10분간 관수를 하고 50분간 관수를 멈추는 과정을 5시간(300분) 동안 반복하였다. 또한 동일한 시간 동안 관수 시간을 20분으로 하고 관수 멈춤시간을 40분으로 하여 토양 수분 분포를 비교하였다. 관수 시간이 10분인 경우는 관수 유량 속도를 3.2 cm/min으로 하고 20분인 경우는 관수 유량 속도를 1.6 cm/min으로 하여 두 조건에서 모두 최종 관수량이 동일하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 펄스 조건(10분 관수, 50분 정지)에서 수분 이동

Fig. 2는 관수가 진행됨에 따라 Floriculture (FL) 압면에서 2분부터 10분까지 2분 간격으로 수분 분포를 보여주고 있다. 압면 슬래브에서 수분 분포가 좌우 대칭을 이루고 있어 좌측면 만으로도 수분 이동 현상의 설명이 가능하다.

그림에서 보는 바와 같이 압면에서의 수분 이동이 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 배수구에서 멀리 떨어진 좌측 압면 큐브에서 관수 시간이 2분 경과되었을 때, 압면 슬래브의 3.2cm 높이까

Table 1. Physical properties of two rockwool slabs

Type	θ_r	θ_s	α	n	K_s
FL	0.026	0.975	15.917	3.061	0.002
Expert	0.019	0.983	39.212	2.181	0.006

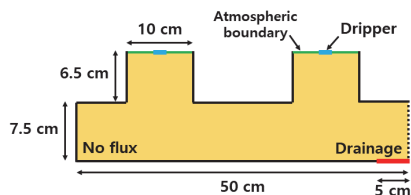


Fig. 1 Boundary conditions and geometry of the rockwool slabs

지 수분 함량이 70% 이상을 보이고 있다. 시간이 경과함에 따라 이 높이는 상승하여 10분이 경과한 후 암면 큐브의 상부면(14.0cm)까지 수분 함

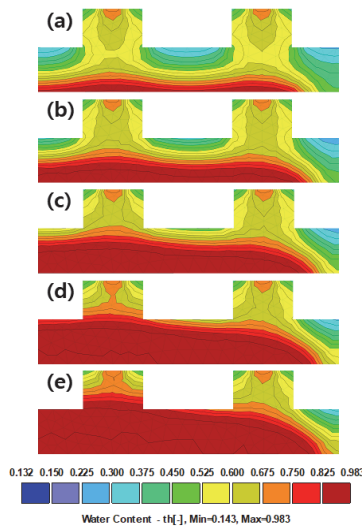


Fig. 2 Distribution of water content in Floriculture (FL) at (a) 2 min, (b) 4 min, (c) 6 min, (d) 8 min, and (e) 10 min

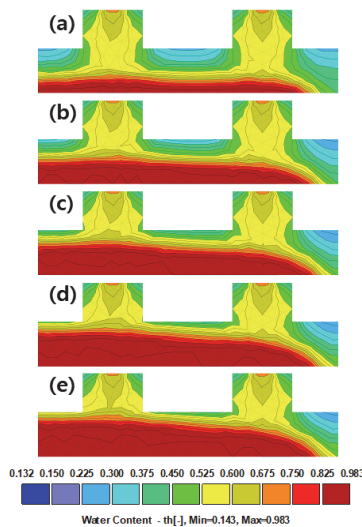


Fig. 3 Distribution of water content in Expert (EP) at (a) 2 min, (b) 4 min, (c) 6 min, (d) 8 min, and (e) 10 min

량이 70% 이상을 보이고 있다. 배수구에서 가까운 우측 암면 큐브에서도 시간에 따라 수분 함량이 증가하고 있으나, 10분이 경과하여도 수분 함량이 70% 이상이 되는 높이는 7.5cm에 불과하다. 이는 배수구가 가까이 위치하여 배수가 활발히 진행되기 때문이다. 10분 동안 좌측 암면 큐브에서의 평균 수분 함량이 우측보다 5.58% 높게 나타나고 있어, 전체적으로 배수구의 위치가 암면의 수분 분포에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 Expert (EP) 암면에서의 수분 이동을 보여주고 있다. FL에서와 마찬가지로 시간이 경과함에 따라 수분 함량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 EP 암면에서의 수분 상승은 FL보다 느린 것을 알 수 있다. 실제 10분 후 EP의 수분 함량은 FL보다 12.6% 낮게 나타났다. 이는 EP 암면에서의 수리 전도도가 FL보다 3배나 커서 수분의 이동이 빠른 것에 기인한다. 이러한 결과는 Bougoul[30]의 연구에서도 나타나고 있다.

Fig. 4는 FL 암면을 대상으로 관수를 멈춘 상

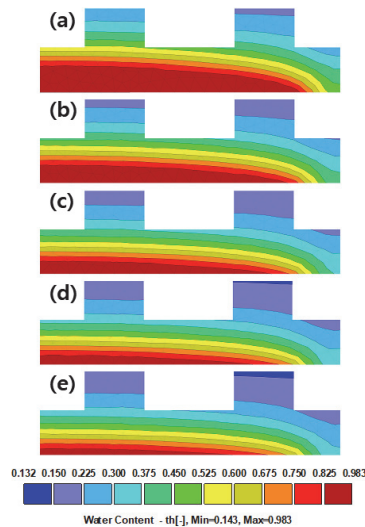


Fig. 4 Distribution of water content in Floriculture (FL) at (a) 20 min, (b) 30 min, (c) 40 min, (d) 50 min, and (e) 60 min

태에서 10분 간격으로 50분 동안의 수분 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 압면 내부의 수분은 시간에 따라 중력에 의해 아래로 이동하고 우측 하부에 위치한 배수구를 통하여 배출되고 있다. 관수 중단 기간 동안 작물이 심겨진 압면 큐브에서의 수분 함량은 23.3%로 적정 수분 함량(50-80%)보다 훨씬 낮은 것을 알 수 있다. 특히 60분 경과 후 좌·우측 큐브에서의 수분 함량은 각각 20.7%와 17.7%로 나타났다. 따라서 뿌리가 크게 성장하지 않은 어린 작물일 경우 관수 중단 시간을 줄여서 근권부에 충분한 수분이 공급될 수 있도록 해야 한다.

Fig. 5는 EP 압면에서 관수를 멈춘 후 20분부터 60분까지의 수분 분포를 보여주고 있다. FL 압면의 경우와 마찬가지로 시간에 따라 수분이 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 수분의 감소가 빠르게 진행되어 60분 경과 후 좌·우측 압면 큐브에서의 수분 함량은 각각 18.2%와 17.3%로 나타났다. EP 압면의 경우는 수분 이동 속도가 매우

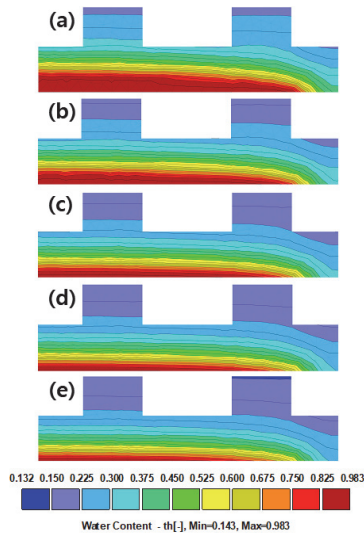


Fig. 5 Distribution of water content in Expert(EP) at (a) 20 min, (b) 30 min, (c) 40 min, (d) 50 min, and (e) 60 min

빨라서 FL 압면보다 관수 시간은 더 늘리고 관수 시간은 줄여야 작물에 효과적인 수분 공급이 가능할 것이다.

한 시간 경과 후 펄스 조건(10분 관수, 50분 정지에 따라 관수가 반복되었으나 수분 분포는 거의 동일하게 나타났다. 이는 압면의 수리 전도도가 커서 초기 조건이 수분 이동에 큰 영향을 주지 못하는 것에 기인한다.

3.2 펄스 조건(20분 관수, 40분 정지)에서 수분 이동

Fig. 6은 20분간 관수가 진행될 때, FL 압면에서의 수분 분포를 2분 간격으로 10분간 보여주고 있다. 배수구에서 먼 좌측 압면 큐브에서 관수 시간이 2분 경과 후, 약 2cm 높이까지 수분 함량이 70% 이상을 보이고 있었으며, 관수가 진행됨에 따라 이 높이는 10분 후 5.6cm, 20분 후 8cm까지 상승하는 모습을 보였다. 이는 10분간 관수를 하

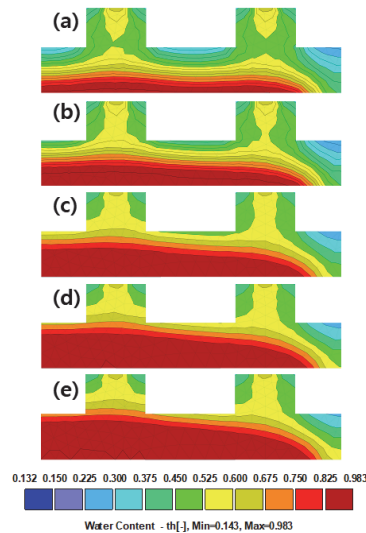


Fig. 6 Distribution of water content in Floriculture (FL) at (a) 4 min, (b) 8 min, (c) 12 min, (d) 16 min, and (e) 20 min

였을 때 10분 경과 후 암면 큐브의 상부면(14cm)이 수분 함량이 70%이상 높아진 모습과는 다른 경향이였다. 배수구에서 가까운 우측 암면 큐브에서는 10분 후 3.6cm, 20분 후 5.3cm까지 수분 함량이 70%로 높아지며, 이 또한 10분간 관수를 하였을 때의 7.5cm보다 낮은 모습을 보였다. 전체적으로 10분간 관수보다 수분 증가 속도가 낮게 나타나고 있다. 하지만 10분 관수의 경우는 20분에 이미 수분이 감소하여 수분 함량이 51.7%에 불과하지만 20분 관수의 경우는 70.4%이다. 따라서 20분 관수가 작물의 수분 공급에 더욱 효과적인 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 EP 암면에서의 수분 이동을 보여주고 있다. 수분 함량이 70%이상을 보이는 지점은 10분 후 4.2cm, 20분 후 5.0cm 높이였다. 이는 10분 관개 하였을 때와 동일하게 FL 암면보다 수분 상승이 느리게 나타났다. EP 암면의 수리 전도도가 크기 때문에 FL 암면보다 배수되는 속도가 빠른 것에 기인한다.

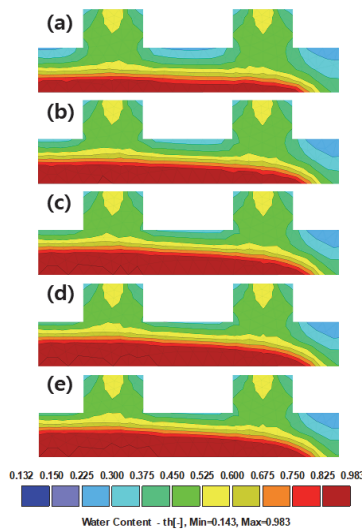


Fig. 7 Distribution of water content in Expert(EP) at (a) 4 min, (b) 8 min, (c) 12 min, (d) 16 min, and (e) 20 min

Fig. 8은 FL 암면에서 관수가 끝난 20분부터 10분 간격으로 40분 동안 암면의 수분이 배수되는 분포를 보여주고 있다. 위쪽의 암면 큐브에서부터 수분이 중력에 의해 아래로 내려와 배수구로 배출되고 있다. 관수가 중단 된 기간 동안 암면 큐브의 수분 함량은 24.3%로 적정 수분 함량보다는 낮게 나타났지만, 10분 관수 조건보다 높게 나타났다. 60분 경과 후 좌·우측 암면 큐브에서의 수분 함량은 각각 21.8%와 18.5%로 나타났다. 같은 양을 관개 하였지만, 적은양을 긴 시간 관개하였을 때가 조금 더 높은 수분 함량을 보였다.

Fig. 9는 EP 암면에서의 관수 후 20분부터 60분까지의 수분 분포를 보여주고 있다. 앞의 결과와 유사하게 FL 암면보다 수리 전도도가 크기 때문에 수분이 빠르게 감소되는 모습을 보였다. 60분 경과 후 좌·우측 암면 큐브에서의 수분함량은 각각 18.9%와 18.3%로 나타나며, 10분 관수 조건보다 높게 나타났다. 암면의 수리 전도도가 매우 크기 때문에, 짧은 시간동안 관수를 하기보다

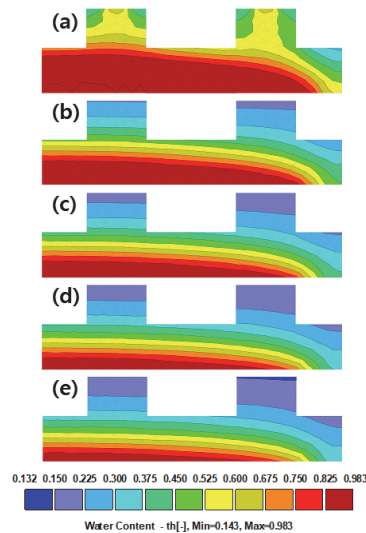


Fig. 8 Distribution of water content in Floriculture(FL) at (a) 20 min, (b) 30 min, (c) 40 min, (d) 50 min, and (e) 60 min

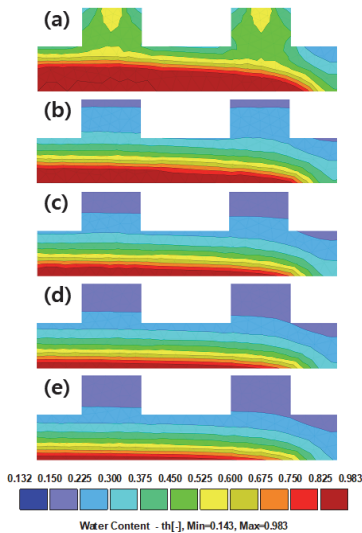


Fig. 9 Distribution of water content in Expert(EP) at (a) 20 min, (b) 30 min, (c) 40 min, (d) 50 min, and (e) 60 min

는 긴 시간동안 적은양을 지속적으로 관수 하는 방법이 작물의 적정 수분 함량을 유지하는데 유리한 방법으로 판단된다. 10분 관수의 경우와 마찬가지로 펄스 조건(20분 관수, 40분 정지)이 5시간 동안 반복되었으나, 거의 동일한 수분 분포가 주기적으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 두 가지 압면(Floriculture (FL), Expert(EP))을 대상으로 펄스 조건(10분 관수, 50분 정지; 20분 관수, 40분 정지)을 달리하여 배지 내부에서의 수분 분포를 시뮬레이션하였다. FL 압면의 경우 수분 증가 속도가 EP 보다 2배 정도 빠르고, 관수 시간이 20분인 펄스 조건에서 적정 수분함량(50-80%)을 보이는 구간이 관수 시간이 10분인 경우보다 1.6배 긴 것으로 나타났다. 따라서 밀도가 큰 FL 압면에서 20분 관수를 하고 40

분간 정지를 하는 펄스 조건이 작물의 생육에 효과적인 것으로 나타났다.

연구 결과 압면에서의 수분 이동 속도는 점유의 방향보다는 밀도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실제 노지 작물의 관수에서 증발산량은 중요한 요인이지만, 압면을 이용한 수경 재배에서는 압면의 수리 전도도가 매우 커서 증발산량의 영향은 매우 미미하다. 또한 압면 배지에서 배수구의 위치와 크기는 수분 이동에서 매우 중요하다. 관수 유량 속도와 배수구의 위치와 크기를 조절하면 최적의 관수 조건을 찾을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 압면 내에서 수분 분포를 2차원으로 구현하였고, 발표된 논문과 결과가 유사하였다. 하지만 시뮬레이션을 통하여 적합한 관수 방법을 제시하기 위해서는 실험을 통한 검증이 필요하다. 또한, 다양한 유량, 펄스 간격 조건 등을 설정하고, 작물의 상태, 기상 환경, 슬라브 경사 등을 고려한다면, 실제 재배환경에 더욱 가까운 시뮬레이션 결과를 도출 할 수 있을 것이다.

압면 배지를 이용한 수경 재배는 스마트팜에서 매우 중요한 요소이며, 정밀 관개에 의한 적정 수분함량의 유지는 작물의 생산성과 품질 향상에 크게 이바지할 것이다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). <https://data.mafra.go.kr/main.do>

- [2] Kim, S., Sim, S., Kim, Y., Comparison on irrigation management methods by integrated solar radiation and drainage level sensor in rockwool and coir bag culture for tomato, *Journal of Bio-Environment Control*, 19:1 p.12-18, (2010).
- [3] Moon, D., Kim, S., Cho, M., Yu, I., Ryu, H., Choi, K., Kwon, Y., Lee, S., Effect of plant growth and production of tomato on the water content control in rockwool culture, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 20:2 p.183-189, (2018).
- [4] Nelson, P. V., Fonteno, W. C., Physical analysis of rockwool slabs and effects of fiber orientation, irrigation frequency and propagation technique on chrysanthemum production, *Journal of Plant Nutrition*, 14: 8 p.853-866, (1991).
- [5] Benoit, F., Ceustermans, N., Horticultural aspects of ecological soilless growing methods. *Acta Hort*, 396 p.11-24, (1995).
- [6] Hanna, H. Y., Properly recycled perlite saves money, does not reduce greenhouse tomato yield, and can be reused for many years. *HortTechnology*, 15 p.342-345, (2005).
- [7] Urrestarazu, M., Mazuela, P. C., Martínez, G.A., Effect of substrate reutilization on yield and properties of melon and tomato crops. *J Plant Nurt*, 31 p.2031-2043, (2008).
- [8] An, C., Shin, J., Comparison of rockwool, reused rockwool and coir medium on tomato (*solanum lycopersicum*) growth, fruit quality and productivity in greenhouse soilless culture, *Journal of Bio-Environment Control*, 30:3 p.175-182, (2021).
- [9] De Graaf, R. Automation of the water supply of glasshouse crops by means of calculation the transpiration and measuring the amount of drainage water. In *Symposium on Biological Aspects of Energy Saving in Protected Cultivation*, 229 p.219-232, (1987).
- [10] Kim, H. J., Kim, Y. S., Evaluation of Irrigation System by Balance and Integrated Solar Radiation on Fruit Quality of Muskmelon in a Closed Perlite Culture System. *HORTICULTURE ENVIRONMENT and BIOTECHNOLOGY*, 45:3 p.127-130, (2004).
- [11] Sim, S. Y., Lee, S. Y., Lee, S. W., Seo, M. W., Lim, J. W., Kim, S. J., Kim, Y. S. (2006). Characteristics of root media moisture in various irrigation control methods for tomato perlite bag culture. *Journal of Bio-Environment Control*, 15:3 p.225-230, (2006).
- [12] Park, J., Tai, N., An, T., Son, J., Analysis of moisture characteristics in rockwool slabs using time domain reflectometry (TDR) sensors and their applications to paprika cultivation, *Journal of Bio-Environment Control*, 18:3 p.238-243, (2009).
- [13] Kim, J.H, Kim, T.W, Kim, S.H., Lee, H.G., Eum, D.H., Lee, S.H., A Study on the Application Design of Soil Moisture Diffusion and Crop Roots According to Subsurface Irrigation Method, *Journal of Biosystems Engineering*, 46 p.197-205, (2021).
- [14] Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Kroes, J.G., Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP, *Vadose Zone Journal*, 7, p.640-653. (2008).
- [15] Williams, J. R., and R. C. Izaurralde, The APEX model, In *Watershed models*, p.461-506, CRC Press, (2010).
- [16] Niu, G.Y., et al., The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. model description and evaluation with local-scale measurements, *Journal of Geophysical Research*, 114, doi:10.1029/2020JD015139. (2011).
- [17] Simunek, J. Senja, M., Sakai, M., van Genuchten, M. T., The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.17, HYDRUS software series 3. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside, Riverside, CA. (2013).
- [18] Brunetti, G., Simunek, J., Bautista, E., A hybrid finite volume-finite element model for the numerical analysis of furrow irrigation and

- fertigation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 150 p.312-327, (2018).
- [19] Kim, D.H., Kim, J.S., Kwon, S.H., Jung, K., Lee, S.H., Simulation of soil water movement in upland soils under sprinkler and spray hose irrigation using HYDRUS-1D, *Journal of Biosystems Engineering*, 47 p.448-457, (2022).
- [20] El-Nesr, M. N., Alazba, A. A., Simunek, J., HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils, *Irrigation Science*, 32 p.111-125, (2014).
- [21] Kwon, S.H., Kim, D.H., Kim, J.S., Jung, K.Y., Lee, S.H., Kwon, J.K., Soil water flow patterns due to distance of two emitters of surface drip irrigation for horticultural crops, *Horticultural Science and Technology*, 38:5 p.631-644, (2020).
- [22] Kim, D.H., Kim, J.S., Kwon, S.H., Park, J.M., Choi, W.S., Simulation of soil water movement in upland soils under pulse irrigation using HYDRUS-2D, *Journal of Biosystems Engineering*, 46 p.508-516, (2021).
- [23] Feng, G., Zhu, C., Wu, Q., Wang, C., Zhang, Z., Mwiya, R. M., Zhang, L., Evaluating the impacts of saline water irrigation on soil water-salt and summer maize yield in subsurface drainage condition using coupled HYDRUS and EPIC model, *Agricultural Water Management*, 258, (2021).
- [24] Liu, K., Huang, G., Xu, X., Xiong, Y., Hung, Q., Simunek, J., A coupled model for simulating water flow and solute transport in furrow irrigation, *Agricultural Water Management*, 213 p.792-802, (2019).
- [25] Šimunek, J., M. Th Van Genuchten, M. Šejna., The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Technical manual, version 1, (2006).
- [26] Richards, L. A., Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), p.318-333, (1931).
- [27] Van Genuchten, M. T., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), p.892-898, (1980).
- [28] Bougoul, S., Ruy, S., De Groot, F., & Boulard, T., Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 104(4), p.391-405, (2005).
- [29] RDA (Rural Development Administration). <http://www.nongsaro.go.kr>
- [30] Bougoul, S., Boulard, T., Water dynamics in two rockwool slab growing substrates of contrasting densities. *Scientia Horticulturae*, 107, p.399-404, (2006).