

시설오이 지중관비시 자동관수센서의 적정 매설깊이

임태준* · 김기인^{1†} · 박진면 · 노재승

국립원예특작과학원 원예특작환경과, ¹미네소타대학교 토양, 물 및 대기학과

Estimation of the Optimum Installation Depth of Soil Moisture Sensor in an Automatic Subsurface Drip Irrigation System for Greenhouse Cucumber

Tae-Jun Lim*, Ki-In Kim^{1†}, Jin-Myeon Park, and Jae-Seung Noh

Horticultural & Herbal Crop Environment Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Suwon, 441-440, Korea.

¹*Department of Soil, Water, and Climate, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108, the United States.*

Vegetables production in greenhouse are typically intensely managed with high inputs of fertilizers and irrigation water, which increases the risk of ground-water nitrate contamination. In 2010 and 2011, a study was conducted to determine the appropriate depth of soil moisture sensor for automatic irrigation control to use water and nitrogen efficiently under subsurface drip irrigation (SDI) systems. The irrigation line for SDI placed 30 cm below soil surface and tensiometer was used as soil moisture sensor. Three tensiometer treatments placed at 10 (SDI-T10), 20 (SDI-T20) and 30 cm (SDI-T30) depths below soil surface under SDI. These are also compared to SUR-T20 treatment where tensiometer placed at 20 cm below soil surface under surface drip irrigation (SUR) systems. The growth of cucumber was not statistically different between SUR and SDI without SDI-T30 treatment. Fruit yields (Mg/ha) were 57.0 and 56.9 (SDI-T10), 56.0 and 60.5 (SDI-T20), 40.9 and 41.2 (SDI-T30) and 56.6 and 54.3 (SUR-T20) for 2010 and 2011, respectively. Slightly higher total yield was observed in tensiometer placed 20 cm below the soil surface, although no significant differences were found between SDI-T10 and SDI-T20 under SDI treatments. In addition, nitrogen application rates and daily irrigation rates were lowest in SDI-T20 compared with other SDIs and SUR treatments. Nitrogen and daily irrigation application under SDI-T20 was lower than that under SUR-T20 by 6.0%. These findings suggested tensiometer 20 cm depth under SDI systems was best for cucumber production in greenhouse.

Key words: Subsurface drip irrigation, Tensiometer, Soil depth, Cucumber

서 언

농업을 영위하는데 있어 물은 생명을 유지하는 기초 자원이며 용수량이 확보되지 않고는 안정적인 작물생산이 불가능하다 (Kwon et al., 2009). IPCC (Inter-governmental Panel on Climate Change) 보고서에 따르면 기온 1°C 상승 시에 농업용수의 수요량은 10% 증가를 하게 되며, 2060년 우리나라에서 최대 33억톤의 물 부족이 전망되고 있다 (IPET, 2012). 특히, 국내에서 농업용수로 쓰이는 물의 양은 생활용수 및 공업용수를 포함한 전체 수자원 이용량의 47%인 160 억톤을 사용하고 있어

전체 용수사용량에서 차지하는 비중이 크기 때문에 효율적인 물 사용을 위한 체계적인 물 관리가 시급한 과제로 대두되고 있다.

우리나라 시설온실의 재배면적은 1980년에 7,141 ha에서 2010년에 48,835 ha로 6.8배 증가하였으며, 또한 1년에 여러 번 작물을 재배하기 때문에 많은 양의 물이 필요하다 (Park et al., 2012). 시설에서는 과채류 재배의 영향으로 점적호스를 이용한 관수가 가장 많은 전체의 40.2%인 19,651 ha에서 사용되고 있다 (MIFAFF, 2011). 하지만 시설에서의 점적관수는 거의 대부분 지표관수 방법을 이용하고 있다. 지중관수는 지표면 아래 10-40cm의 깊이에 관수호스를 매설하는 방법으로 도입초기인 1970년대에는 관수호스에 구멍이 막히거나 뿌리가 관수호스를 막는 등 문제점이 있어 실용화되지 못하였다 (Blass 1971). 그러나 현재에는 이러한 문제점을 개선한 관수자재가 개발되어 사용되고 있다 (Bucks et al., 1981; Ayars et al., 1999). 지중관

접수 : 2013. 3. 7 수리 : 2013. 4. 8

* 연락처 : Phone: +82312906263

E-mail : taejun06@korea.kr

† 공동 제1저자

수는 관수시설을 철거하지 않고 계속 사용할 수 있으며 지표에 설치하였을 때보다 포장관리가 용이하며 잡초의 발생이 적다 (Park et al., 2012). 또한 지표관수는 점적기를 통해서 토양표면에서 작물의 뿌리로 양수분이 이동해야 하는 반면에 지중관수는 작물의 뿌리 부근에서 양분과 수분이 직접 공급이 되므로 지표층에서의 수분 증발이 적고 지표관수보다 관수한 수분이 넓게 퍼짐으로써 물의 이용률이 높은 이점이 있다고 보고되고 있다 (Camp et al., 1997; Zhuge et al., 2004). 이스라엘과 미국에서는 지중점적 시스템의 개발이후 지속적으로 사용이 증가하고 있으나 (Camp, 1998), 아직 우리나라에서는 지중관수를 이용한 시설채소 재배가 거의 없는 상황이다.

지중관수는 잡초 및 병해발생을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 농작업을 용이하게 하는 등 많은 이점이 있기 때문에 (Phene et al., 1987; Ayars et al., 1999), 우리나라에서도 시설하우스를 이용한 과채류 재배에서 노동력 뿐 아니라 물 및 비료절감 측면에서 지중점적 관수 시스템의 이용이 늘어날 것으로 전망된다. 지중 점적호스는 설치 및 회수가 필요없이 다년간 사용할 수 있고 경운에 의한 파손이 발생하지 않는 30 cm이상의 깊이에 매설하여 사용하고 있다 (Camp, 1998; Martinez Hernandez et al., 1991; Phene et al., 1991; Zhuge et al., 2004). 하지만 점적호스의 지중매설 시에 물을 공급하는 관수조절센서의 감응위치에 따라서 물 및 관비 공급량에 대한 차이가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 지중관수를 이용한 시설 오이재배에서 점적호스를 30 cm의 깊이에 매설 시 관수조절센서의 적정 깊이를 구명하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시설재배지의 토양은 사양토로서 토양pH는 7.1이며 유기물은 적정 기준인 20~30 g kg⁻¹보다 낮은 함량을 나타내었다 (Table 1). 3요소는 토양검정 시비량을 기준으로 인산 및 칼리는 전량 멀거름으로 시비하였다. 질소의 시비량은 2010년과 2011년에 각각 50 및 70 mg L⁻¹의 농도로 작물 정식 후부터 재배가 끝날 때까지 물을 공급할 때마다 관비의 형태로 공급하였다. 자동관수조절은 토양수분장력계인 텐시오미터(Irrrometer Company Inc, USA)를 활용하였으며, 관수 개시점으로 -10 kPa에 도달하면 10분 동안 1일 6회에 걸쳐서 물이 자동으로 공급될

수 있도록 하였다. 처리는 지중관수에서는 텐시오미터를 10, 20, 30 cm의 매설깊이로 배치한 3처리와 더불어서 지표관수에서는 텐시오미터 20 cm를 대조구로 하는 4처리 3반복 난괴법으로 하였다. 시험구 당 면적은 4 m²이었으며, 구당 주수는 10주를 정식하였다. 시험에 사용한 점적호스의 점적공은 20 cm간격이며 2.1 L h⁻¹의 유량으로 일정하게 공급되는 압력보상형 점적호스 (Vered, Metzlerplas Inc, Israel)를 사용하였으며, 지중관수 처리구에 대한 점적호스는 토양 30 cm의 깊이에 매설하였다.

오이는 백다다기로 2010년부터 2011년까지 4작기에 걸쳐서 재배하였다. 2010년과 2011년의 반축성작형에서는 4월 21일과 4월 8일에 정식하였고 재배기간은 각각 101과 114일 이었다. 억제작형에서는 8월 16일에 정식하였으며 재배기간은 각각 78일과 74일 이었다. 재식간격은 80 × 50 cm로 처리구당 10주를 재배하였다. 생육조사는 반축성작형에서 정식 후 50일과 85일에 초장과 엽수를 각각 조사하였다. 뿌리의 길이는 정식 후 95일에 soil column cylinder auger를 이용하여 토양 채취하였으며, 토양깊이 0-15, 15-30 cm를 분리하여 비닐팩에 담았다. 채취된 토양은 체를 이용하여 뿌리를 사별하였으며 뿌리측정은 WinRHIZO (Regent Instruments Inc, Canada)로 조사하였다.

토양분석은 2 mm 체를 통과한 풍건 시료에 대해서 토양 및 식물체 표준분석법에 준하여 실시하였다 (NIAS, 2000). 토양 pH는 토양과 물의 비율을 1:5로 하여 30분간 진탕 후 pH meter (ORION Model 720A, USA)로 측정하였고, 토양 EC는 1:5로 침출한 후 Conductance meter (YSI Model 35, USA)로 분석하였다. 유기물은 Tyurin법 (Nelson and sommer, 1996), 유효인산은 Lancaster 법으로, 치환성 K, Ca, Mg은 1N-CH₃COONH₄ (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 ICP-OES (MX2, GBC, Australia)를 사용하여 측정하였다. 질산태 질소는 2M KCl로 침출하여 켈달 (B-316, Büchi, Switzerland)로 증류한 후 황산 표준용액 0.01N로 적정하여 계산하였다 (Mulvaney, 1996). 식물체 시료는 70°C에서 건조 후 분쇄된 시료를 산 분해용액 (HClO₄:H₂SO₄ = 10:1)으로 습식 분해하여 질소는 Kjeldahl법 (NIAS, 2000)으로, 인산은 Ammonium-vanadate법 (Gericke and Kurmies, 1952), 칼리는 원자흡광분광분석법 (NIAS, 2000)으로 측정하였다. 통계분석은 SAS프로그램 (Enterprise guide 4.2)을 이용하였으며, Duncan의 다중검정 및 최소유의차 검정을 통해 각 처리간의 통계적 유의성을 비교 검토하였다.

Table 1. Physiochemical properties of soil used for the experiment.

Year	pH	EC	OM	Av. P ₂ O ₅	NO ₃ -N	Ex. cations			Soil texture
						K	Ca	Mg	
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----	----- cmol _c kg ⁻¹ -----				
2010	7.1±0.1	3.5±0.2	12.5±0.3	362±31	205±16	0.5±0.1	9.3±0.6	2.6±0.4	SL [†]
2011	7.1±0.2	3.7±0.3	13.2±0.3	406±36	159±21	0.4±0.1	8.2±0.4	2.0±0.2	SL

[†]Sandy loam

결과 및 고찰

오이 지중관비에서 텐시오미터 깊이별 처리에 따른 정식 후 50일 및 85일에서의 생육조사 결과는 Table 2와 같다. 초장 및 주당 엽수는 텐시오미터 20 cm에서 정식 후 50일에 65.3 cm와 12.0 매를, 정식 후 85일에는 341.3 cm와 37.7 매를 나타내어 재배기간 동안에 가장 좋은 생육을 보였다. 텐시오미터 30 cm 처리에서는 초장과 주당 엽수 등 오이 생육에 있어서 유의성 있는 감소를 나타내었다. 이러한 차이는 텐시오미터 30 cm와 점적호스의 매설 깊이가 같기 때문에 지중 30 cm의 깊이에서는 -10 kPa의 범위내에서 충분한 수분함량을 보이지만 지표면의 근처에서는 상대적으로 건조하여 오이의 생육이 저하된 것으로 판단된다. 오이 생육에 대한 지표관비와 지중관비의 비교에서는 텐시오미터 30 cm를 제외하고 지중관비에서의 초기 생육은 낮았으나 정식 후 85일에서는 지중관비 텐시오미터 20 cm 처리에서 가장 좋았다. 이는 작물 초기에는 뿌리가 지표면 근처에 많이 분포를 하므로 지표관비에서 생육이 좋았지만, 생육이 왕성한 시기에서는 오이의 뿌리가 보다 폭 넓게 뻗기 때문에 뿌리가 가장 많이 분포하고 있는 텐시오미터 20 cm에서 생육이 가장 좋은 것으로 판단되었다.

오이 뿌리깊이는 지중관비 처리간의 차이는 없었으나 텐시오미터 20 cm에서 0.87 cm cm⁻³으로 가장 높았으며 텐시오미터 30 cm 및 10cm에서 각각 0.85과 0.77 cm cm⁻³의 순으로 감소하였다 (Table 3). 토양깊이 0-15 cm는 텐시오미터 깊이별로

0.78-0.82 cm cm⁻³ 처리간에 비슷한 값을 나타내었으나, 토양 깊이가 15-30 cm에서는 텐시오미터 20 및 30 cm에서 뿌리깊이가 각각 0.91 및 0.93 cm cm⁻³를 이었으나 텐시오미터 10 cm에서는 0.74 cm cm⁻³를 보여 상대적으로 차이를 나타내었다. 이러한 경향은 텐시오미터 10 cm에서는 지중 10 cm높이까지 -10 kPa 이내로 수분이 유지되어 뿌리가 상대적으로 얇은 층위에 걸쳐서 분포한 반면에 텐시오미터 20 및 30 cm에서는 -10 kPa 이내로 수분이 유지되는 높이가 더 낮아져서 뿌리 뻗음의 길이가 보다 더 많아졌음을 알 수 있다. 또한 지표관비와의 비교에서도 지중관비 처리에서의 텐시오미터 20 cm 및 30 cm가 15-30 cm의 깊이에서 보다 높은 뿌리 깊이를 나타내었다. 이러한 점으로부터 뿌리의 밀도는 수분함량이 충분히 높은 점적공의 주위에서 높은 밀도를 나타낸다고 볼 수 있다 (Oliveira et al., 1996; Machado et al., 2003). Phene et al. (1991)은 옥수수 재배에서 지중 점적호스를 45 cm의 깊이로 매설하였을 때 30 cm의 깊이까지는 지표관수에서 뿌리의 밀도가 높았지만 30 cm 깊이 이상에서는 지중관수 처리에서의 뿌리 밀도가 높았다고 보고하였다.

지중관비에서 텐시오미터 깊이 처리에 따른 오이의 수량은 Table 4와 같다. 2년간 4작기에 걸친 오이 수량은 텐시오미터 30 cm를 제외하고 지중관비에서의 텐시오미터 10 cm 및 20 cm와 지표관비에서는 처리간의 차이없이 동일한 오이 수량을 얻을 수 있었다. 이러한 점은 지중관비에서도 지표관비와 마찬가지로 안정적 오이 수량 생산이 가능하다는 것을 시사한다. 이

Table 2. The growth of cucumber at 50 and 85 day after planting (DAP) for different buried depths of irrigation control sensor using tensiometer in semi-forcing culture of 2011.

Treatment	50 DAT		85 DAT	
	Plant height cm	Leaf number ea plant ⁻¹	Plant height cm	Leaf number ea plant ⁻¹
SDI-T10	66.0a [†]	11.9a	329.9a	36.8a
SDI-T20	65.3a	12.0a	341.3a	37.7a
SDI-T30	56.1b	10.9b	276.5b	34.1b
SUR-T20	70.3a	12.2a	337.1a	37.5a

[†]Values (n=10) with the same letters do not differ significantly at 0.05% (LSD).

Table 3. Root length density of cucumber (95 days after planting) for different buried depths of irrigation control sensor using tensiometer in semi-forcing culture of 2011.

Treatment	Root length density		
	0-15cm	15-30cm	Average
	----- cm/cm ³ -----		
SDI-T10	0.80a	0.74a	0.77a
SDI-T20	0.82a	0.91a	0.87a
SDI-T30	0.78a	0.93a	0.85a
SUR-T20	0.83a	0.79a	0.81a

[†]Values (n=3) with the same letters do not differ significantly at 0.05% (LSD).

Table 4. The fruit yield of cucumber for different buried depths of irrigation control sensor using tensiometer during 4 cropping seasons from 2010 to 2011.

Treatment	2010		2011		Total
	Semi-forcing culture	Retarding culture	Semi-forcing culture	Retarding culture	
	----- Mg ha ⁻¹ -----				
SDI-T10	38.6a	18.4a	41.7a	15.2a	113.9a
SDI-T20	38.0a	18.0a	45.1a	15.4a	116.5a
SDI-T30	25.1b	15.8b	30.8b	10.4b	82.1b
SUR-T20	39.2a	17.4a	42.0a	14.9a	113.5a

†Values (n=3) with the same letters do not differ significantly at 0.05% (LSD).

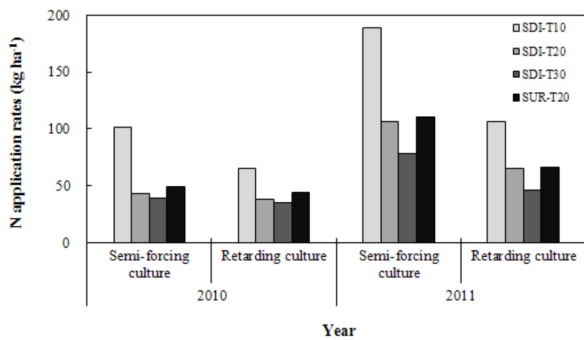


Fig. 1. Nitrogen application rates for different buried depths of irrigation control sensor using tensiometer during 4 cropping seasons from 2010 to 2011.

와 비슷한 많은 연구결과들이 있는데 Hanson et al. (1997)은 상추에서 지표관수, 지중관수 및 고랑 관수방법에 대한 수량의 차이는 보이지 않는다고 하였으며, Dogan et al. (2008)은 지표관수와 점적호스를 지표 30 cm 아래에 매설한 지중관수 방법간의 멜론의 수량은 차이없이 동일한 생산량을 보인다고 보고하였다. 또한 Kong et al. (2012)은 지중관수는 지표관수와 비교해서 고추의 수량이 2007년에 4%가 2008년에는 13%가 증가한다고 보고하였다.

오이 재배기간 동안의 질소공급량은 Fig. 1과 같다. 질소의 공급량은 반축성작형이 억제작형보다 처리간의 구분없이 평균량으로 2010년과 2011년에 각각 13 kg ha⁻¹ 및 3.0 kg ha⁻¹가 많았는데, 이는 재배기간이 각각 23일 및 40일로 길어짐에 따른 것으로 판단된다. 또한 2010년의 질소 관비농도가 50 mg L⁻¹와 비교하여 2011년도의 질소 관비농도가 70 mg L⁻¹이어서 상대적으로 2011년 오이재배에서 보다 많은 질소량이 공급되었다. 지중관비에서 텐시오미터 깊이 처리에 따른 질소공급량은 텐시오미터 10 cm에서 가장 많았으며 텐시오미터 20 cm 및 30 cm의 순서를 보였다. 텐시오미터 30 cm처리하는 질소 절감효과는 크지만 오이의 수량이 크게 감소하기 때문에 지중관비를 이용한 오이재배에서는 텐시오미터 20 cm가 가장 적합한 것으로 판단되었다. 2년 동안의 지중관비 텐시오미터 20 cm처리와 지표관비와의 작기 당 평균 질소공급량의 비교에서는 67 kg ha⁻¹의 지표

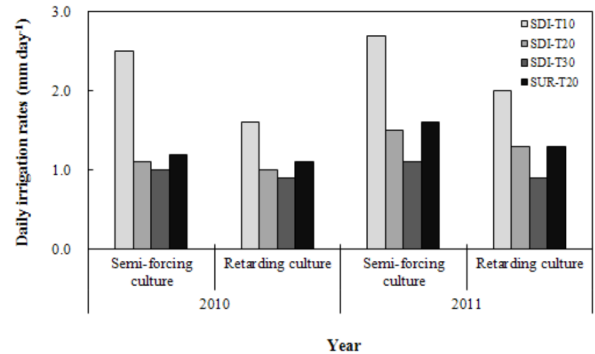


Fig. 2. Daily irrigation rates for different buried depths of irrigation control sensor using tensiometer during 4 cropping seasons from 2010 to 2011.

관비와 비교하여 지중관비에서는 63 kg ha⁻¹의 질소가 공급되어 텐시오미터 20 cm의 처리가 질소비료의 이용효율에서 보다 효과적이었다. Zotarelli et al. (2008)은 주키니 호박(*Cucurbita pepo* L.)에서 지표관비의 질소이용효율이 55.5%와 대비하여 지중관비에서는 62.8%로 보다 높은 이용효율을 나타낸 결과와 동일하였다.

오이 지중관비에서 텐시오미터 깊이 처리별 일일 관개량은 Fig. 2와 같다. 일일관수량은 질소공급량과 마찬가지로 텐시오미터 10 cm에서 관수량이 가장 많았으며 텐시오미터 20 cm 및 30 cm의 순으로 관수량은 절감되었다. 하지만 텐시오미터 30 cm처리하는 오이 수량의 감소를 보이므로 작기 당 평균 일일관수량으로 1.3 mm day⁻¹를 보인 텐시오미터 20 cm에서 오이 수량에 대한 물 이용효율이 가장 높았다. 또한 지표관비에서의 일일관수량은 1.4 mm day⁻¹를 보여 지중관비의 텐시오미터 20 cm 처리가 물 이용효율이 더욱 좋은 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 지중관수가 작물에 대한 물 및 질소 이용효율이 가장 효과적인 방법이라는 연구결과와 동일하였다 (Lamm and Trooien, 2003; Al-Omran et al., 2005). 그러므로 지중관비를 이용한 시설오이 재배에서 자동관수를 위한 텐시오미터의 적정 깊이는 20 cm로 하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단되었다.

요 약

시설오이 지중관비에서 지중 점적호스를 30 cm에 매설 시에 텐시오미터를 이용한 자동관수센서의 적정 깊이를 제시하고자 2010-2011년까지 2년간에 걸쳐서 조사하였다. 오이의 생육은 텐시오미터 30 cm 깊이에서 낮았으나 텐시오미터 10 및 20 cm에서는 유의성 있는 차이는 없었다. 1년 및 2년차 수량에서도 텐시오미터 30 cm에서 각각 40.9 및 41.2 Mg ha⁻¹로 가장 적은 생산량을 나타내었다, 텐시오미터 10 cm에서는 57.0 및 56.9 Mg ha⁻¹, 텐시오미터 20 cm에서는 56.0 및 60.5 Mg ha⁻¹로 처리간의 차이가 없이 동일한 수량을 나타내었다. 오이재배에서 한 작기 당 질소 및 일일 물 공급량은 63 kg N ha⁻¹의 질소와 1.3 mm day⁻¹로 물이 공급된 텐시오미터 20 cm 처리에서 질소 및 수분 이용효율이 높았다. 또한 토양깊이 0-30 cm에 대한 뿌리깊이에서도 텐시오미터 20 cm에서 0.87 cm cm⁻³으로 유의성은 없었지만 가장 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 시설오이에서 지중 점적호스를 30 cm 깊이에 매설 시에 텐시오미터를 활용한 자동관수센서의 적정 깊이는 20 cm인 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 시험연구사업 (과제번호 PJ007702)의 지원에 의해서 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Al-Omran, A.M., A.S. Sheta, A.M. Falatah, and A.R. Al-Harbi. 2005. Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits. *Agric. Water Manage.* 73: 43-55.
- Ayars, J.E., C.J. Phene, R.B. Hutmacher, K.R. Davis, R.A. Schoneman, S.S. Vail, R.M. Mead. 1999. Sursurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. water management.* 42:1-27.
- Blass, S. 1971. Drip irrigation. In: Drip (trickle) and automated irrigation in Israel. Water Commissioners Office, Ministry of Agriculture, Tel Aviv, Israel. 1: 10-28.
- Bucks, D.A., L.J. Erie, O.F. French, F.S. Nakayama, and W.D. Pew. 1981. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping. *Trans ASAE.* 24:1482-1489.
- Camp, C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: a review. *Trans. ASAE.* 41(5): 1353-1367.
- Camp C.R., P.J. Bauer, and P.G. Hunt. 1997. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern coastal plain. *Trans. ASAE.* 40(4):993-999.
- Dogan, E., H. Kirnak, K. Berekatoglu, L. Bilgel, and A. Surucu. 2008. Water stress imposed on muskmelon (*Cucumis Melo L.*) with subsurface and surface drip irrigation systems under semi-arid climatic conditions. *Irrig. Sci.* 26:131-138.
- Enciso, J., J. Jifon, and B. Wiedenfeld. Subsurface drip irrigation of onions: Effects of drip tape emitter spacing on yield and quality. *Agric. Water Manage.* 92:126-130.
- Gericke, S. and B. Kurmies. 1952. Die kolorimetrische phosphorsäurebestimmung mit ammonium-vandat-molybdat und ihre anwendung bei der pflanzenanalyse. *Z. Pflanzener-nährung, Dungung und Bodenkunde.* 59, 235-247.
- Hanson, B.R., L.J. Schwankl, and K.F. Schulbach. 1997. A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water. *Agric. Water Manage.* 33:139-157.
- IPET. 2012. Research and development trends about agricultural utilization of seawater against the era of water shortages. p. 1-10. Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry and Fishers. Seoul, Korea.
- Kong, Q., G. Li, Y. Wang, and H. Huo. 2012. Bell pepper response to surface and subsurface drip irrigation under different fertigation levels. *Irrig. Sci.* 30: 233-245.
- Kwon, O.S., T.H. Lee, and J.H. Heo. 2009. Valuation of irrigation water: A chance-constrained programming approach. *Journal of Korea Water Resources Association.* 42(4):281-295.
- Lamn, F.R. and T.P. Trooien. 2003. Subsurface drip irrigation for corn productivity: a review of 10 years of research in Kansas. *Irrig. Sci.* 22:195-200.
- Machado, R.M.A., M.R.G. Oliveira, and C.A.M. Portas. 2003. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation. *Plant and soil.* 255:333-341.
- Martinez Hernandez, J.J., B. Bar-Yosef, and U. Kafkafi. 1991. Effect of surface and subsurface drip fertigation on sweet corn rooting, uptake, dry matter production and yield. *Irrig. Sci.* 1991. 12:153-159.
- MIFAFF. 2011. Greenhouse status and production performance of vegetables in 2010. p. 59-73. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. Seoul, Korea.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 961-1010. *In* D.L. Sparks (ed) *Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Series No5.* SSSA and ASA. Madison, WI.
- NIAST. 2000. Method of soil and plant analysis, National Institute of Agricultural Science and Technology. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Oliveira, M.R.G., A.M. Calado, and C.A.M. Portas. 1996. Tomato root distribution under drip irrigation. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121(4):644-648.

- Phene, C.J., K.R. Davis, R.B. Hutmacher, B. Bar-Yosef, D.W. Meek, and J. Misaki. 1991. Effect of high frequency surface and surface drip irrigation on root distribution of sweet corn. *Irrig. Sci.* 12:135-140.
- Phene, C.J., K.R. Davis, R.B. Hutmacher, and R.L. McCormick. 1987. Advnatages of subsurface drip irrigation for processing tomatoes. *Acta Horticulture.* 200: 101-113.
- Park, J.M., T.J. Lim, and S.E. Lee. 2012. Effect of subsurface drip pipes spacing on the yield of lettuce, irrigation efficiency, and soil chemical properties in greenhouse cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:683-589.
- Zhuge, Y.P., X.D. Zhang, Y.L. Zhang, L.I. Jun, L.J. Yang, Y. Huang, and M.D. Liu. 2004. Tomato root response to subsurface drip irrigation. *Pedosphere.* 14: 205-212.
- Zotarelli, L., M.D. Dukes, J.M. Scholberg, T. Hanselman, K.L. Femminella, and R. Muñoz-Carpena. 2008. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil. *Sci. Hortic.* 116:8-16.