

TDR 센서를 이용한 암면 슬라브 수분 특성 분석 및 파프리카 재배의 적용 예

박종석^{1,2} · 뉴엔타이¹ · 안태인¹ · 손정익^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원

Analysis of Moisture Characteristics in Rockwool Slabs using Time Domain Reflectometry (TDR) Sensors and Their Applications to Paprika Cultivation

Jong Seok Park^{1,2}, Nguyen Huy Tai¹, Tae In An¹, and Jung Eek Son^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

²Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. To investigate the characteristics of moisture content (MC), moisture distribution and starting point of drainage in a rockwool slab culture, time domain reflectometry (TDR) sensors were used in a drip irrigation system. MC values (0~100%) measured by TDR sensors in a slab were compared to those by loadcells. Seventy two seedlings of paprika (*Capsicum annuum* L.) were cultured for 5~6 months in a greenhouse and the starting point of irrigation was determined by the average value of three TDR sensors which were inserted diagonally across the slabs under the plants. MCs as a standard for starting point of irrigation by TDR were determined with 40%, 50%, and 60%. Distribution of MCs in a slab measured with five TDR sensors equally spaced from two irrigation points were not much different when the MC in the slab increased from zero to saturation point. The saturated MCs in the slab were presented at 58~65% and the drain was started when the MC became around 50~55%. At the saturated MC in the slab, TDR sensors presented 100% but the values from the loadcell showed 90% at the same time. However, measurement errors between two methods for MC remarkably decreased with a decrease in the MC in a slab. Especially when the MC was maintaining below 60%, the errors between TDR and loadcell methods for measuring MC in the rock-wool slab were less than 5%. There were no significant differences in number of fruits and fresh and dry weights of fruits when they were cultured under the different MC conditions with three irrigation regimes (40%, 50%, and 60%). These results indicated that the MC control by TDR sensors in a rock-wool based paprika culture can be suggested as a method to determine the starting point of irrigation for a soilless culture system.

Key words : drainage, irrigation timing, moisture, paprika, substrate, TDR

서 론

배지경에서 작물에 공급되는 양액 중의 양분이 배액 되지 않고 모두 식물에 흡수되는 것이 이상적이나, 대규모 재배 면적에서는 점적 관수를 이용하기 때문에 각 관수 위치에서 걸리는 토출압이 달라지고, 결국 관

수량이 달라지게 된다. 이때 공급액이 충분하지 않을 경우, 양수분 스트레스를 받거나 배지내의 염류 축적이 발생된다. 이러한 이유로 급액된 배양액의 20~30%가 배액되도록 현장에서 관리하고 있다(Kim과 Kim, 2004).

주간에 식물의 증산이 일사량과 가장 정의 상관관계가 있다는 사실을 근거로 많은 파프리카 농가에서는 적산일사량 제어를 이용하여 급액관리를 하고 있다(Choi 등, 2001). 적산일사량 제어는 어느 임계 적산

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr
Received July 31, 2009; Revised August 17, 2009;
Accepted August 27, 2009

일사 이상이 되었을 경우 양액공급은 그와 비례하여 공급되지만, 실제 식물로부터의 증산은 활발히 일어나지 않아서 결국 배액량이 크게 증가하게 되는 단점이 있다. 또한 비료값은 매년 상승하여 농가운영비에 큰 부담으로 작용하는 것을 생각하면 새로운 방식의 수분 관리법 도입에 대한 검토가 필요하다.

배지경의 수분함량 조절은 타이머 법, 적산 일사량 법, 증산량에 의한 관리법, 식물의 수분흡수량을 직접 측정하는 수액센서법, 배지 수분장력법, 전기저항 측정법 등이 알려져 있다(De Graaf, 1988; Kim과 Kim, 2004; Laption 등, 2001; Matsuno, 1990; Sim 등, 2006). 그중에서 TDR(time domain reflectometry) 수분함량 측정법은 비교적 정확하게 함수율을 측정하는 방식으로 계측기(TDR tracer)로부터 고주파를 발생시키고 한 쌍의 평형막대로 구성된 센서를 타고 고주파가 전파되고 센서의 끝에서 다시 되돌아오는 전파속도, 즉 토양수분에 따른 유전율차이에 근거하여 토양수분을 측정한다(Charpentier 등, 2004; Baas와 Straver, 2001). 최근에는 TDR 방식에서 배지 및 토양의 EC 값을 보정하여 그 수분함량을 측정할 수 있기 때문에 배지내의 정확한 수분측정이 가능하다.

TDR 수분측정법을 배지경에 도입하여 급배액을 관리하고자 할 경우 TDR 센서값과 실제 배지의 수분함량과의 관계, 급액과 배액의 특성, 적절한 급액시기 결정 등에 대한 분석이 필요하다. 본 연구의 목적은 점적방식의 급액량에 따른 암면 슬라브의 각 위치별 수분 분포특성을 분석, 급액량에 대한 배액시점을 측정, 중량법과 TDR 센서법을 비교하고, 이를 근거로 TDR 센서에 의한 관수시점의 차이가 파프리카의 생육에 미

치는 영향을 분석하는 것이다.

재료 및 방법

1. 슬라브 위치별 수분분포 특성

슬라브(7×15×90cm) 내의 위치별 수분분포와 급액량과 배액량과의 관계를 분석하기 위하여 건조한 상태의 슬라브와 큐브를 각각 재배조건에 맞추어 배치(3plants/slab)시키고 배양액(EC 1.0dS·m⁻¹, 파프리카 재배용; PBG)을 제조하여 수증펌프를 이용하여 점적관수 시스템으로 100mL·min⁻¹의 유속으로 급액하였다. 이때 큐브와 큐브사이에 등간격으로 5개의 TDR 센서(CoCo, 미래센서 Co. Ltd. Kor)를 데이터 로거(CR10x, campbell Co. Ltd. USA)에 연결하여 연속적으로 수분함량을 측정하였다. 배액되는 양액의 시점과 배액량을 측정하기 위하여 로드셀(psa30-50, 봉신로드셀 Co. Ltd. Kor)을 설치하여 연속적으로 배액 무게를 측정하였다. 급액은 0~2.0L/cube 범위에서 0.2L 씩 증가시키면서 연속적으로 측정하였다.

2. 중량법과 TDR 센서의 배지 수분함량 비교

TDR센서에 의한 배지 수분함수량을 보다 정확하게 검증하기 위하여 로드셀을 이용한 배지 중량법과 TDR 센서값을 비교하였다. 유리온실에서 거터의 배수구를 막고, 12L의 물을 거터에 담고 포장 비닐을 벗긴 슬라브 배지를 거터에 놓고 포수 시켰다. 이후 배수구를 열어 중력수를 모두 제거한 후 로드셀을 이용하여 배지의 무게를 연속적으로 측정하였으며, 이때 슬라브 양 쪽에서 30cm씩 떨어진 곳에 2대의 TDR센서를 수직

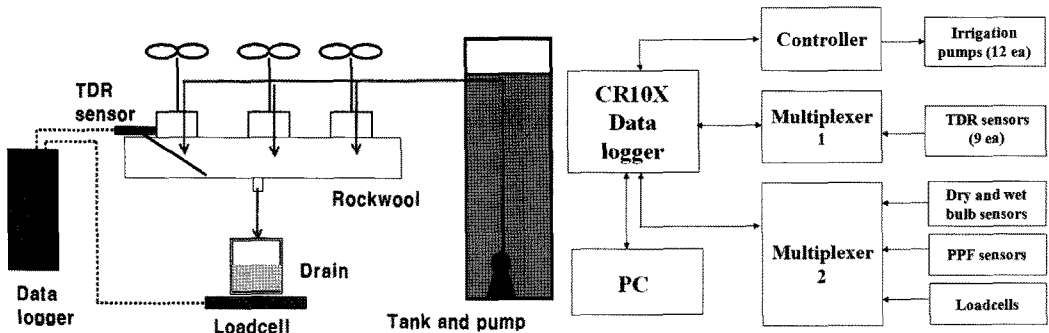


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up used for paprika culture using TDR sensors (left) and data logging and control systems (right).

으로 꽃이 연속적으로 수분함량 변화를 측정하였다.

3. 파프리카 재배 환경

파프리카(*Capsicum annuum* L.) “Boogie” 종자를 입상암면에 파종 후 약 15째 절곡하여 암면 큐브에 이식하고, 이후 15일간의 육묘기간을 거친 길이 약 30~35cm 정도의 육묘를 서울대학교 농장 유리온실에 정식하였다. 모든 묘는 정식 후 1주일 동안 TDR 센서값으로 60% 이상의 수분함량 조건으로 관리하여 슬라브에 근부의 활착을 유도하였으며, 정식 1주 후부터 수분함량 처리를 시작하였다. 총 72주를 정식하였고, 주당 두 줄기로 유인하여 총 144줄기 (4.5 줄기/m²)를 두었다. 배양액은 PBG 파프리카용 배양액(EC: 2.2dS·m⁻¹)을 비순환식으로 급액 관리하였다. 온실의 물리적 환경을 측정하기 위하여 건습구 온도계(T-type 서머커플로 자재 제작) 5개, 일사계 2대를 각각 CR10x에 연결하여 실험 기간 중 데이터를 수집하였다(Fig. 1).

4. 근권부 수분함량 처리 및 측정 항목

암면 슬라브 배지의 수분함량을 측정하기 위하여 TDR(CS615, campbell Co. Ltd. USA) 9대를 이용하여 처리당 각 큐브 밑의 슬라브에 45°로 경사로 설치하였다. 정식 후 1주일 간은 TDR 센서 기준으로 60%의 조건에 급액하여 관리하였으며, 1주 후부터 08:00부터 관수하였으며, 수분함량 처리는 TDR 센서를 기준으로 40%, 50%, 60%로 처리하여 5~6개월간 재배하였다. 배양액의 pH와 EC는 각 처리에 6.2~6.3, 2.5~2.6dS·m⁻¹로 큰 차이가 없었다. 관수량에 대한 배액량이 20~30%가 되도록 관수하였다. 5개월간의 재배기간 중에 경장을 측정하였으며, 재배기간의 중 후반기 2개월 동안에 파괴적인 방법으로 엽면적으로 측정하였다. 재배 종료 후 과수, 과중, 식물체중을 측정하였고, 70의 건조기에서 1주일간 건조시켜 건물중을 측정하였다.

5. 실험 설계 및 통계

총 72주의 파프리카 육묘를 정식하였다. 3수준(40%, 50%, 60%)의 수분함량 처리를 두었으며, 각 수준당 4처리의 반복을 두었다. 각 처리구는 6주씩 구성되었으며 각 슬라브당 3주씩 정식하여 완전임의 배치법으로 실험하였다. 통계분석을 위하여 SAS 프로그램을 이용하였다.

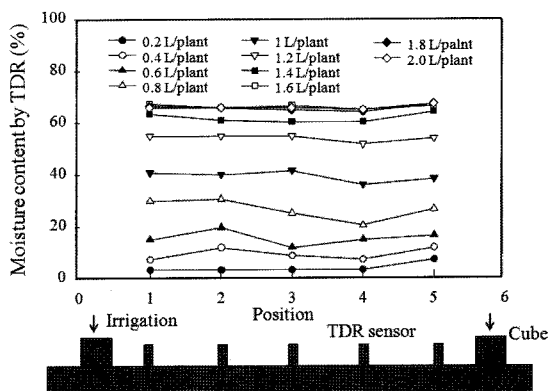


Fig. 2. Distribution of moisture contents in a slab measured with five TDR sensors equally spaced between two irrigation points.

결과 및 고찰

1. 슬라브의 위치별 수분분포

큐브에서 점적 방식에 의해 양액을 점차 증가시킬 경우 큐브와 큐브사이의 슬라브내 수분함량은 그림에서와 같이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 2). 또한 공급하는 물의 공급량에 비례하여 슬라브내의 수분함수량은 비례하게 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 2). 큐브당 0.6L를 공급한 조건에서 위치별 수분함량의 편차가 가장 크게 나타났으며, 큐브당 공급량이 증가되어 1.4L·min⁻¹ 이상 되었을 경우에는 위치별 수분함량의 편차가 나타나지 않았다. 또한 본 실험조건에서 포화수분 함수량은 약 65% 정도로 나타났다. 암면 슬라브는 통기성이 우수하기 때문에 큐브에서 공급된 수분은 슬라브를 수직으로 통과하면서 공극부분을 통과해 쉽게 슬라브의 하층에 집적이 된다. 하부에 집적된 수분은 모세관현상에 의하여 빠르게 수평으로 이동된 것을 관수 후 포장 비닐을 제거한 후에 확인하였다. 슬라브내의 수분분포가 관수위치와 상관없이 매우 균일한 높이로 슬라브 내에 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 TDR 센서를 이용하여 배지내의 수분을 측정하고자 할 경우 관수 위치에 따른 센서 설정 위치는 크게 중요하지 않다고 생각된다.

2. 유효수분함량과 배액시점

실제 유효수분함량(v/v, %)에 따른 TDR 센서값에 의한 배지내 수분 함량의 변화는 Fig. 3과 같이 sigmoid

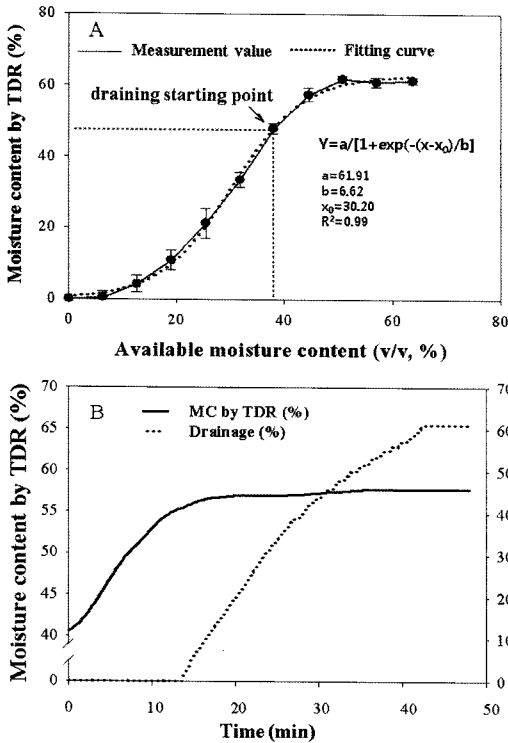


Fig. 3. Moisture content measured by TDR sensors about available moisture content (v/v, %) (A), and starting point of drain by irrigation quantity of nutrient solution (B).

curve(3 변수)를 나타내었으며 포화수분함량이 되기 약 10%전 수분함량 상태에서 배액이 시작되는 것으로 나타났다(Fig. 3). 암면의 슬라브 배지에서 유효수분함량과 실제 TDR 센서에 의한 값의 관계는 $y = a/[1 + \exp(-(x - x_0)/b)]$ 의 함수에서 $a = 61.91$, $b = 6.62$, $x_0 = 30.23$, 결정계수(R^2)는 0.99로 나타났다. 따라서 실제 공급된 유량이나 TDR 센서로부터의 함수량값을 이용하면 상대의 값을 유추할 수 있다.

각 배지의 배액특성은 배지의 기울기, 배지내 배수구의 위치 및 배수구 크기에 따라서 조금씩 달라지는 것을 반복 실험을 통하여 관찰하였다. 그러나 본 실험 조건인 수평상태에서 거터위에 슬라브를 올려놓고 정중앙부의 양쪽에 T자로 배수구를 만들어 실험한 결과 매우 유사한 결과들을 얻을 수 있었다. 암면 슬라브배지의 포화수분함량은 배액 시키는 조건에서 58~65% 사이 값을 가지는 것으로 나타났으며 배액은 50~55%의 시점에서 배액이 시작되었다(Fig. 3). 이러한 암면 배지의 급액량에 대한 배액특성을 근간으로 TDR 센

서를 이용하여 관수시점을 결정하고 전체 급액에 대한 배액이 약 20~30%가 될 수 있도록 급액량을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 중량법과 TDR 센서에 의한 배지 수분함량 비교

수평으로 놓여진 거터위에 슬라브를 놓고 배양액 (EC: $2.2\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)으로 포수시킨 후, 슬라브의 양쪽에 등간격으로 설치된 TDR 센서 2대의 평균값과 배지 전체의 무게를 측정하여 두 개의 값을 비교하였다 (Fig. 4). 중력수로 배액된 부분을 확인 한 후, TDR 센서의 값은 100%를 보인 반면에 로드셀 값은 약 90%의 값을 나타내었다(Fig. 4). 그 이후 온실에서 자연 건조 시키면서 두 개의 값을 비교한 결과 유사한 경향을 나타내면서 하강하는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 전기를 유도하는 정도를 나타내는 유전상수는 물의 경우 약 80으로 매우 건조한 토양에서의 유전상수 2.7 보다 매우 큰 값을 나타내므로 수분이 함유된 토양의

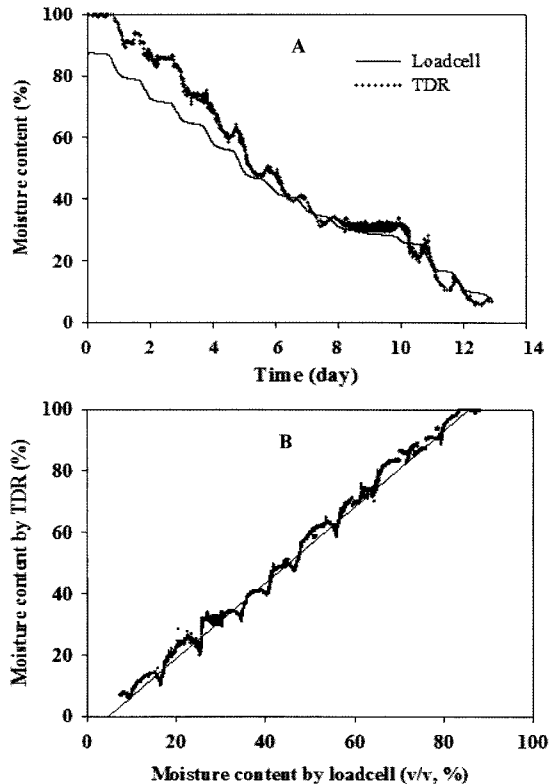


Fig. 4. Comparison of moisture contents measured by TDR sensors and loadcell within a full scale moisture content (0~100%).

유전상수는 증가하게 된다(Thomas, 1966; Wobschall, 1977, 1978). 일반 토양이 아닌 슬라브 배지는 공극이 많아 완전 포수를 시킨다고 하여도 중력수로 하강하는 양이 발생하게 된다(Yamauchi, 1990). 이번 실험을 통해서 이러한 중력수로 배지로부터 빠져나가는 수분량이 전체 포수된 물의 약 10% 정도 되는 것을 알 수 있었으며, 따라서 초기 포수조건에서 TDR센서와 중량법 사이에 10%의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 시간이 경과하면서 배지내의 수분량이 적어짐에 따라, 두 방식의 측정간 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 특히 TDR센서에 의한 배지수분 함량이 60% 미만인 조건에서는 중량법과의 오차가 5% 정도의 범위에서 움직이고 있었으며, 암면 슬라브 배지의 유효수분 관리에 있어 TDR 센서를 이용할 경우 지표가 될 것으로 판단된다. 또한 두 방식에 대한 직선 회귀모델을 구하였을 경우 결정계수(R^2)는 0.992를 나타내었다(Fig. 4). 이는 중량법으로 계산된 배지의 수분함량과 TDR센서에 의해 측정된 수분함량이 매우 높은 유사관계를 나타내는 것이라 할 수 있다. 이상의 결과와 같이 TDR 센서를 이용하여 슬라브 배지내 수분함량을 측정하고 이 값을 근거로 배지 수분 조절이 가능할 것으로 판단되었다.

4. 배지 수분함수율에 따른 파프리카 생육

배지의 수분 함수율에 따른 파프리카의 경장 및 엽면적은 재배기간 동안 유의적인 차이를 보이지 않았다. 또한 수확 후 파프리카의 과수와 과중에 있어서도 3가지 수분조절의 처리에서 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 1). 일사량에 의한 제어의 경우 적산 일사량이 보통 80~120J · cm⁻² 정도를 기준으로 파프리카의 급액 시점을 결정한다. 적산 일사량은 이러한 급액 시

점을 결정하는 바로미터의 역할을 하고, 대상 작물별, 생육단계별, 계절별, 재배 노후유별 급액량을 결정하여 급액 관리할 수 있을 것이다. 위에서 살펴본 결과를 바탕으로 TDR 센서를 이용한 급액 시점의 결정은 새로운 수분 관리법으로 이용 할 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

TDR 수분함량 측정 센서를 이용하여 암면 슬라브 배지의 수분함량, 수분분포, 배액 시점의 특성과 포수 시킨 슬라브 배지의 수분함량 분포를 중량법(로드셀 이용)과 TDR 법으로 비교 하였다. 배지수분 함량이 40%, 50%, 60%를 TDR 센서 3개의 평균값을 기준으로 급액시점을 정하여 5~6개월간 파프리카 72주를 유리온실에서 재배하였다. 두 곳의 급액 포인트로부터 등간격으로 설치된 5개의 TDR 센서를 이용하여 건조 상태에서 0.2L씩 식 증액시키면서 급액시 슬라브내의 수분분포 특성을 살펴본 결과 급액 장소와 관계없이 슬라브내의 위치별 수분 분포가 매우 유사한 값을 나타내었다. 슬라브내의 포화수분 상태에서 TDR 센서값은 약 58~65% 사이의 값을 나타내었으며, 약 50~55%의 수분함량 조건에서 배액이 시작되는 것을 확인할 수 있었다. 배양액으로 완전 포화시킨 슬라브의 TDR 값은 100%를 보인 반면 중량법으로 측정된 유효수분함량(v/v , %)은 90%를 나타내었다. 그러나 증발에 의해 슬라브내의 수분함량이 낮아지면서, 두 측정간의 오차도 줄어들어, 약 60% 이하의 수분함량 조건에서 두 측정방식간의 오차는 5% 미만을 보였다. 이러한 결과는 과채류 급액 제어 방식으로 TDR 센서의 이용 가능성을 확인 할 수 있었으며, 급액 시점을 3가지 배지수분조건으로 파프리카를 재배하였을 때 파프리카의 과수, 과중, 식물체의 엽면적 또는 경장과 같은 모든 요인에서 유의적인 차이를 발견 할 수 없었다.

주제어 : 관수 시점, 배수, 파프리카, 함수율, TDR

사 사

이 논문은 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

Table 1. Fruits number, fresh weight, and dry weight of harvested paprika plants which were cultured under the different three moisture contents during experiment.

Treatment (%)	Fruits No. (/plant)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
		(/plant)	(/fruit)	(/plant)	(/fruit)
45	12.6 ns	2,105 ns	167.0 ns	138.4 ns	10.9 ns
55	12.5 ns	2,011 ns	160.8 ns	144.5 ns	11.5 ns
65	13.9 ns	2,273 ns	163.5 ns	146.3 ns	10.5 ns

DMRT (P < 0.05)

ns: no significant

인 용 문 헌

1. Baas, R. and N.A. Straver. 2001. In situ monitoring water content and electrical conductivity in soilless media using a frequency-domain sensor. *Acta Hort.* 562:295-303.
2. Charpentier, S., V. Guerin, P. Morel, and R. Tawegoum. 2004. Measuring water content and electrical conductivity in substrates with TDR (Time Domain Reflectometry). *Acta Hort.* 644:283-290.
3. Choi, E.Y., Y.B. Lee, and J.Y. Kim. 2001. Determination of total integrated solar radiation range for the optimal absorption by plant in different substrates. *Kor. J. Soc. Hort. Sci.* 42(3):271-274.
4. De graaf, R. 1988. Automation of the water supply of glasshouse crops by means of calculating the transpiration and measuring the amount of drainage water. *Acta Hort.* 229:219-231.
5. Kim, H.J. and Y.S. Kim. 2004. Evaluation of irrigation system by balance and integrated solar radiation on the fruit quality of muskmelon in closed perlite culture system. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 45(3):127-130.
6. Lipton, V.T., A. Artetxe, A. Beunza, R. Cerveto, and J. Majada. 2001. Irrigation control on substrates with the Laptometron, A new tensiometer. *Acta Hort.* 559:655-662.
7. Matsuno, A. 1990. The guide book of rockwool culture-Retarding culture of tomato plant. 33-41. The national agricultural cooperative union, Tokyo.
8. Sim, S.Y., S.Y. Lee, S.W. Lee, M.W. Seo, J.W. Lim, S.J. Kim, and Y.S. Kim, 2006. Characteristics of root media moisture in various irrigation control methods for tomato perlite bag culture. *Journal of Bio-Environmental Control*, 15(3):225-230.
9. Thomas, A.M. 1996. In situ measurement of moisture in soil and similar substances by fringe capacitance. *J. Sci. Instrum.* 43:21-27.
10. Thomsen, A., K. Schelde, P. Droscher, and F. Steffensen. 2007. Mobile TDR for geo-referenced measurement of soil water content and electrical conductivity. *Precision Agric.* 8:213-223.
11. Wobschall, D. 1977. A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water. the semi-disperse model. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 15(1):49-58.
12. Wobschall, D. 1978. A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 16(2): 112-117.
13. Yamauchi, N. 1990. The guide book of rockwool culture-Retarding culture of cucumber plant. 82-91. The national agricultural cooperative union, Tokyo.