

펄라이트재배에서의 급액관리의 priority 설정

김 영 식*

Priority Determination in Nutrient Solution Management in Perlite Culture

Young Shik Kim*

요 약 급액관리에 관련된 단계를 4단계로 나누었으며, 각 단계별 수분 이동 저항을 규명하고, 단계 중에서 급액 상황에 따라 관련 인자의 priority를 설정함으로써 펄라이트 자루재배할 경우 율속인자 중심의 적정 급액관리 기준을 제안하였다. 특히, 급액관리의 가장 중요한 율속인자인 뿌리까지의 수분도달거리를 최소화함으로써 하여 필요한 수분을 공급하는 과정과 역사성을 부여한 뿌리발달 조장이 가장 중요한 것으로 판명되었다.

Abstract The steps related to the nutrient solution management were divided into 4 categories. The resistance for water movement in every steps was proposed. The priorities among the steps were set according to the cultural situation, which were used as the basis for the management in perlite bag culture. The enhancement of historical root development is especially critical, as well as how to supply essential water efficiently by minimizing the water movement distance to the root, which is the narrowest neck of a bottle in solution management.

Key Words : irrigation priority, nutrient solution management step, minimum law, bag culture

1. 서 론

식물의 양수분 흡수는 환경 및 식물의 영향을 받으며, 배지 내 동적 양수분 상태에 의해 좌우된다. 배지 내 양수분 상태를 양분 및 수분 상태로 구분할 때, 수분에는 배지 내 수분함량, 확산계수 및 공간분포 등이 관여한다. 이들 인자들은 배지 고유의 성질일 수도 있으며, 급액관리에 의해 제어될 수도 있다. 정적 인자인 그루당 차지하는 배지용적은 뿌리발달, 수분의 저장 및 양수분의 균일도 등에 영향을 크게 미치는 인자이다. 동적 인자인 급액관리는 정적 인자인 배지 의존성을 가지며, 관리자의 의도에 의해 조절될 수 있다. 특히, 고당도 토마토 생산을 위한 급액 제한은 양분상태와 더불어 중요한 생산기술이다[1].

식물의 수분 요구는 증산에 의해 발생된 수분장력에 서부터 출발한다[1] 증산에 의해 발생된 수분포텐셜의 감소를 원상 복귀시키기 위해서는 다음의 사항들이 동

시에 평형을 이루어야 한다. 체내 수분의 앞으로의 이동, 뿌리의 수분흡수, 배지 내에서의 수분의 확산, 배지 내 존재하는 수분함량 등, 증산속도에 버금가는 공급속도가 성립될 때 작물은 정상적인 생육이 가능하다. 배지 내 수분함량 이외에는 모든 단계에서 저항이 발생하며, 저항을 이겨내는 전도도의 크기에 많은 인자들이 관여한다. 배지 내 수분함량에는 급액량, 배지량, 배지의 물리적 특성과 더불어 용기재배의 경우 용기의 형태와 점적관의 위치 및 점적속도 등이 관여한다. 급액되는 배양액에 존재하는 양분은 각 영양분의 존재량, 존재형태 및 존재위치와 더불어 전농도(EC), pH와 양분간의 상호작용이 관여한다. 양분은 배지에 공급되면서 수분과는 다르게 배지와는 치환, 확산수로의 용해, 뿌리의 흡수 등의 단계가 부가된다. 특히 흡수에 필요한 배지 내 산소농도도 관여하므로, 배지 내 기상과 액상의 비율 및 가스종류간의 상호관계도 고려해야 한다.

이 모든 단계가 동일한 속도로 행해지기는 불가능하기 때문에 식물은 뿌리에 완충능력을 갖고 있으며, 지상부도 수분의 과부족에 대한 적응력을 가지고 있지만, 시설재배의 경우 고품질 고생산성을 위해 정확한 급액관리가 요구된다.

*상명대학교 식물산업공학과
Tel : 041-550-5292

대기순환계, 식물계, 배지생태계가 동시에 관여하는 수분수지에 관한 모든 단계를 고려한 금액관리는 사실상 불가능하므로, 모든 단계 중에서 율속단계(rate controlling step), 즉 priority가 높은 단계만을 우선적으로 향상시키는 단순화된 관계식을 설정하여 제어함으로써 금액관리 효율을 높이는 것(minimum law)이 바람직하다. 율속단계는 상황에 따라 변화되는데, 기존에 발표된 연구결과들은 율속인자에 대한 해결책을 제시하기 보다는 여러 관련 인자 중 몇 가지를 제어인자로 설정한 경향이 짝어, 그 효과에 재현성이 적었으며 적합한 금액관리 기준을 설정하기에 미흡했다. 따라서, 본 연구는 금액관리와 관련된 인자에 대한 연구결과들을 분석, 종합하여, 금액 상황에 따라 관련 인자의 priority를 설정함으로써 펠라이트 자루재배할 경우 율속인자 중심의 적정 금액관리 기준을 제안하기 위해 행해졌다.

2. 재료 및 방법

펠라이트 재배에 관한 연구결과를 수집, 분석하였다. 연구 결과가 없는 경우에는 실험을 통해서 보완했으며, 분석결과와 실험결과를 토대로 금액관리의 기준을 작성하였다.

펠라이트의 물리적 성질 및 수분장력 곡선은 시판되고 있는 배지를 수집하여 표준토양분석법[2]에 준하여 분석하였다. 실험에 사용한 펠라이트 자루는 길이 1.2 m, 원주 69 cm, 40l의 것이었으며, 1-6 mm의 입자를 사용하였다. 공시작물인 모모타로 T-93을 7엽 전개시 정식했으며, 재식거리는 20 cm×160 cm이었다. 배양액으로는 야마자키(山崎) 토마토 전용액을 사용하였다. 본 연구실에서 개발한 수경재배시스템을 이용하여 금액관리했으며, 자료분석을 행하였다. 분석 시 배지 내 수분과 EC는 배지를 포수시킨 후 배액이 멈춘 상태에서 식물 바로 밑에서부터 식물과 식물 사이까지 수평으로 3군데, 배지 맨 윗부분에서 아랫부분까지 3군데로 나누어 5 ml 이상을 채취하여 측정하였다. 수분함량은 분획하여 건조기에서 건조시켜 측정하였다. 분석을 위한 수분장력의 범위는 pF 0.5-2.0으로 설정했다. 세근의 발달 경향을 분석하기 위한 실험에서는 점적관의 위치를 정식후 육묘포트(Near) 혹은 식물기부로부터 15 cm 되는 위치(Far)에 설치하거나, 2주간은 stonewool 육묘포트에 설치하고 그 이후는 15 cm 위치에 설치하는 처리(NF)를 하여 관수하였다. 세근발달 상황은 정식후 60일이었으며, Newman [3] 및 Wulfsohn [4]의 방법으로 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

식물의 양수분흡수와 관련된 일련의 단계에 대한 개념식은 다음과 같이 작성할 수 있다.

Step 1 : 체내 수분의 앞으로의 이동량 = 목부전도도×부위별 수분포텐셜차/이동거리

Step 2 : 뿌리의 수분흡수량 = 흡수전도도×전뿌리중 흡수부위의 표면적 비율×뿌리내외간의 수분포텐셜차

Step 3 : 배지 내에서의 수분의 확산속도 = 확산계수(수리전도도)×위차별 수분포텐셜차/이동거리

Step 4 : 배지 내 존재하는 수분함량 = 금액량 - 배액량 - 흡착수 - 증발량

위에서 Step 1 ≤ Step 2 ≤ Step 3 ≤ Step 4 이 성립되어야 수분부족이 나타나지 않는다. 식물체내 수분포텐셜은 환경의존도가 크며, 뿌리의 삼투포텐셜은 수분변화에 따른 배지 내 양분농도변화에 적응하기 위하여 일어난다 [5]. 일사량이 많을 경우에는 배지 내 수분함량 변화가 큰데, 배지 내 수분상태 변화가 클수록 식물의 적응력이 증가하여 잎의 specific leaf weight(SLW) 및 뿌리의 osmotic potential이 증가한다. 수체 내에 수분을 저장하려는 경향이 강해지므로 잎의 SLW가 증가하는데, 대립 펠라이트일수록 식물의 SLW가 커지지만, 일사량의 영향을 받아 겨울에는 그 정도가 적어진다[6].

모든 단계에서 수분의 이동저항이 발생하며, 저항을 이겨내는 전도도의 크기에 많은 인자들이 관여한다. 각 단계에서의 전도도와 관련된 개념식은 다음과 같이 작성할 수 있다.

Step 1 : 목부전도도 = 목부발달 정도/목부 막힘 정도

Step 2 : 흡수전도도 = 뿌리활력×뿌리의 공간분포

Step 3 : 수리전도도(확산계수) = 액상비율/(확산장예×배지 흡착능력)

Step 4: 저장전도도 = 배수저항 = 배지의 수직 깊이 × 다공성/공극크기

잎에서의 수분부족은 증산에 의해 소비된 수분의 양과 위 4단계 중에서 가장 병목현상을 나타내는 단계에서의 수분이동속도와와의 차이에 의해 나타난다. 단시간 동안에는 각 단계에서의 완충능력이 차이를 상쇄하는 역할을 하지만, 그 지속시간이 길지 않으므로 금액과 관련해서는 완충능력을 제외시킬 수 있다.

율속단계는 상황에 따라 변화된다. 일사량이 11.5MJm⁻² 이나 되는 강광조건에서는 Step 1과 Step 2 단계에서 병목현상이 일어나 뿌리를 물에 담그더라도 잎이 순간적으로 시들거나 과실이 줄어드는 현상을 막을 수 없다 [7].

배지가 수분을 함유할 능력이 현저히 떨어지는 모래 같은 경우에는 Step 4 단계인 배지 내 존재하는 절대 수분함량이 율속단계가 된다. 점토같이 치밀한 배지의 경우에는 Step 2 단계의 흡수전도도의 구성인자인 뿌리 주위의 산소농도가 율속단계일 수 있다.

펄라이트의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 공극은 95.1%로 매우 다공성이며, 유효수분은 pF2.0에서 25%로 압면에 비해 유효수분의 변동이 작은 특성을 보인다. 펄라이트의 경우, 포장용수량인 -5kPa (수두압 -50 cm)에서도 70% 정도의 기상을 가지므로(Table 2), 급액이 극단적으로 과다하지 않으면 배지 내 산소는 율속인자가 되지 않는다[8]. 또한, 과다한 강광조건이 아닌 한 순조로운 생육상태를 나타내는 이전의 결과[7]로 보아 Step 1과 Step 2 단계는 율속단계에서 제외시킬 수 있다. 단, 순환식으로 재배할 경우 급액빈도를 증가시키려는 경향이 나타날 수 있는데, 세립 펄라이트일수록 과다 급액에 의한 뿌리의 산소부족 염려가 높으므로 주의해야 한다. 펄라이트 배지는 양이온치환용량이 2.2-2.4meq/100 g으로 매우 작기 때문에 배지와 모세관수 사이의 치환, 결합 등의 양분 상호작용도 다른 배지에 비해 작으므로 [9], 양분에 관련된 속도도 율속인자에서 생략할 수 있다.

Step 3 단계는 뿌리와 수분 저장장소와의 거리와 수분포텐셜차 및 확산계수에 의해 그 속도가 결정된다. 거리는 급액되는 위치, 즉 점적관의 위치를 조절하는 방법과 뿌리를 넓게 분포시켜 도달거리를 짧게 하는 방

법이 있다. 단, 이 두 가지는 모두 동적인 요소인 동시에 뿌리분포도는 역사성을 가지고도 있다. 배지내 수분함량 분포는 수평적으로는 식물 가까이에서 급격히 감소하고, 수직적으로는 하부에서 급격히 증가하는 양상을 보이는데(Fig. 1), 점적관 조절에 의한 거리조정은 1차원적 함수인데 반해, 뿌리분포는 3차원적 함수이므로 점적관 위치보다는 뿌리분포가 율속인자일 가능성이 커진다. 또한, 점적관 조절은 제어가 용이한 반면, 뿌리분포는 제어가 어렵기 때문에 뿌리분포 확보에 실패할 가능성이 크다.

배지 내 수분흡수를 담당하는 세근의 발달은 뿌리의 적절한 수분스트레스 정도, 기상/액상 비율 등에 의해 조절된다. 이 두 인자가 낮으면 세근 발생이 적어지므로, 생육초기에 적절한 수분스트레스 상태를 만들 필요가 있다. 생육초기에는 세근발달에 주안점을 두고, 세근 발달이 충분히 이루어진 후에는 급액량을 늘려 필요한 수분을 충분히 흡수할 수 있도록 관리하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

배지 내 수분장력이 포장용수량인 -5kPa 보다 클 경우 확산계수는 급격히 감소한다. 확산계수는 공극이 클수록 작아, 세립 펄라이트보다 조립 펄라이트에서 작는데, 이는 수분이동저항이 크게 나타나는 것을 의미한다[10]. 일반 토양에서는 -100kPa 이하일 때 확산계수가 감소하므로 배지 특성에 따라 차이가 매우 클 수 있다. 펄라이트의 경우 확산계수가 작은 조립일수록 급액관리에 따른 수분함량 차이가 커서 급액관리가 더욱 중요해진다. 확산계수는 배지의 진압에 의해 변화하며, 배지 입자의 이동에 의해서도 변화하므로 정적이라 할 수 없다. 또한, 식물의 식체에 의해서도 변화하는 경우가 있어 수분장력특성은 실험실에서의 결과가 유용하지 못한

Table 1. Characteristics of perlite used for the experiment

Item	Characteristics	Remarks
Particle size (mm)	1 - 6	
Bulk density (kg/m ³)	122	
Available water (Vol %)	25	at pF2.0
Total porosity (Vol %)	95.1	
Free dampness (Vol %)	53.12 ± 0.11	

Table 2. Ratios of substrate, water and air (in %) at various pressure heads (cm)

Pressure head	Water	Air	Solid material
-3	56	40	4
-10	35	61	4
-32	26	70	4
-50	23	73	4
-100	21	75	4

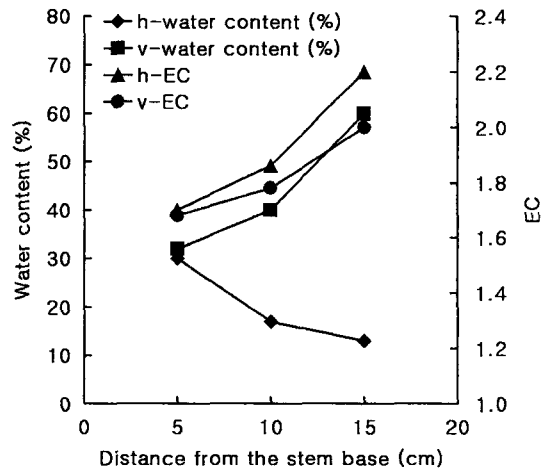


Fig. 1. Water content and EC perpendicular or horizontal at the distance at 5, 10 and 15 cm from the stem base.

경우가 있다[6, 11]. 오히려 배지 내 수분함량이 식물생육과 더 높은 상관성을 가지는 결과로 볼 때[12, 13], 동적인 뿌리분포에 의한 변화가 큰 것으로 사료된다.

Step 4 단계는 관리자의 의도와 배지 고유의 특성이 크게 작용하는 단계로, 급액빈도, 배지공극 크기, 배지량 사이에는 상호보완성이 존재한다. 입자가 굵을수록 배지 내 절대수분함량이 적어지므로[14], 급액빈도를 늘리거나, 배지량을 많게 하거나 하는 것이 우선적으로 요구된다. 단, 배지의 절대량이 적어지면 뿌리발달이 제한되고, 급액 안정성이 떨어지므로 적정 배지량은 우선적으로 정해져야 한다. 배지의 통기성 및 수분이동은 뿌리 밀도가 높아감에 따라 저하되는데, 이 경우 관수빈도를 높여도 배지량이 적을 경우 불충분할 수 있다[15]. Step 4 단계는 용기의 형태를 적절히 선택할 수 있으며, 다른 단계에 비해 적절한 측정장치를 이용하여 동적으로 관리할 수 있으므로 충분한 정보만 있으면 율속단계가 될 가능성은 크지 않다.

이상의 논거에 따라서, 다음과 같은 순서에 의해 급액관리의 기준을 정하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

- 1) 적정 입자종류, 배지량과 자루형태의 결정
- 2) 급액관리의 가장 중요한 율속인자인 뿌리까지의 수분도달거리를 최소한으로 하여 필요한 수분을 공급하는 과정과 역사성을 부여한 뿌리발달 조장
- 3) 상활병 배지 내 적절한 수분함량을 제공하는 급액법

1) 적정 입자종류, 배지량과 자루형태의 결정

토마토의 경우 Step 4 단계의 그루당 적정 펄라이트 배지 용량은 다음의 방법으로 추정할 수 있다. 최성기에 있는 토마토의 1일 최대 수분흡수량은 3l이다. pF 2에서 급액을 개시하고 pF 1일 때 정지한다면, 펄라이트

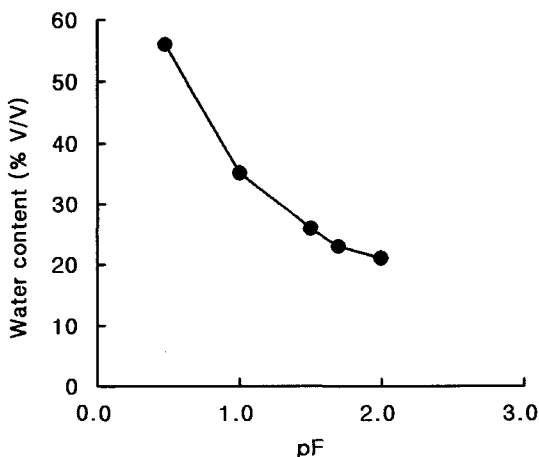


Fig. 2. Moisture retention curve for perlite with the particle size of 0.6-2.4 mm.

의 최대 수분보유량은 pF 2에서 20% 정도이며, pF 1에서 35% 정도이므로 15% 차이가 난다(Fig. 2). 1일 최소 급액회수를 5회라 하면 펄라이트 배지량은 그루당 4l이다. 배지 내 뿌리 용적을 1l라고 한다면, 펄라이트 배지량은 그루당 5l이다. 이 배지량은 뿌리가 배지 전면 에 분포하여 흡수능력을 나타낼 때의 수치이므로 실제로는 상당히 여유를 두어야 할 것이며, 여유분은 재배 상태에 따라 달라지므로 실측해야 할 것이다. 통상 30% 여유를 두는 것이 안전한데, 이 경우 6.5l가 적정 용적이다. 산소흡수를 위한 배지량과 근권제한에 의한 역효과를 감안하면 이 보다 적을 경우 안정성이 위협받을 수 있다.

토마토의 경우 주간거리가 일정하지 않으며, 자루에 식재하는 그루수도 절대적인 것은 없으므로 자루의 길이도 정해질 필요는 없다. 단, 운반의 효율성 등을 감안할 때, 보통재배의 경우 직립유인에서는 40 cm, V자 유인에서는 20 cm 간격으로 식재하는 것이 관행인 것을 감안하면, 3그루 혹은 6그루를 식재할 경우 자루의 길이는 120 cm가 적당하다. 120 cm 자루에 6그루를 식재할 경우 39l가 적정 배지량이라 할 수 있다. 이 때 자루의 직경은 20.3 cm 정도이다. 단, 자루에 배지를 충전할 경우 일정량의 공간이 생기는 것을 감안한 직경으로 생산해야 할 것이다.

자루의 깊이는 배지내 뿌리특성과 펄라이트의 수직 특성을 고려하여 설정한다. 펄라이트의 수직수분분포특성은 上乾下濕이며 그 차이는 하부로 갈수록 급격히 증가하나, 평균 -10kPa에서 20%(v/v) 정도이다. 단, 배액 흡에 따라 달라지며, 자루 특성상 깊이의 변화가 생기는 것을 현장에서 감안해야 할 것으로 사료된다.

2) 급액관리의 가장 중요한 율속인자인 뿌리까지의 수분도달거리를 최소한으로 하여 필요한 수분을 공급하는 과정과 역사성을 부여한 뿌리발달 조장

분석 결과 뿌리 가까이 에서 관수한 처리구에서는 세근의 발달이 식물에 몰려있었으며, 15 cm에서 관수한 처리구에서는 활착이 나빠 전반적으로 세근발달이 적었다(Fig. 3). 세근발달은 점적관의 위치를 변경하는 처리구에서 가장 좋았다. 식물의 세근은 과습상태에서는 적게 발달하므로, 정식 직후에는 적습하게 급액하여 활착을 도우나, 그 후에는 적절히 건조시켜 뿌리 발달을 조장하는 것이 그 후의 원활한 양수분흡수를 위해 바람직하다. 이를 위해 정식 시에는 점적관을 식물 기부에 위치시키고, 활착된 후에는 점차 기부에서 멀리 위치시키는 것이 권장된다. 점적관이 막히는 현상을 방지하기 위해서 그루당 점적관을 2개씩 설치하는 것이 안정적이라 할 수 있다. 뿌리털 밀도는 세근 1 mm당 60개 정도

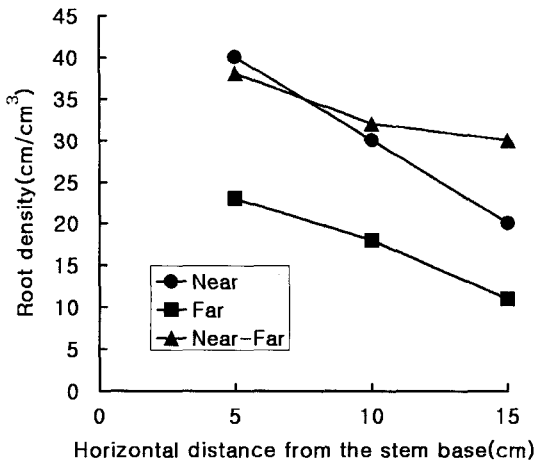


Fig. 3. Root density according to horizontal distance from the stem base.

로 처리별 큰 차이를 보이지 않았다. 뿌리털의 밀도는 관수에 따라 차이를 보이는데[16], 자루내 상태는 배지가 크게 건조하지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 뿌리발달은 측정에 어려움이 있으며, 그 역사성에 관여하는 인자가 매우 많아 연구가 이루어지지 못하고 있으므로 향후 체계적인 연구를 필요로 한다.

3) 상황별 배지 내 적절한 수분함량을 제공하는 급액법 일사량이 과다하게 많아서 Step 1 및 Step 2 단계가 율속단계가 될 경우에는 급액량을 증가시켜도 효과가 없으므로 일시적인 위조는 받아들이는 급액관리법을 채택해야 한다.

온도가 적정온도를 벗어날 경우에는 Step 2 단계가 율속단계가 되므로 급액량을 증가시키면 오히려 뿌리가 과습피해를 입을 수 있으므로 온도조건을 개선하는 것을 우선시 하되 급액량을 감소시켜야 한다.

환경요인이 율속단계가 되지 않을 경우에는 배지내 수분함량을 조절하는 급액관리를 하되, 가능한 한 배지내 수분함량을 직접 제어하는 방법이 좋다. 이 경우 배지중량법과 배액전극법이 바람직하다. 단, 배지중량법은 측정 그루 수에 제한이 있으므로 배액전극법이 현실적일 수 있다. 증발산량에 기초한 일사량제어법은 간접제어법이므로 그 정확성에 한계가 있다. 급액개시 및 종료 시간 설정, 매회 급액량 등도 주의해야 하는 제어법이다. 타이머법은 가장 저렴한 제어법이지만 급액관리가 가장 어려우므로 보조적으로만 사용하는 것이 추천된다.

이상 priority에 입각한 급액관리는 사용자의 의도에 의해 달라질 수 있다. 즉, 고당도 토마토를 위해 급액량을 제한하거나, 영양생장을 촉진시키기 위해 급액을 많

이 하는 경우 priority가 달라지므로 상기 priority에 의한 급액관리 기준은 일반재배에 성립된다.

감사의 글

본 논문은 2003년 상명대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] 박권우, 김영식. 양액재배, 아카데미서적, 1998.
- [2] Rural Development Administration. Theory and its application to cultivation of crop physiology. RDA, Korea, pp.304-330, 2003.
- [3] E. I. Newman. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* vol. 3, pp. 139-145, 1966.
- [4] D. Wulfsohn, J. R. Nyengaard, H. J. G. Gundersen, A. J. Cutler and T. M. Squires. Non-destructive, stereological estimation of plant root lengths, branching pattern and diameter distribution. *Plant and Soil.* vol. 214, pp. 15-26, 1999.
- [5] N. C. Turner. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation Science* vol. 9, pp. 289-308, 1988.
- [6] O. Marfa and R. Orozco. Non saturated hydraulic conductivity of perlites: Some effects on pepper. *Acta Hort.* vol. 401, pp. 235-242. 1995.
- [7] H. J. Kim and Y. S. Kim. Effect of irrigation duration by integrated solar radiation on growth and water use efficiency of musk melon grown in perlite culture. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* vol. 44, pp. 146-151, 2003.
- [8] R. Baas, G. Wever, A. J. Koolen, E. Tariku, and K.J. Stol. Oxygen supply and consumption in soilless culture : Evaluation of an oxygen simulation model for cucumber. *Acta Hort.* vol. 554, pp. 157-164, 2001.
- [9] G. Gizas, D. Savvas, and I. Mitsios. Availability of macrocations in perlite and pumice as influenced by the application of nutrient solutions having different cation concentration ratios. *Acta Hort.* vol. 548, pp. 277-284, 2001.
- [10] W. Otten. Dynamics of water and nutrients for potted plants induced by flooded bench fertigation: experiments and simulation. Ph. D. dissertation. Agric. Univ. Wageningen. The Netherlands, pp. 115, 1994.
- [11] O. Marfa, R. Save, R. Rabella, F. Sabater, M. Pages, and M. Tio. Effects of different substrates and irrigation regimes on crop and plant-water relationships of *Asplenium nidus-avis Horti.* and *Cyclamen persicum*

- Mill. Acta Hort. vol. 342, pp. 339-348, 1993.
- [12] P. T. Karlovich and W. C. Fonteno. Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* vol. 111, pp. 191-195, 1986.
- [13] L. M. Riviere, J. C. Foucard, and F. Lemaire. Irrigation of container crops according to the substrate. *Sci. Hort.* vol. 43, pp. 339-349, 1990.
- [14] O. Marfa, R. Save, C. Biel, M. Cohen, and R. Llado. Substrate hydraulic conductivity as a parameter for irrigation of carnation soilless culture. *Acta Hort.* vol. 458, pp. 65-74, 1998.
- [15] A. Bar-Tal, A. Feigin, I. Rylski, and E. Pressman. Effects of root pruning and N-NO₃ solution concentration on nutrient uptake and transpiration of tomato plants. *Sci. Hort.* vol. 58, pp.77-90, 1994.
- [16] Z. MA, D. G. Bielenberg, K. M. Brown and J. P. Lynch. Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. *Plant, Cell and Environment* vol. 24, pp. 459-467, 2001.