

타이머 제어에 의한 토마토 펄라이트 자루재배시 적정 관수시간 도출

심상연¹ · 이수연¹ · 이상우¹ · 서명훈¹ · 임재욱¹ · 김순재¹ · 김영식^{2*}

¹경기도농업기술원, ²상명대학교

Appropriate Set Time in Irrigation System by Time Clock in Tomato Perlite Bag Culture

Sang Youn Sim¹, Su Yeon Lee¹, Sang Woo Lee¹, Myeong Whoon Seo¹,
Jae Wook Lim¹, Soon Jae Kim¹, and Young Shik Kim^{2*}

¹Gyeonggi Province Agricultural Research & Extension Services, Hwasung-si 445-972, Korea

²Sangmyung University, San 98-20 Anso-dong Cheonan Choongnam 330-720, Korea

Abstract. In tomato perlite bag culture, the available water content was analyzed for several sorts of perlite so that the irrigation safety was investigated and thus the irrigation strategy controlled by time clock was established. The reduction trends of water content in perlite bags were monitored for tomatoes, of which fruits were harvested until the fifth cluster. The amount of daily reduction of water in the bag was on the decrease as the total water in the bag was decreased. In terms of time interval from when the water content based on weight was reduced more than 50g to when it was dropped again, the longest time interval in a day was retarded gradually. It means plant activity was recovered later than the previous day. The available water content in perlite bag of 40 liters was about 30% which was 12 kg in weight, which satisfied daily water demand of 6 tomato plants. The appropriate time irrigated by time clock was recommended for the case that it was irrigated 5 or 10 times a day with the daily integrated solar radiation of 601 or 1,519 W/m².

Key words : DISR(daily integrated solar radiation), hydroponics, irrigation control, last irrigation time, wilting

*Corresponding author

서 언

타이머법은 현재 한국에서 배지경에서의 관수제어법으로 가장 많이 사용하고 있다. 다른 제어법은 보다 정확할 수 있으나 보급에는 이르지 못하고 있다. 펄라이트를 배지로 사용하는 경우에는 배지와 밀착성이 떨어지기 때문에 TDR법(Wever 등, 2004)이나 tensiometer를 이용한 제어법을 사용하는 것이 어렵다. 일사량에 의한 급액제어는 작물의 수분흡수량과 일사량과의 상관관계를 이용하여 적산일사량이 일정수준에 도달하면 급액이 이루어지도록 하는 방법(Choi 등, 2001)으로 타이머제어 급액보다 식물의 생리적인 면을 고려한 방법이나 식물체의 증산량 관여 인자 중 식물의 활력과 증기압포치를 고려하지 않아 수분의 과부족이나 급액 지연 등의 문제가 있다(Kim과 Kim, 2004; Lorenzo

등, 1998). 타이머에 의한 급액제어는 장치자체가 간단하고 가격이 저렴한 반면 재배자의 경험을 기초로 하여 급액을 제어할 수 있기는 하지만 날씨에 따라 급액횟수나 1회당 급액량을 조절하지 않으면 배지가 과습하거나 건조해지기 쉽다(Matsuno, 1990). 즉, 타이머법은 단순한 제어법으로(Hardy 등, 1989) 반자동 시스템이며(Humpherys, 1995), 특성상 엄밀한 제어법이 될 수 없으나, 적절한 식물의 수분흡수모델을 이용하여 상황에 맞게 설정하면 자분이 열악한 생산현장에서 충분히 통용될 수 있다. 단, 현재는 설정시간이 객관적이고 표준화되어 있지 않아 오차가 많이 발생하고 있는 현실이다.

토마토 펄라이트 자루재배에서 배지의 입도분포 및 배지량에 따른 유효수분함량을 아는 것은 관수안정성을 구명하는데 중요하다. 배지종류 및 배지량에 따른

유효수분함량은 실험실에서의 분석값과 차이를 보이는 데, 이는 공간분포, 근권분포, 배지압축 등이 작용하고 있기 때문이다. 즉, 펄라이트는 재배 도중 입자가 부서질 수 있으며(Willumsen, 1993), 중력 등에 의해 다져지거나, 특히 작은 입자들은 자루 내에서 하부로 이동할 수 있어(Marfa 등, 1992) 자루 내에서의 물리적 성질은 재배기간에 따라 달라질 수 있다(Orozco와 Marfa, 1995). 배지의 수분보유력은 뿌리발달에 따라 증가하고 건습의 반복 등에 의해 변화된다(Wever 등, 2004). 이에 따라, 배지별 고유특성은 자루 형태로 재배되는 과정에서 변화될 수밖에 없다.

기본적으로 배지 내 수분함량은 증발산량에 비례하고 식물의 활력이 관여한다. 이 흡수량은 생육단계별로 배지 내 수분이 시간의 경과 및 일사량에 따라 변해가는 양상을 조사함으로써 알 수 있다. 단, 배지 내 수분함량에 따라 일사량과 식물의 생육단계나 활력 등에 따른 증발산량을 규명하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 실제 재배되고 있는 토마토의 배지 무게를 일사량이나 배지 내 수분함량 등과 관련지어 측정, 분석함으로써 타이머 제어법의 관수전략을 도출해 내기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

실험은 5단 수확이 끝난 대과 토마토 로꾸산마루(사카타종묘, 일본) 6그루가 심겨져 있는 40L 크기의 펄라이트 자루 배지(길이 120×폭 34cm, 흑백비닐 두께

0.1mm)를 대상으로 벤로형 유리온실에서 2회 실시하였다. 사용 배양액은 Yamazaki 토마토 전용 배양액으로, 공급 배양액의 pH는 5.5, EC는 0.8dS·m⁻¹이었다. 증발산량을 측정하기 위해, 배지 자루를 저울 센서(SB series, CAS, Korea)에 매단 후, 재배 중 사용하던 배양액으로 배지를 포수시킨 후 관수를 중단하고, 배지 내 무게감소로 증발산량을 측정하였다. 무게는 1분마다 측정했으며, multi-channel static amplifier(AI-1600, CAS, Korea)를 통해 컴퓨터에 저장되되, 무게 변화가 50g 이상일 때만 값을 출력하였다.

첫 실험은 식물 위조의 전체적인 반응을 알아보기 위해서 7월 21일 18시부터 28일 06시까지 행했다. 사용한 배지는 소립(1-3mm, S-1)과 대립(1.2-5mm, L-1)의 두 가지였다. 관수 중단 후 전체 잎의 30% 정도가 시들었을 시점을 위조 시점으로 설정했다.

두 번째 실험은 8월 25일 18시부터 31일 16시까지 소립(1-3mm, S-2), 중립(0.15-5mm, M-2) 및 대립(1.2-5mm, L-2) 펄라이트를 대상으로 실시했다. 배지의 증발량 조사를 위해서 식물의 기부를 절단하여 지상부가 없는 상태의 배지의 수분함량 변화도 동시에 조사했다. 두 번째 실험에서는 종묘시 생체중, 배지 및 식물의 수분함량, 배지의 pH 및 EC를 조사하였다. 배지의 수분함량은 105°C에서 16시간 이상 건조시키면서 무게변화가 없을 때 측정하였다. 식물체의 수분함량은 105°C에서 2시간 동안 건조시킨 후, 80°C에서 24시간 이상 건조시키면서 무게변화가 없을 때 측정하였다. 배지의 pH와 EC는 배지를 풍건한 후, 부피비 5

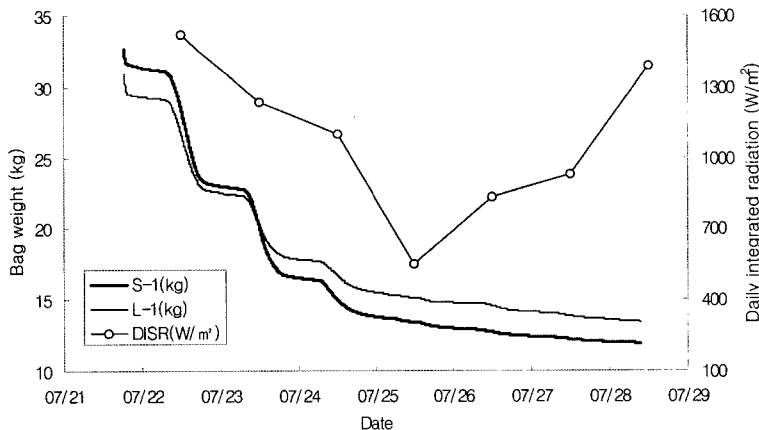


Fig. 1. Transition of bag weight with perlite and DISR (daily integrated solar radiation) in tomato hydroponics in the first experiment. The distribution of particle sizes is 1-3 mm in S-1 and 1.2-5 mm in L-1.

배의 증류수를 가해 1시간 진탕하고, No. 2 여지로 여과한 후 측정하였다(RDA, 2003).

결과 및 고찰

첫 번째 실험에서, 배지 무게는 시간이 경과함에 따라 감소하였다(Fig. 1). 배지 내 수분이 감소함에 따라 일중 무게 변화폭도 감소하는 경향을 나타냈다. 급액중단 후 제2일째에 전체 잎의 30% 정도에서 위조가 발생했는데, 위조가 발생하는 시점에는 무게 변화가 아주 미약하였다. 배지 내 수분 감소속도는 S-1에서 빠른 경향을 나타냈다. 무게 감소 특성을 보다 명확히 해석하기 위해서 무게 감소가 예측된 시간에서 다음으로

무게 감소가 예측된 시간까지 걸리는 경과시간을 분으로 나타내었다(Fig. 2, 3). 예측값의 변화 추이를 보면, 하루 중에서는 밤일수록 무게감소가 서서히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 적산일사량에 따라 차이는 있으나, 무게감소는 건조일수가 진행됨에 따라 늦어지는 경향을 나타냈다. 급액중단 7일째에는 가장 단시간에 변화량이 나타난 경과시간이 S-1의 경우 99분, L-1의 경우 122분으로 첫째 날의 가장 느린 경과시간인 96분 및 125분 정도로, 이미 뿌리의 수분흡수 능력이 상실된 것으로 나타났다. 6일 동안의 적산일사량은 $6,170\text{W}/\text{m}^2$ 이었다. 배지의 무게 감소로부터 계산한 24시간 동안의 식물의 수분흡수량은 L-1의 경우, 22일 06시부터 24시간 동안 6.80kg 이었으며, 그 이후 각각 4.65, 2.35,

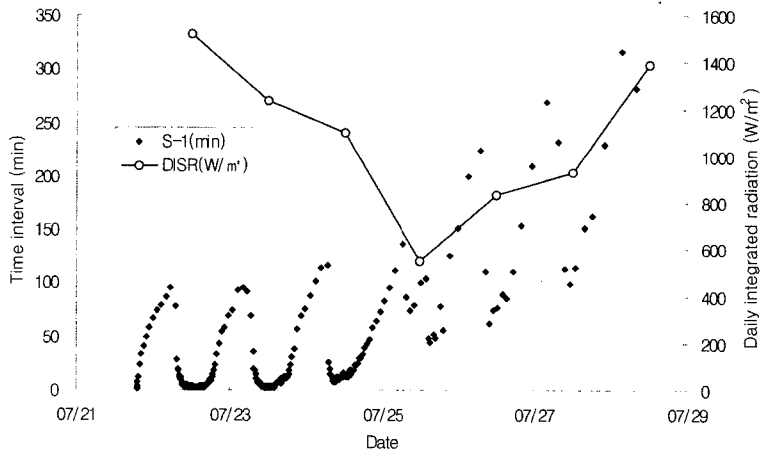


Fig. 2. Time interval (min) with bag weight changes for coarse perlite and DISR (daily integrated solar radiation) in the first experiment. The distribution of particle sizes is 1-3 mm in S-1.

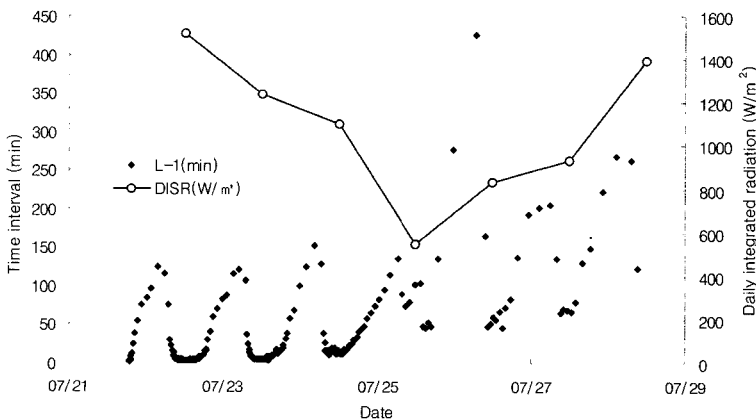


Fig. 3. Time interval (min) with bag weight changes for coarse perlite and DISR (daily integrated solar radiation) in the first experiment. The distribution of particle sizes is 1.2-5 mm in L-1.

0.60, 0.70 및 0.50kg으로 감소하였다. S-1의 경우는 8.35, 6.45, 2.70, 0.75, 0.55 및 0.40kg이었다. 즉, 제2 일째에는 제1일째의 수분흡수량을 충족시키지 못해, 본 실험의 경우에는 급액중단 후 48시간 이내에 식물이 수분스트레스를 받는 것으로 나타났다. S-1에서 제2일째의 수분흡수량이 상대적으로 많아, 유효수분이 많은 것으로 나타났다.

두 번째 실험에서, 배지 무게는 시간이 경과함에 따라 감소하였으며, 일일량과 비례하였다(Fig. 4). 배지 내 수분이 감소함에 따라 일중 무게 변화량도 감소하는 경향을 나타냈다. 급액중단 후 제3일째에 전체 앞의 30% 정도에서 위조가 관찰되었는데, 위조가 발생

하는 시점에는 무게 변화가 상대적으로 미약하였다. 첫 번째 실험에서보다 위조가 늦게 발생했는데, 이는 첫 번째 실험에서의 광도가 제1일 1,519 및 제2일 1,239 W/m²로 높았던 것에 비해, 두 번째 실험에서는 제1일 601, 제2일 936 및 제3일 761 W/m²로 낮았기 때문으로 사료된다.

무게 감소 특성을 보다 명확히 해석하기 위해서 무게 감소가 예측된 시간에서 다음으로 무게 감소가 예측된 시간까지 걸리는 시간간격을 분으로 나타내었다(Fig. 5, 6, 7). 25일의 계속값은 포수시킨 후 배액이 지속적으로 일어나 배지의 무게 감소가 전적으로 식물에 의한 배지 내 수분흡수인 것이라고 보기 어려워

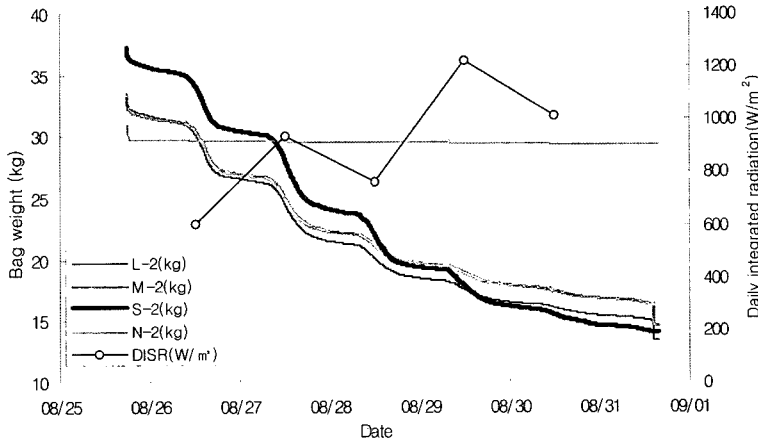


Fig. 4. Transition of bag weight with perlite and DISR (daily integrated radiation) in tomato hydroponics in the second experiment. The distribution of particle sizes is 1-3 mm in S-2, 0.15-5 mm in M-2 and 1.2-5 mm in L-2. N-2 is the perlite bag without plant for evaporation data.

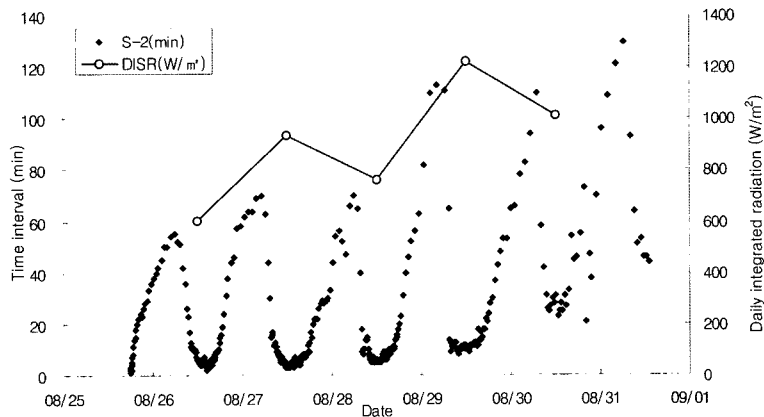


Fig. 5. Time interval (min) with bag weight changes for fine perlite and DISR (daily integrated solar radiation) in the second experiment. The distribution of particle sizes is 1-3 mm in S-2.

타이머 제어에 의한 토마토 펄라이트 자루재배시 적정 관수시간 도출

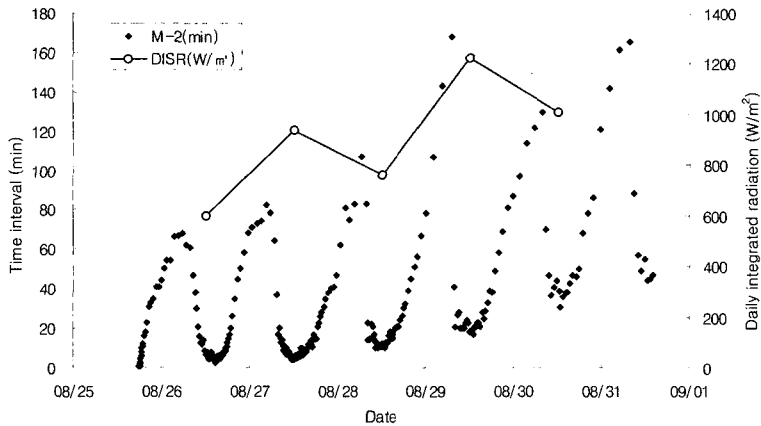


Fig. 6. Time interval (min) with bag weight changes for medium perlite and DISR (daily integrated solar radiation) in the second experiment. The distribution of particle sizes is 0.15-5 mm in M-2.

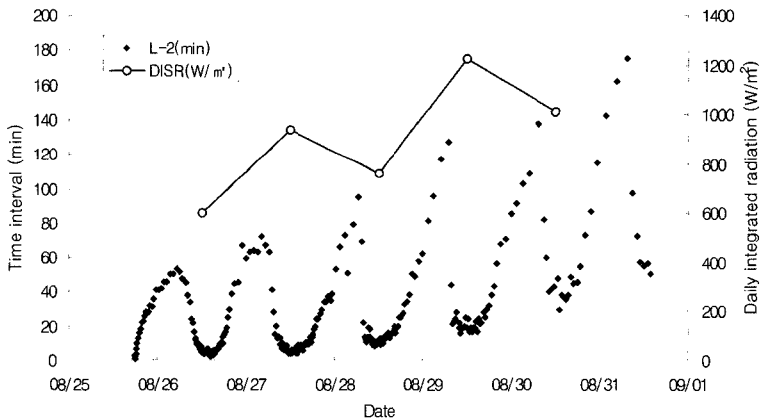


Fig. 7. Time interval (min) with bag weight changes for coarse perlite and DISR (daily integrated solar radiation) in the second experiment. The distribution of particle sizes is 1.2-5 mm in L-2.

수분흡수 해석에는 사용하지 않았다. 26일부터 계측값의 변화 추이를 보면, 밤일수록 무게감소가 서서히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 무게감소는 관수 중단 후 일수가 진행됨에 따라 늦어지는 경향을 나타냈다. 특히 주목할 것은 일중 최장 무게 변화 시간 간격이 L-2의 경우, 26일 5:11 및 6:03에 53분, 27일 4:13에 72분, 28일 6:25에 95분, 29일 7:01에 127분, 30일 7:17에 138분, 31일 7:20에 175분으로 최장시간대와 흡수속도가 모두 점차 늦어지는 현상이었다(Fig. 7). 즉, 수분스트레스에 의해 식물활력의 회복이 일출 후 점차 느려지는 것으로 나타났으며, 수분흡수 속도도 꾸준히 낮아졌다. 한편, 일중 최단 무게 변화 시간 간격은 L-2의 경우, 26일 14:15-14:45에 3-4분, 27일

11:32-12:26에 4-5분, 28일 10:22-12:13에 9-11분, 29일 12:41-14:13에 17-19분, 30일 13:02-15:31에 30-38분, 31일 13:47에 50분으로 시간대에는 차이가 있으나 관수 중단 후 일수의 증가에 따라 일중 최대 수분흡수 속도도 꾸준히 낮아졌다(Fig. 7). 이러한 현상은 다른 처리구에서도 유사하게 나타났다(Fig. 5, 6).

증발량 조사를 위해 식물의 기부를 절단하여 지상부가 없는 배지의 무게 변화를 본 경우(Data of N-2 in Fig. 4), 50g의 무게 변화가 야간에는 1,000분 이상의 간격으로 감지되었으며, 주간에는 200분 이상의 간격으로 감지되었다. 25일 야간까지 84분 이내로 무게 변화가 일어난 것은 포수 후 배액이 발생했기 때문이었다. 26일 0시부터 31일 15시까지 135시간 동안 배

지의 증발량은 0.45kg에 불과했다.

위조실험은 6일째에 중단했으며, 이 시기에 식물에는 위조현상이 확연히 나타났다. 급액중단 6일째에는 가장 단시간에 배지 무게 감소 변화량이 나타난 경과시간이 S-2의 경우 44분(Fig. 5), M-2의 경우 45분(Fig. 6), L-2의 경우 50분으로(Fig. 7), 첫째 날의 가장 느린 경과시간인 55분, 68분 및 53분 보다는 약간 짧았으나 이미 뿌리의 수분흡수 능력이 상실된 것으로 나타났다. 5일 동안의 적산일사량은 4,531W/m²이었다. 배지의 무게 감소로부터 계산한 식물의 수분흡수량은 L-2의 경우, 26일 06시부터 27일 06시까지의 24시간 동안 5.10kg이었으며, 그 이후 각각 5.00, 3.00, 1.90, 1.10kg으로 감소하였다. M-2의 경우는 4.55, 4.60, 2.55, 1.80 및 1.05kg이었으며, S-2의 경우는 5.05, 6.45, 4.53, 3.27 및 1.45kg이었다. 배지 종류 처리에 관계 없이 관수 중단 후 제1일째 보다는 제2일째에 수분흡수량이 많았는데, 이는 일일적산일사량이 제1일에 매우 낮았고, 제2일에 높았기 때문이다. 수분흡수량은 제3일째에 감소하여 급액중단 후 3일 이내에 식물이 수분스트레스를 받는 것으로 나타났으며, 첫 번째 실험과 마찬가지로 S-2에서 수분스트레스가 적은 것으로 나타났다. 유효 수분량을 포수 후 배액의 중단 시점에서 위조가 나타나는 시점 사이의 배지 내 수분함량으로 봤을 경우(Fig. 4 and 5), 실험 결과 실험에 사용한 배지의 경우 유효 수분량은 30% 정도인 12kg인 것으로 나타났다. 실험결과(Fig. 1 and 4)에서 배액 되지 않고 배지에 남아있는 수분량은 하루 5kg 이상이어야 수분스트레스를 받지 않는 점을 고려할 때, 배지의 수분보수력은 토마토의 수분 요구도를 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

두 번째 실험 종료시 조사한 배지의 수분함량(함수율)은 S-2, M-2 및 L-2에서 각각 무게비로 19, 45 및 35%로, 유효수분이 소립 펄라이트인 S-2에서 월등히 많은 것으로 나타났다. 이는 이전 보고(Sim 등, 2006)에서의 물리성 및 수분보수 양상을 뒷받침하고 있다. 식물의 생체중은 S-2, M-2 및 L-2에서 각각 505, 603 및 553g이었으며, 식물의 건물물은 23% 정도로 처리간 차이가 인정되지 않았다.

배지 내 수분이 감소함에 따라 배지 내 양분 농도의 변화가 발생할 가능성이 있는데, 실험 종료 후 배지의 EC를 측정된 결과(Table 1), L-2의 경우 2.23

Table 1. Values of pH and EC in perlite substrate 6 days after irrigation was stopped in the second experiment.

Treat	pH	EC (dS·m ⁻¹)
L-2	7.75	2.23
M-2	7.15	2.34
S-2	7.49	1.83
No plant	7.62	1.35

The distribution of particle sizes is 1-3 mm in S-2, 0.15-5 mm in M-2 and 1.2-5 mm in L-2.

dS·m⁻¹, M-2 2.34dS·m⁻¹, S-2 1.83dS·m⁻¹로 높아지는 경향을 나타냈으나, 식물이 없는 경우에는 1.35dS·m⁻¹로 변화가 없었다. 양분이 고농도로 되면 같은 양의 수분이 배지에 존재하더라도 배지의 수분 포텐셜이 더 작아져 수분흡수가 일어나기 어려워진다(Raviv 등, 2004). S-2의 무게는 실험개시 시에는 가장 무거웠으나 종료 시에는 가장 가벼워 수분흡수량이 다른 배지에 비해 많았는데(Fig. 4), 배지 내 양분농도가 가장 낮게 유지된 것이 기여했을 가능성도 있다.

배지로부터의 수분 흡수 속도와 식물의 위조 현상을 조사한 결과, 토마토의 펄라이트 자루재배에서는 생산자의 극한 상황에 따라 하루 1회 관수도 가능한 것으로 나타났다. 이는 펄라이트는 입도분포에 따라 다르기는 하지만 큰 수분 보유력을 가지고 있기 때문이다(Marfa 등, 1993). 그러나 건조일수에 따른 식물의 수분 스트레스는 식물의 생육단계, 배지 및 일조량 등에 따라 달라지므로 본 실험에 사용한 식물보다 수분흡수량이 많거나 일조량이 많은 경우에는 관수안정성에 변화를 주어야 한다.

본 실험에서와 같은 5단 수확이 끝난 토마토 6그루가 심겨져 있는 40L 크기의 펄라이트 자루의 경우, 일일적산일사량이 1,519W/m²(Fig. 1에서의 첫 번째 날) 혹은 601W/m²(Fig. 4에서의 첫 번째 날)일 때, 관수를 하루에 5회 혹은 10회 타이머를 이용하여 공급할 경우의 적정 시간을 배지별 수분흡수량(Fig. 1 및 4) 자료를 이용하여, 시간 대비 적산값을 계산하여 산출했다(Table 2). 수분흡수량은 관수개시 시각 후 자정까지의 흡수량을 이용하였고, 첫 급액을 6시 혹은 7시로 고정하여 계산했다. 관수 시각은 배지의 입도분포에 관계없이 사용가능하다. 첫 급액을 7시로 고정하고 14시에 관수를 마감하는 경우는 동절기에 해당되거나 혹은 배지를 일찍 건조시키려는 경우에 적합하다. 단,

Table 2. Recommended irrigation schedule in tomato per-lite bag culture in a day based on plant water absorption (bag volume: 40L with 6 plants).

No.	Unlimited in last supply		Supplied until 2 PM
	5 supplies a day	10 supplies a day	5 supplies a day
1	06:00	06:00	07:00
2	10:35 ^z - 11:47 ^y	09:29 - 10:19	10:03 - 10:45
3	12:26 - 13:40	10:35 - 11:47	11:31 - 12:06
4	14:09 - 14:56	11:34 - 12:42	12:45 - 13:02
5	16:13 - 16:55	12:26 - 13:35	14:00
6		13:14 - 14:20	
7		14:09 - 14:56	
8		15:06 - 15:43	
9		16:13 - 16:55	
10		17:50 - 19:30	

*The first irrigation was fixed at 06:00 or 07:00.

^zDISR is 1,519 W/m² or ^yDISR is 601 W/m²

타이머에 의한 급액제어는 날씨에 따라 급액횟수나 1 회당 급액량을 조절하지 않으면 배지가 과습하거나 건조해지기 쉬우므로 주의해야 한다. 태양광만을 이용하는 경우에는 일일적산일사량이 다르더라도 일중 변화 양상은 비슷할 것이므로 본 설정시간에 준해서 운용해도 될 것으로 사료된다. 날씨가 많이 변하거나 생육단계가 크게 진행되지 않으면 일정 기간 동안은 급액횟수나 급액량은 유지해도 무방하다(Raviv 등, 1993).

적 요

토마토 펄라이트 자루재배에서 배지종류별 유효수분 함량을 분석하여 관수안정성을 구명하고, 배지 내 수분이 시간의 경과 및 일사량에 따라 변해가는 양상을 조사함으로써 타이머 제어시 관수 전략을 수립하고자 실험을 수행하였다. 5단 수확이 끝난 토마토 6그루가 심겨져 있는 40L 크기의 펄라이트 배지를 배양액으로 포수시킨 후 배지 내 수분감소를 무게로 측정하였다. 배지 내 수분이 감소함에 따라 일중 무게 변화량도 감소하는 경향을 나타냈다. 무게 감소가 계속된 시간에서 다음으로 무게 감소가 계속된 시간까지 걸리는 시간 간격을 볼 때, 일중 최장 무게 변화와 흡수속도가 모두 점차 늦어지는 현상이었다. 즉, 수분스트레스에 의해 식물활력의 회복이 일출 후 점차 느려지는 것으

로 나타났다. 실험에 사용한 배지의 경우 유효수분량은 30% 정도로 12kg이므로 배지의 수분보수력은 토마토의 수분 요구도를 만족하는 것으로 나타났다. 본 실험에서와 같은 상황일 경우 일일적산일사량이 1,519W/m² 혹은 601W/m²일 때, 관수를 하루에 5회 혹은 10 회 타이머를 이용하여 공급할 경우의 적정 시간을 도출했다.

주제어 : 관수제어, 급액마감시간, 수경재배, 위조, 적산일사량

사 사

이 논문은 농림기술개발사업 연구비에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

1. Choi, E.Y., Lee, Y.B. and J.Y. Kim. 2001. Determination of total integrated solar radiation range for the optimal absorption by cucumber plant in different substrates. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 42:271-274 (in Korean).
2. Hardy, L., P. Koluvek, and T. Spofford. 1989. Electronic advance and opportunity timers for irrigation evaluations. Amer. Soc. Agr. Eng. 89:2555-2566.
3. Humpherys, A.S. 1995. Semi-automation of irrigated basins and borders. III. Control elements and system operation. Appl. Eng. Agr. 11:83-91.
4. 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. 45:127-130.
5. Lorenzo, P., E. Medrano, and M.C. Sanchez-Guerrero. 1998. Greenhouse crop transpiration: An implement to soilless irrigation management. Acta Hort. 458:113-119.
6. Marfa, O., A. Martinez, R. Orozco, L. Serrano, and F.X. Martinez. 1993. The use of fine-grade perlites in lettuce bag cultures. II Physical properties, rheologic effects and productivity. Acta Hort. 342:339-348.
7. Matsuno, A. 1990. The guide book of rockwool culture-Retarding culture of tomato plant. pp. 33-41. The national agricultural cooperative union, Tokyo.
8. Orozco, R. and O. Marfa. 1995. Granulometric alteration, air-entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. Acta Hort. 408:147-161.
9. Raviv, M., S. Medina, Y. Shamir, and Z. Ben-Ner.

1993. Very low medium moisture tension-a feasible criterion for irrigation control of container-grown plants. *Acta Hort.* 342:111-119.
10. Raviv, M., R. Wallach, and T.J. Blom. 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance-A review. *Acta Hort.* 644:251-259
11. Rural Development Administration (RDA). 2003. Survey standard of agriculture experiment. Suwon, Korea.
12. Sim, S.Y., S.Y. Lee, S.W. Lee, M.W. Seo, J.W. Lim, S.J. Kim, and Y.S. Kim. 2006. Desirable particle size distribution of perlite for tomato bag culture. *J. Bio-Environment Control* 15:231-238 (in Korean).
13. Wever, G., J.S. Nowak, O.M. De Sousa Oliveira, and A. van Winkel. 2004. Determination of hydraulic conductivity in growing media. *Acta Hort.* 648:135-143.
14. Willumsen, J. 1993. Assessment of fluctuations in water and air contents of pot substrates during plant growth. *Acta Hort.* 342:371-378.