

배액전극제어법에 의한 토마토 펄라이트 자루재배시 일중 첫 배액 제어

김성은¹ · 심상연² · 김영식^{1*}

¹상명대학교, ²경기도농업기술원

Control of Daily First Drainage Time by Irrigation Management with Drainage Level Sensor in Tomato Perlite Bag Culture

SungEun Kim¹, SangYoun Sim², and YoungShik Kim^{1*}

¹Sangmyung University, Cheonan 330-720, Korea

²Gyeonggi-do Agricultural Research & Extension Services, Hwasung 445-300, Korea

Abstract. The first drainage time in a day was controlled for precise irrigation management with low consumption of nutrient solution in tomato perlite bag culture system by measuring water level of drained water in drainage catchment part. This method automatically adjusted the irrigation time under any condition of light, temperature and humidity, resulting in stable water content in substrates. However, it was difficult to keep the time consistent as they were set. It drained with the deviation of 20 min in the treatment in which the first drainage time was set at 10:00 and 50 min in the treatment set at 10:30. The first drainage time was not constant, but the drain occurred stably before noon in the treatment of which irrigation frequency was longer than 30 min. The drainage ratio was better balanced in all the treatments using drainage level sensors than the treatment using time clock for irrigation control. High water and fertilizer efficiencies were obtained. Although the growth, total yield and sugar content were not significantly different between the treatments, fruit weight was higher in the treatments using drainage level sensors than that using timer.

Additional key words: fertilizer use efficiency, irrigation control, *Solanum lycopersicum*, substrate water content, water use efficiency

서 언

수경재배에서 급액제어는 작물의 생육과 수량을 결정짓는 매우 중요한 요인이다. 또한 급액제어는 작물의 생육을 최적화하여 수확량을 극대화하기 위함이 목적이거나, 이와 함께 경제성도 중요하게 고려하여야 한다. 즉 용수와 비료를 아끼면서 가장 높은 수익을 가져올 수 있는 고효율의 급액 제어 기술이 필요하다. 우리나라에서 가장 일반적으로 사용하는 급액제어 방법은 타이머 제어법이며, 일사량 제어법이 일부 사용되고 있으며, 배액전극제어법의 사용이 최근 늘고 있다.

모세관현상과 물의 부착력을 이용하여 배지내 수분함량을 제어하는 방법으로 배액전극 제어법(Kim, 2003)과 심지법(Albaho와 Green, 2004) 혹은 passive법 등이 있다. 심지

법 혹은 passive법은 급액이 하부로부터 이루어져 배액이 발생하지 않아서 배양액의 손실은 적으나, 배지 상부에 염류 집적이 발생할 위험성과 작물생육에 따른 활력변화에 적극적으로 반응하는 자발적 수분공급이 이루어지기 어려운 단점을 가지고 있다. 배액전극 제어법은 재배를 바닥에 친수성 매트가 있어 배지로부터 나오는 배액이 집액되었다가 배지가 건조해지면 재배들의 배액이 다시 모세관현상에 의해 배지로 재흡수되는 현상을 이용하여 급액을 제어하는 방법이다. 배액전극 제어법은 배지 상부에서 급액이 이루어지므로 심지법 혹은 passive법이 가지는 배지 상부의 염류집적이거나 작물생육에 수동적인 수분공급의 문제점을 상당부분 해결할 수 있는 급액제어 방법이다(Kim, 2003). Sim 등(2006)은 토마토 펄라이트 자루재배에서 타이머 제어법과 일사량 제어법, 배액전극 제어법을 비교 실험한 결과 배액전극 제

*Corresponding author: youngskim@ymail.com

※ Received 16 December 2009; Accepted 8 February 2010. 이 논문은 농촌진흥청 연구비에 의하여 연구되었음.

어법이 작물의 생육과 배지내 수분조절에 가장 바람직한 제어법이라고 보고했다.

고형배지를 이용한 수경재배에서는 반드시 배액을 발생 시켜야 한다. 배액은 배지내 양수분 분포를 균일하게 하는데 매우 중요한 개념이다. 일중 첫 배액시각은 배지내 과습 혹은 건조상태를 판단할 수 있는 좋은 척도가 된다. 배지내 수분상태는 수분센서를 사용하여 측정 및 관리할 수는 있으나, 현실적으로 현장 적용에 문제가 있으며, 대표적인 지표 개발함으로써 개별 측정에 의한 위험성을 회피하고 편리성을 추구할 수 있다. 그러나 현재 급액제어에서 대부분의 연구가 급액량과 시점, 수분공급에 영향을 주는 외부요인에 대하여 수행되었고, 배액에 대한 연구로는 착과기에 배액률과 착과수나 상품률의 관계에 대한 연구(Kang, 2006)가 수행되었을 뿐, 배액에 대한 개념 정립이나 영향에 대한 연구가 미비한 상황이다.

본 연구는 토마토 펄라이트 자루재배에서 급액방법으로 배액전극 제어법을 적용할 때, 일중 첫 배액시각을 조절하는 것이 효과적인 적정 관수관리방법으로 될 수 있는 지에 대한 가능성을 도출하는 한편, 배양액을 절감하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

본 연구는 2009년 3월 13일부터 경기도농업기술원 양지봉식 유리온실(폭 9.6m, 길이 16m, 측고 4.6m, 동고 7m)과 플라스틱 복층하우스(3연동, PE 이중피복, 폭 21.9m, 길이 24.4m, 측고 3.05m, 동고 4.85m)에서 수행되었다. 대과종 토마토 ‘로꾸산마루’(사카타종묘, 일본)를 2009년 3월 13일 피트모스 상토를 채운 50공 플러그 육묘판에 파종했으며, 한국형온실에서 1일 1회(오전 11시30분) 관수하며 육묘하였다. 육묘중 비료를 시비하지는 않았다. 2009년 5월 7일 본엽 9-11매, 1화방 만개시 정식하였다. 펄라이트 자루(W350×L1,200×H150mm, 용량 40L)는 정식 전날 정식용 양액으로 포수한 후, 정식 직전 배액구를 뚫은 다음, 자루 당 3개의 구멍을 내고 한 구멍마다 2그루씩 정식하였다. 배액구는 자루의 한쪽 면에만 그루와 그루 사이의 정중앙에 바닥에서 3cm 높이에 수평으로 5cm 길이로 만들었다. 재식간격 40cm, 줄 간 간격은 2m이었다.

실험처리로는 배액전극 제어법을 적용하여 지연시간과 일일 급액단계를 조정하여 첫 배액시각을 10시와 10시30분으로 제어하는 처리와, 지연시간(급액과 급액 사이의 최소 간격)을 30분으로 배액전극 제어법을 적용하는 처리 및 timer 법 처리를 두었다. 실험특성상 실험은 단구제였으며, 각 처

리당 3반복했으며, 반복당 5자루(30개체)를 사용하였다. 모든 실험구의 일일 관수시간은 8시-17시로 하였다.

배액전극 제어법은 Kim(2003)의 방법에 준해서 적용하였다. 배액전극 제어법은 재배틀의 가운데에 배지를 올려놓고, 관수 후 배액이 발생하면 배지보다 아래 부분에 배액이 모이도록 하고, 배지의 밑면보다 낮은 일정 높이의 부분에 배액구를 만들어 배액이 배액구보다 높을 경우에는 배액구를 통해서 배액이 배출되도록 하는 장치를 구축한 것이다. 배지와 재배틀 사이에는 친수성 매트가 연결되어 있어 배지가 건조해지면 재배틀의 배액이 모세관 현상에 의해 배지로 재흡수되는 현상을 이용하여 점적관으로 급액을 개시하는 제어법으로 배양액의 공급은 자동공급장치(Agronic 4000, Spain)를 이용하여 공급하였다. timer법은 매일 11회(8시, 9시20분, 10시30분, 11시30분, 12시30분, 1시, 1시30분, 2시, 3시, 4시, 5시) 급액하였다(Table 1).

처리시작시 급액량은 1회에 그루당 36mL씩 하였다. 이후 생육단계에 따라 배액률 15-20%를 고려하여 1회당 70, 130, 170, 240mL/주로 점차 늘렸다가 수확시기에 130mL/주로 줄였다. 사용한 배양액은 Yamazaki 토마토 전용배양액이었으며, pH 7.0, EC 1.0dS·m⁻¹로 조정하였다.

각 처리는 급액제어용 재배틀과 급액과 배액의 측정을 위한 측정 베드와 중량센서로 구성하였다. 중량 센서로는 로드셀(model: SB-50L, CAS Corporation, Korea)을 사용하였으며, 중량값은 지시계(AI-1600, CAS Corporation, Korea)를 통해 24채널 멀티플렉서(MOXA Corporation, Korea)에 연결되도록 설계하였고 1분마다 저장하였다. 실험에 사용한 펄라이트 자루의 무게는 5.8kg이었으며, 실험에 사용한 다른 배지자루와 같은 방법으로 포수를 한 후 배액구를 뚫었을 때 최대수분보유량은 14.6L이었다.

재배시 측지는 7cm 이상에서 제거했으며, 지제부의 측지는 제거하지 않았다. 2009년 6월 3일부터 매주 3회 맑은 날에 착과제(토마토톤, 영일화학)를 500배 희석하여 살포하였다. 수확은 과실이 80%정도 착색되었을 때 처리별, 화방별

Table 1. Treatment code and the corresponding irrigation frequency using level sensors for drained water.

Treatment ²	Irrigation frequency
T-30	30 min (all day)
T-1000	50 min (8:00-9:40), 5 min (9:41-10:00), 30 min (10:01-17:00)
T-1030	70 min (8:00-10:20), 5 min (10:21-10:30), 30 min (10:31-17:00)

²T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage times controlled by level sensors for drained water.

로 수확하였고, 상품과와 기형과(배꼽씩음과, 창문과 등), 당도 등을 조사하였다. 5단 적심하였으며, 2009년 7월 3일에 1단 수확을 시작으로 7월 10일에 2단, 7월 20일에 3단, 7월 27일에 4단, 8월 3일에 5단의 수확을 시작하여 8월 10일에 수확을 종료하였다.

생육조사는 2009년 6월 29일과 8월 10일 2차례 실시하였고, 처리별로 12주씩 생체중, 초장, 엽장, 엽폭, 경경, 마디수 등을 측정하였다. 각각의 개체에서 가장 긴 잎을 선정하여 엽장과 엽폭을 측정하였고, 경경은 배지에 가장 가까운 지제부의 넓은 부분을 측정하였다.

실험기간 중 사용된 급액량을 조사하여 WUE(water use efficiency, 수분이용효율)와 FUE(fertilizer use efficiency, 비료이용효율)를 계산하였다. WUE와 FUE는 각각 단위 생산량에 소요된 용수나 비료의 양을 의미하는데, WUE는 재배기간 동안 사용된 용수의 총량(L)을 상품과량(kg)으로 나누어 백분율로 표시했으며 FUE는 재배기간 동안 사용된 비료의 총량(g)을 상품과량(kg)으로 나누어 백분율로 표시하였다. 통계처리에는 SAS 통계패키지를 이용하였다.

결과 및 고찰

배액전극 제어법이 타이머 제어법에 비해 다양한 일일 적

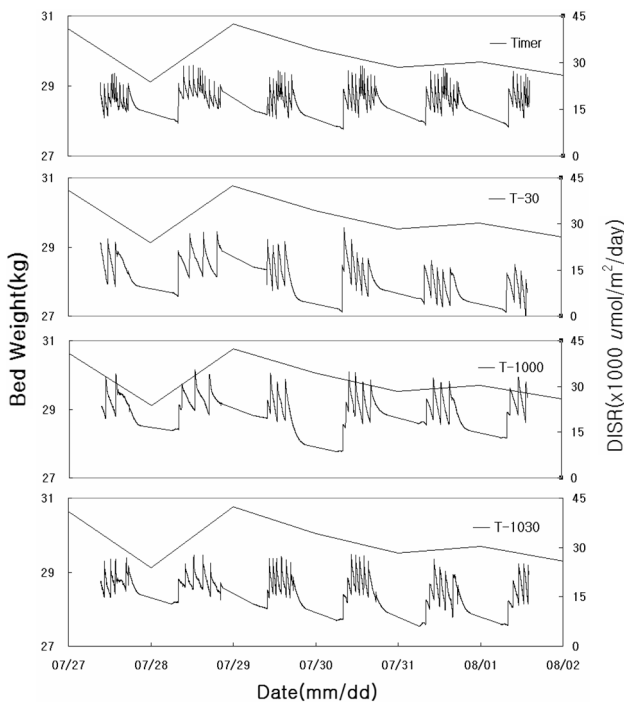


Fig. 1. Bed weight and daily integrated solar radiation (DISR) with irrigation method. Timer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage time controlled by level sensors for drained water.

산일사량, 온도, 습도에서도 식물체의 요구에 능동적으로 급액 횟수가 변하며 배지내 수분함량이 안정적으로 유지되었다(Fig. 1). 전 생육기간중 배지내 수분함량은 유사한 경향을 보였다(자료 미제시). 이는 급액방법으로 적용한 배액전극 제어법이 작물의 생육기간동안 필요로 하는 배지내 적정 함수율 변화에 민감하게 반응하는 것으로 판단하였다. 따라서 배액전극 제어법은 생육시기에 관계없이 작물이 필요로 하는 고유의 적정 함수율 변화에 적극적으로 대처가 가능한 급액방법임을 확인하였다. 타이머 제어법은 일일 적산일사량이나 온도, 습도와 상관없이 급액제어를 실험자(재배자)의 경험에 기초하여야 하며, 날씨의 변화에 대해 급액횟수나 1회 급액량을 수동적으로 조절하여야 하는 단점(Matsuno, 1990)을 확인하였다. 또한 날씨에 상관없이 급액이 되어 흐린 날은 과습되기 쉽고, 맑고 더운 날에는 건조해지기 쉬웠다.

배액전극 제어법을 적용하여 일중 첫 배액시각을 10시로 제어한 급액처리(T-1000)가 다른 처리구보다 목표한 첫 배액시각에 가깝게 배출되었다(Fig. 2). 그러나 작물의 생육특성상 목표한 첫 배액시각을 정확히 맞추는 것은 어려웠으며, T-1000 처리는 전후 30분, T-1030 처리는 전후 50분 정도의 오차범위를 나타내었다(Table 2). 첫 배액시각의 제어를 고려하지 않고 지연시간 30분으로 제어한 T-30의 경우, 일중 첫 배액시각은 일정하지 않았으나 오전 중에 첫 배액이 발

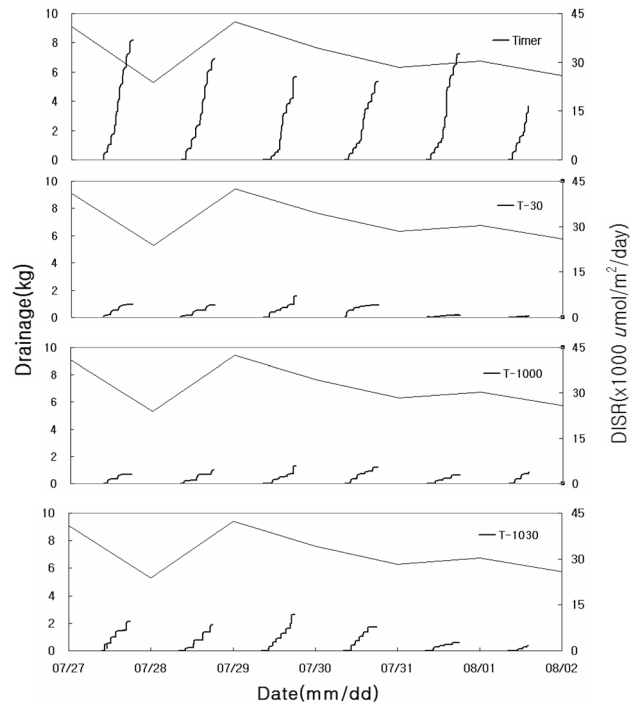


Fig. 2. Quantity of daily drainage (kg) with irrigation method. Timer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage time controlled by level sensors for drained water.

Table 2. Time of the daily first drainage measured for 6 days.

Treatment ^z	July 27	July 28	July 29	July 30	July 31	Aug. 1
Timer	9:27	9:14	10:01	9:26	9:09	9:27
T-30	9:26	8:04	8:42	8:04	8:05	8:06
T-1000	9:28	9:59	10:04	9:48	10:23	9:48
T-1030	9:32	10:00	9:58	10:27	9:59	11:10

^zTimer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage times controlled by level sensors for drained water.

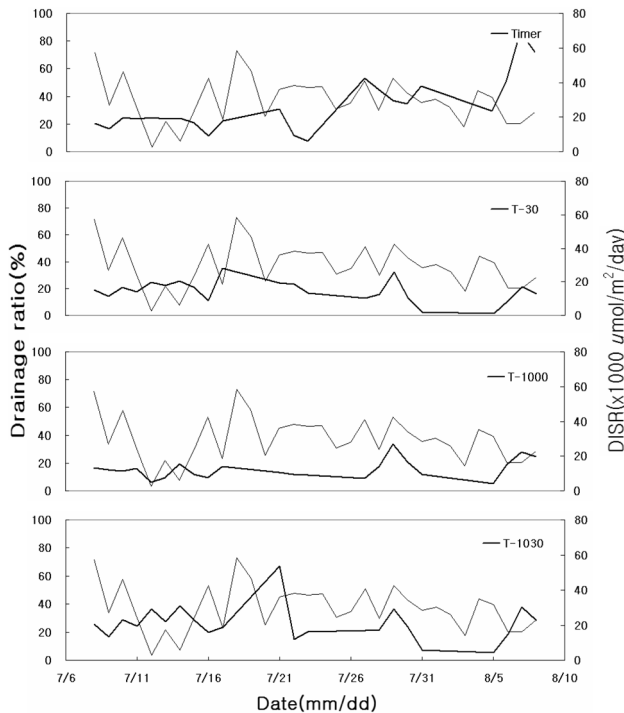


Fig. 3. Daily drainage ratio (%) with irrigation method. Timer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage time controlled by level sensors for drained water.

생하였다. 타이머 제어법은 날씨와 상관없이 급액이 되어서, 비가 오거나 흐린 날은 배액률이 50-80%였고, 맑고 더운 날에는 배액률이 10% 이하일 때도 있어서 배액률이 매우 불규칙했다.

배액전극 제어법을 적용한 처리구들은 평균 배액률이 10-22%를 나타냈으며, 특히 T-1000의 경우 평균 배액률이 13-20%를 유지하여 좀 더 균일한 값을 나타냈다. 배액전극 제어법을 적용한 처리구의 경우, 급액량과 배액량이 DISR (daily integrated solar radiation)에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 이에 반해 타이머 방법은 배액량과 배액율의 편차가 심하여 작물이 수분을 요구하는 때에 충분한 수분을 공급하지 못하고 흐린 날에는 너무 과다한 수분이 공급되었다 (Fig. 3). 단, 7월 21일 T-1030에서 배액량이 급증한 것은 이 처리구의 펌프고장에 의한 과다급액에 그 이유가 있었다.

An 등(2005)의 실험에서 배액률이 높을수록 초장이 길고, 분지수가 많아져 웃자람을 확인하였다고 했으나, 본 실험에서는 배액률이 가장 많고, 균일하지 못했던 타이머법 처리구와 비교적 균일한 배액률을 보인 배액전극 제어법 처리구 모두 비슷한 초장과 분지수를 나타내었다. 초장 대비 생체중량은 T-1030 처리구가 가장 우수했으나 통계적 유의성은 없었다(Table 3, 4).

총수확량과 당도 등은 처리간 차이를 보이지 않았다 (Table 4). 또한, 모든 처리구에서 상품과율이 높게 나타났다. 그러나 평균과중은 배액전극 제어법이 타이머법 보다 다소 무거웠으며, 배액전극 제어법 처리구의 차이는 없었다. 타이머법은 총수확량은 많았지만 과실중량이 작은 과실이 많아서 평균과중이 작았다. 이에 반해 배액전극 제어법은 과실수량은 적었으나, 각각의 과실중량이 무거워서 평균중량이 컸다. 이는 배액전극 제어법이 영양생장과 생식생장

Table 3. Growth characteristic of tomato in perlite bag culture with irrigation method on August 6, 2009.

Treatment ^z	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diameter (mm)	Number of node
Timer	141	35.8	25.5	11.6	19.5
T-30	153	34.3	23.9	10.4	21.1
T-1000	158	35.8	25.5	10.9	20.6
T-1030	131	32.3	21.7	10.0	17.7
F-test	ns	ns	ns	ns	ns

^zTimer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage times controlled by level sensors for drained water.

Table 4. Growth characteristic of tomato in perlite bag culture with irrigation method on September 3, 2009.

Treatment ^z	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diameter (mm)	Number of node (unit)	Fresh weight (g/plant)
Timer	257	43.5	36.8	13.2	34.1	511
T-30	264	39.6	35.2	11.8	34.1	496
T-1000	272	42.2	38.0	11.7	34.8	480
T-1030	246	43.6	36.8	12.3	32.2	612
F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^zTimer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage times controlled by level sensors for drained water.

Table 5. Yield and fruit quality of tomato in perlite bag culture with irrigation method on August 6, 2009.

Treatment ^z	Total yield (g/plant)	Marketable yield (g/plant)	Average fruit weight (g/plant)	Malformed fruit (g/plant)	Marketable yield ratio (%)	Sugar content (°Brix)
Timer	1624	1613	133	10.8	99.3	4.9
T-30	1796	1796	149	0	100	4.9
T-1000	1375	1324	154	51.8	96.1	5.0
T-1030	1378	1330	160	48.0	96.4	4.8
F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^zTimer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage times controlled by level sensors for drained water.

Table 6. Water use efficiency (WUE) and fertilized use efficiency (FUE) with irrigation method.

Treatment ^z	Water (L/plant)	Fertilizer (g/plant)	Marketable yield (kg/plant)	WUE (L/kg)	FUE (g/kg)
Timer	138.2	79.3	1.6	89.8 a ^y	51.5 a
T-30	77.6	44.5	1.8	44.1 d	25.3 c
T-1000	68.2	39.1	1.3	52.4 c	30.0 bc
T-1030	81.8	46.9	1.3	67.0 b	38.4 b
F-test	ns	ns	ns	*	*

^zTimer = controlled by time clock; T-30 = controlled by level sensor with irrigation frequency of 30 min; T-1000 and T-1030 = 10:00 and 10:30 are the first drainage times controlled by level sensors for drained water.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P=0.05$.

모두에서 작물이 요구하는 적정 함수율을 만족시키는 매우 효과적인 관수방법임을 제시하였다(Table 4, 5).

급액제어의 효율을 판단하기 위해 실험기간 중 사용된 급액량을 조사하여 WUE와 FUE를 계산한 결과, 1kg의 과실을 수확하는데 배액전극 제어법에서는 44.1-67.0L의 물과 25.3-38.4g의 비료를 소비한 반면, 타이머 제어 처리구에서는 89.8L의 물과 51.5g의 비료를 소비한 것으로 나타났다. 즉, 타이머 제어 처리구에서는 배액전극 제어법에서보다 WUE와 FUE가 약 49% 정도 높아 1kg의 과실을 수확하는데 물과 비료를 그 만큼 많이 소비하는 것으로 판명되었다(Table 6). 배액전극 제어법 처리간의 차이에서는 T-30 처리구에서 WUE와 FUE가 가장 경제적이었다. 이러한 결과는 Bhattarai 등(2006)이 토양실험에서 보고한 WUE 78(L·kg⁻¹),

Martin와 Thorstenson(1988)이 토양실험에서 보고한 WUE 69(L·kg⁻¹) 보다도 경제적인 것이었다. WUE와 FUE는 토양 재배와 수경재배 간에도 차이가 있으며(Rouphael et al., 2005), WUE와 FUE를 높이는 방법으로는 환경관리(Zabri와 Burrage, 1998), 재배법(Abou-Hadid 등, 1993), 배양액관리(Warren와 Bilderback, 2004) 등 여러 가지가 있는데, 이 실험에서 급액관리법의 중요성을 확인할 수 있었다. 첫 배액시간 조절 처리간 차이는 크지 않았다.

배지경 재배시 배액률을 보통 20-30%로 유지하는 것으로 알려져 있으나(Roh, 1997; Schon과 Compton, 1997), 본 실험의 배액전극 제어법을 적용한 처리구에서는 10-22%로 유지되었다. 본 연구에서의 배액률은 생육이나 수확량에 영향을 주지 않았고, 타이머제어 처리구보다 배액률이 적어서

WUE와 FUE를 낮추어 상대적으로 경제성을 높여주었다.

급액방법으로서 배액전극 제어법은 타이머 제어법에 비해 작물의 생육시기별로 변화하는 수분요구에 적극적으로 반응하며, 배액율을 비교적 균일하게 유지하였다. 또한 WUE와 FUE를 분석한 결과 매우 경제적인 급액방법임을 본 실험을 통해 확인하였다. 그러나 일중 첫 배액시각 제어는 토마토 생육과 생산량에는 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서 일중 첫 배액시각과 배액량뿐만 아니라 토마토 생육에 영향을 주는 광량, 광도, 습도, 온도, 작물의 엽면적지수 및 수광량 등 다양한 요인들에 대한 복합적인 영향에 대한 실험이 수행되어야 한다고 사료된다. 또한, 수경재배에서 배액량과 첫 배액시각은 배지의 과습 혹은 건조상태를 판단하는 중요한 근거가 되므로 이 분야에 대한 보다 심도 있고 다양한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 사료된다.

초 록

배액전극 제어법을 이용한 토마토 펠라이트 자루재배에서 일중 첫 배액시각을 조절함으로써 적정관수법을 도출하고 배양액을 절감하기 위해 수행되었다. 배액전극 제어법은 다양한 일일 적산일사량, 온도, 습도에서도 식물체의 요구에 능동적으로 급액회수가 변하며 배지의 무게가 안정적으로 유지되었다. 작물의 생육특성상 목표한 첫 배액시각을 정확히 맞추는 것은 어려웠으며, 일중 첫 배액시각을 10시로 제어한 급액처리에서 전후 20분, 10시30분으로 제어한 급액처리에서 전후 50분 정도의 오차범위를 나타내었다. 일중 첫 배액시각은 고려하지 않고 30분 이내에는 관수가 반복되지 않도록 제어한 처리에서는 일중 첫 배액시각은 일정하지 않았으나 실험기간동안 오전 중 첫배액 발생이 고르게 나타났다. 배액전극 제어법은 타이머법에 비해 배액율이 비교적 균일하게 유지되었고, 수분이용효율과 비료이용효율의 분석 결과 매우 경제적인 급액방법이었다. 생육과 총수확량, 당도 등은 처리간 차이가 뚜렷하지 않았으나, 평균과중은 배액전극 제어법이 타이머법보다 컸다.

추가 주요어 : 비료이용효율, 관수제어, 토마토, 배지 수분함수율, 수분이용효율

인용문헌

Abou-Hadid, A.F., M.Z. El-Shinawy, A.S. El-Beltagy, and S.W.

- Burrage. 1993. Relation between water use efficiency of sweet pepper grown under nutrient film technique and rockwool under protected cultivation. *Acta Hort.* 323:89-96.
- Albaho, M.S. and J.L. Green. 2004. Comparative study on the effect of two greenhouse production system on selected tomato cultivars. *Acta Hort.* 648:91-97.
- An, C.G., Y.H. Hwang, H.S. Yoon, H.J. Hwang, G.M. Shon, G.W. Song and B.R. Jeong. 2005. Effect of drain ratio during fruiting period on growth and yield of sweet pepper in rockwool culture. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 23:256-260.
- An, C.G., Y.H. Hwang, H.S. Yoon, H.J. Hwang, C.W. Rho and B.R. Jeong. 2005. Effect of first irrigation time after sunrise on fruit quality and yield of sweet pepper in rockwool culture. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 23:146-152.
- Bhatarai, S. P., L. Pendergast and D.J. Midmore. 2006. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils. *Sci. Hort.* 108:278-288.
- Kang, N.J., M.W. Cho, J.K. Kweon, H.C. Rhee and Y.H. Choi. 2006. Effects of deficit irrigation on the total soluble solids and fruit yields of fresh tomato. *J. Bio-Environ. Cont.* 15:335-339.
- Kim, Y.S. 2003. Possibility of water management in hydroponics by electrical signal. *Industrial Science Researches of Sangmyung University* 14:1-10.
- Martin, B. and Y.R. Thorstenson. 1988. Stable carbon isotope composition (^{13}C), water use efficiency, and biomass productivity of *Lycopersicon esculentum*, *Lycopersicon pennellii*, and the F1 Hybrid. *Plant Physio.* 88:213-217.
- Matsumo, A. 1990. The guide book of rockwool culture-Retarding culture of tomato plant. pp. 33-41. The national agricultural cooperative union, Tokyo.
- Roh, M.Y. 1997. Development of irrigation control system based on integrated solar radiation and nutrient solution suitable for closed system in substrate culture of cucumber. PhD. Diss., Univ. of Seoul, Seoul, Korea.
- Rouphael, Y., G. Colla, M. Cardarelli, S. Fanasca, A. Salerno, C.M. Rivera, A. Rea, and F. Karam. 2005. Water use efficiency of greenhouse summer squash in relation to the method of culture: Soil VS. soilless. *Acta Hort.* 697:81-86.
- Schon, M.K. and M.K. Compton. 1997. Comparison of cucumbers grown in rockwool or perlite at two leaching fractions. *Hort-Technology* 7:30-33.
- Sim, S.Y., S.Y. Lee, S.W. Lee, M.W. Seo, J.W. Lim, S.J. Kim and Kim, Y.S. 2006. Characteristics of root media moisture in various irrigation control methods for tomato perlite bag culture. *J. Bio-Environ. Cont.* 15:225-230.
- Warren, S.L. and T.E. Bilderback. 2004. Irrigation timing: Effect on plant growth, photosynthesis, water-use efficiency and substrate temperature. *Acta Hort.* 644:29-37.
- Zabri, A.W. and S.W. Burrage. 1998. The effects of vapour pressure deficit (VPD) and enrichment with CO_2 on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) of sweet pepper (*Capsicumannum*L.) grown by NFT. *Acta Hort.* 458:351-356.