

Effect of Slurry Composting Bio-filtration (SCB) by Subsurface Drip Fertigation on Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Yield and Soil Nitrogen Distribution in Greenhouse

Tae-Jun Lim*, Jin-Myeon Park, Jae-Seung Noh, Seong-Eun Lee, and Ki-In Kim¹

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.*

(Received: July 12 2013, Accepted: August 1 2013)

The use of subsurface drip fertigation using slurry composting bio-filtration (SCB) as nitrogen (N) fertilizer source can be beneficial to improve fertilizer management decision. The objective of this study was to evaluate effects of SCB liquid fertilizer by subsurface drip fertigation on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and soil nitrogen (N) distribution under greenhouse condition. Cucumber in greenhouse was transplanted on April 4th and Aug 31st in 2012. N sources were SCB and urea. Four N treatments with 3 replications consisted of control (No N fertilizer), SCB 0.5N + Urea 0.5N (50:50 split application), SCB 1.0N, Urea 1.0N. 100% of N recommendation rate from soil testing was denoted as 1.0N. The subsurface drip line and a tensiometer were installed at 30 cm soil depth. An irrigation was automatically started when the tensiometer reading was -15 kPa. The growth of cucumber at 85 days after transplanting was 5% higher in all N treatment than control. Semi-forcing culture produced more fruit yield than retarding culture. Fruit yields were 62.2, 76.3, 76.4, and 75.1 Mg ha⁻¹ for control, SCB 1.0N, Urea 1.0N, and SCB 0.5N + Urea 0.5N, respectively. Although fruit yields were similar under SCB 1.0N, Urea 1.0N, and SCB 0.5N + Urea 0.5N, 176 kg K ha⁻¹ can be over applied if cucumber is grown twice a year under SCB 1.0N that may result in K accumulation in soil. N uptake was 172, 209, 213, 207 kg ha⁻¹ for control, SCB 1.0N, Urea 1.0N, and SCB 0.5N + Urea 0.5N, respectively. N use efficiency was the highest (37%) at SCB 0.5N + Urea 0.5N under semi-forcing culture. Nitrate-N concentration in soil for all N treatments except control in semi-forcing culture was the highest between 15 and 30 cm soil depth at the 85 days after transplanting and between 0 and 15 cm soil depth after cucumber harvest. These results suggested that SCB 0.5N + Urea 0.5N can be used as an alternative N management for cucumber production in greenhouse if K accumulation is concerned.

Key words: Slurry composting bio-filtration (SCB), Subsurface drip fertigation, N management

N uptake and N use efficiency by N sources under subsurface drip fertigation.

Treatment	Applied N			N uptake		N use efficiency	
	SCB	Urea	Total	Semi-forcing	Retarding	Semi-forcing	Retarding
	----- kg ha ⁻¹ -----			-----		----- % -----	
Control	0	0	0	172	54		
SCB 0.5N + Urea 0.5N	55	55	110	213	83	37	26
SCB 1.0N	110	0	110	209	86	34	29
Urea 1.0N	0	110	110	207	77	32	21

*Corresponding author : Phone: +82312906263 , Fax: 82312906259, E-mail: taejun06@korea.kr

§Acknowledgement: Both authors contributed equally to this work and are considered as co-first authors

서 언

가축분 액비는 유기자원으로 작물 생산에 필수적인 다양한 영양성분을 함유하고 있어 양분공급 및 토양의 지력을 유지하고 유기물질의 순환에 중요한 작용을 한다 (Lee et al., 2003; Paschold et al., 2008). 하지만 가축분뇨의 처리현황에서 액비 이용률은 연간 발생량의 7.0%로서 퇴비화의 80.6%와 비교하여 저조한데 (RDA, 2012) 이는 악취 등 냄새와 사용상의 불편 등에 기인한다. 하지만 SCB (slurry composting-biofiltration) 액비는 냄새가 적고 액비 중의 슬러지 상태가 거의 없는 특징을 보여 시설에서 관비로의 사용이 가능하기 때문에 이용을 확대할 수 있다 (Lim et al., 2010; Park et al., 2011). 또한 SCB 액비의 사용은 농경지로의 유기자원이 재활용 된다는 측면에서도 부합된다.

우리나라 시설온실은 재배면적이 1980년에 7,141 ha에서 2010년에 48,835 ha로 6.8배 증가하였으며, 또한 1년에 여러 번 작물을 재배하므로 많은 양의 물을 필요로 한다 (Park et al., 2012). 시설 과채류 재배에서의 물 관리는 거의 대부분 점적호스를 이용하고 있으며 이러한 점적호스를 이용한 관수가 가장 많은 전체의 40.2%인 19,651 ha에서 사용되고 있고 (MIFAFF, 2011), 이중 대부분은 지표관수 방법을 이용하고 있다. 지중관수는 지표면 아래 10~40 cm의 깊이에 관수호스를 매설하는 방법으로 도입초기인 1970년대에는 관수호스에 구멍이 막히거나 뿌리가 관수호스를 막는 등 문제점이 있어 실용화되지 못하였다 (Blass, 1971). 하지만 이러한 막힘의 문제점을 개선한 관수자재가 개발되어 사용되고 있다 (Bucks et al., 1981; Ayars et al., 1999). 지중관수는 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 양·수분이 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 사용을 증가하고 있으나 (Camp, 1998), 아직 우리나라에서는 지중관수를 이

용한 시설채소 재배가 거의 없는 상황이지만 물 및 비료 절감 측면에서 지중점적 관수 시스템의 이용이 늘어날 것으로 판단된다. 지중 점적호스의 매설은 설치 및 회수가 필요 없이 다년간 사용할 수 있고 경운에 의한 파손이 발생하지 않는 30 cm이상의 깊이에서 일반적으로 사용하고 있다 (Camp, 1998; Martinez Hernandez et al., 1991; Phene et al., 1991; Zhuge et al., 2004).

현재까지의 가축분뇨 액비에 대한 연구는 노지 발작물인 고추와 배추에서 밑거름에 대한 적정 사용량 산정하거나 (Lim et al., 2008; Lim et al., 2009) 시설에서는 오이 및 토마토에서 액비에 대한 관비 사용기준을 추천하는 연구가 수행되었다 (Park et al., 2010; Park et al., 2011). 하지만 지중 점적호스 하에서 가축분뇨 액비의 공급에 따른 작물의 수량 및 토양 화학성에 미치는 영향은 보고되고 있지 않다. 지중관비는 점적호스가 매설된 토양깊이 30 cm에서 물과 양분이 공급되기 때문에 토양 표층에서 물과 양분이 공급되는 지표관비와 비교하여 작물의 수량이나 토양 중 양분의 분포가 지표관비와 다를 수 있다. 따라서 본 연구는 지중 점적호스를 이용한 시설 오이재배에서 가축분뇨 액비의 공급이 오이의 수량 및 토양의 질소 양분량의 분포에 미치는 영향에 평가하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험토양 및 처리 시험에 이용한 토양은 사양토로 산도는 7.0을 유기물은 13.3 g kg⁻¹을 보였으며 토양염류와 질산태 질소는 각각 3.8 dS m⁻¹ 및 149 mg kg⁻¹을 나타내었다 (Table 1). 처리는 무시비, 토양검정 질소시비량 (1.0 N)을 기준으로 액비와 요소를 50%씩 공급한 액비 0.5N + 요소 0.5N, 액비 1.0N, 요소 1.0N를 두었다 (NIAST, 2006). 액비의 사용은 전 질소를 기준으로 액비의 사용량을 결정하였으며 경기도 이천시 모전양돈단지로부터 받은 SCB (Slurry Composting Bio-filtration) 액비로 공급하였다. 질소의 공급은 오이 정식 후부터 재배가 끝날 때까지 반축성 및 억제 작형에서 매주 1회 동일한 양에 대한 관비의 형태로 각각 14주 및 10주간 공급하였다. 인산과 칼륨의 시비는 요소 1.0N의 경우 표준시비량에 해당하는 양을 용과린과 염화加里로 공급하였고, 액비 0.5N + 요소 1.0N 및 액

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

pH	EC _{1:5}	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	-----		
7.0±0.1	3.8±0.3	13.3±0.2	392±17	149±19	0.4±0.1	8.2±0.4	2.1±0.2	Sandy loam

Table 2. N, P and K application rates of chemical fertilizer and slurry composting biofiltration (SCB) sources under subsurface drip fertigation.

Treatment	Chemical fertilizer (A)			SCB (B)			Total (A+B)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	----- kg ha ⁻¹ -----			----- kg ha ⁻¹ -----			----- kg ha ⁻¹ -----		
----- Semi-forcing culture -----									
SCB 0.5N + Urea 0.5N	55	69	6	55	11	96	110	80	102
SCB 1.0N	0	58	0	110	22	194	110	80	194
Urea 1.0N	110	80	102	0	0	0	110	80	102
----- Retarding culture -----									
SCB 0.5N + Urea 0.5N	55	70	9	55	10	93	110	80	102
SCB 1.0N	0	61	0	110	19	186	110	80	186
Urea 1.0N	110	80	102	0	0	0	110	80	102

비 1.0N 처리구의 경우 액비 중의 인산 함량과 칼리 함량 등을 공제한 후 부족량에 대해서 각각 시비하였다. 부족분에 대한 인산은 전량 밀거름 시비하였다 (Table 2). 시험구 당 면적은 4 m² (0.8 × 5 m)로 재식간격은 50 cm로 하여 난괴법 3반복으로 하였다. 토양의 깊이 별에 따른 질산태 질소는 반촉성 오이 재배작형인 정식 후 85일과 수확종료 후 25일에 토양오거를 이용하여 0 ~ 15, 15 ~ 30, 30 ~ 45, 45 ~ 60 cm의 토양을 채취하여 분석하였다.

물 공급 및 작물재배 시험에 사용한 점적호스의 점적공과 점적공 사이의 간격은 20 cm이며 2.1 L h⁻¹의 유량으로 일정하게 공급되는 압력보상형 점적호스 (Vered, Metzlerplac Inc.)를 사용하였다. 지중관수 처리구에 대한 점적호스는 토양 30 cm의 깊이에 매설하였다. 토양의 수분관리는 토양수분장력계인 텐시오미터를 이용하여 20 cm 깊이로 매설하였으며, 관수 개시점으로는 -15 kPa에 도달하면 물이 자동으로 공급될 수 있도록 하였다. 오이는 백다다기로 2012년 2작기에 걸쳐서 재배하였다. 정식일은 4월 4일과 8월 31일이며 재배기간은 각각 106일과 70일이었다. 생육조사는 반촉성작형에서 정식 후 50일과 85일에 초장과 엽수를 각각 조사하였으며 질소이용효율은 다음과 같이 계산하였다.

질소이용효율 (%) =

$$\frac{\text{시비구 질소흡수량} - \text{무비구 질소흡수량}}{\text{시비구 질소공급량}} \times 100$$

토양 및 식물체 분석 토양분석은 2 mm 체를 통과한 풍건 시료에 대해서 토양 및 식물체 표준분석법에 준하여 실시하였다 (NIAST, 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 Sommers, 1996), 유효인산은 Lancaster법 (Lancaster, 1970)으로, 치환성 K, Ca, Mg은 1N-CH₃COONH₄ (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 ICP-OES (MX2, GBC, Australia)를 사용하여 측정하였다. 질산태 질소는 2M KCl로 침출하여 Kjeldahl (B-316, Büchi, Switzerland)로 증류한 후 황산표준용액 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 (NIAST, 2000)으로, 인산은 Ammonium-vanadate법 (Gericke and Kurmies, 1952), 칼륨은 원자흡광분광분석법 (NIAST, 2000)으로 측정하였다.

통계 분석방법 통계분석은 SAS프로그램(Enterprise guide 4.2)을 이용하였으며 최소유의차 (LSD) 검정을 통해 각 처리간의 통계적 유의성을 비교 검토하였다.

결과 및 고찰

지중관비를 이용한 반촉성 오이재배 작형에서 요소와 액비 처리에 따른 정식 후 50일 및 85일에서의 오이 생육조사 결과는 Table 3과 같다. 정식 후 50일에 조사한 초장 및 마디수는 무시비구에서 각각 82.8 cm와 12.3 ea plant⁻¹로 생육이 가장 낮았지만 처리간의 차이는 보이지 않았고, 정식 후 85일에서는 요소와 액비 등 질소처리구와 비교하여 무시비에서의 초장과 마디수가 각각 388.8 cm와 40.1 ea plant⁻¹를 보여 차이를 나타내었다. 하지만 질소 시비처리구와 비교하여 생육량의 차이가 크지 않았는데 이는 정식 전 토양의 질산태 질소가 149 mg kg⁻¹로 작물이 최대로 생육을 하는데 필요한 질소가 토양에 상

Table 3. The growth of cucumber by N sources in semi-forcing culture.

Treatment	50 days after planting		85 days after planting	
	Plant height	No. of nodes	Plant height	No. of nodes
	cm	ea plant ⁻¹	cm	ea plant ⁻¹
Control	82.8a	12.3a	388.8b	40.1b
SCB 0.5N + Urea 0.5N	84.0a	12.7a	411.6a	42.4a
SCB 1.0N	87.9a	12.7a	409.6a	42.3a
Urea 1.0N	83.8a	12.3a	407.1a	41.8a

[†]Values (n=15) with the same letters do not differ significantly at 0.05% (LSD).

Table 4. The fruit weight and yield of cucumber by N sources under subsurface drip fertigation.

Treatment	Semi-forcing culture		Retarding culture	
	Fruit weight	Yield	Fruit weight	Yield
	g	Mg ha ⁻¹	g	kg ha ⁻¹
Control	188a	62.2b	182a	19.8b
SCB 0.5N + Urea 0.5N	192a	76.4a	186a	29.5a
SCB 1.0N	191a	76.3a	188a	30.1a
Urea 1.0N	187a	75.1a	183a	27.4a

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

당 부분 존재하였기 때문인 것으로 판단되었다. 액비와 요소 등 질소의 공급원은 다르지만 동일한 양으로 질소를 처리한 경우 액비와 화학비료와의 구분없이 오이의 초장과 마디수 등 생육은 처리간의 차이가 없었다. 이는 오이 지중관비에서 요소비료의 50%를 액비로 대체하거나 또는 액비의 공급만으로도 오이의 생육은 요소 비료와 동일하게 증대될 수 있다는 결과를 나타낸다.

반축성 및 억제 재배작형에서 질소 관비 처리별 오이의 과중 및 수량은 Table 4와 같다. 오이의 평균 과중은 처리간의 구분없이 반축성작형에서는 187~192 g를 억제작형에서는 182~188 g의 범위를 나타내었으며 시비와 무시비에 대한 차이는 보이지 않은 것으로 보았을 때, 오이의 과중은 질소 시비량에 의한 영향이 적은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Flores et al. (2007)은 질소 시비량을 0, 150, 300 kg ha⁻¹ 처리한 경우 고추의 평균과중은 시비량에 따른 차이가 없다고 하였으며, JassoChaverria et al. (2005)은 오이재배에서 질소 관비농도를 75, 150, 225, 300, 375 mg L⁻¹로 공급한 경우에도 농도와 상관없이 과실의 길이와 폭에 있어서 차이가 없다는 결과와 동일하였다. 오히려 Dogan et al. (2008)은 증발산량에 기초한 관개량의 차이가 멜론 과중의 차이를 발생시킨다고 하였고, Wang et al. (2009)도 토마토에서 관개량의 감소는 과중의 감소를 가져온다고 보고하여, 과중에 있어서 수분이 보다 직접적인 연관이 있는 것으로 판단되었다.

오이의 수량은 반축성작형이 많았는데 이는 억제작형과 비교하여 오이 재배기간이 36일 길었으며 또한 오이 수확기에서의 온도가 높아서 수량이 증대된 것으로 판단되었다. 오이의 수량은 무시비구를 제외하고 동일한 질소량을 관비로 공급한 경우 액비 1.0N, 액비 0.5N + 요소 0.5N, 요소 1.0N 처리 모두 통계적으로 차이가 없는 같은 생산량을 나타내었다. 이러한 결과는 액비 및 화학비료에 의한 구분이 없이 질소 관비를 통해서 동일한 수량 생산이 가능하기 때문에 액비의 공급을 통해서 충분히 화학비료를 대체할 수 있는 것으로 판단되었다. Lim et al. (2010)은 SCB 액비를 이용한 고추 관비재배 시에 토양검정 시비량에 대해서 화학비료 대체가 가능하다고 하였으며, Park et al. (2011)에서도 오이 재배에서 액비의 관비공급을 통해서 질소 및 칼륨 화학비료 대체가 가능하다고 보고하여 본 연구와 같은 결과를 나타내었다.

반축성작형에서 오이 정식 후 85일과 수확종료 후 25일에서의 토양 깊이별 질산태 질소의 함량은 Fig. 1과 같다. 오이 재배기간 동안에는 지중 점적호스를 통한 질소 관비의 영향으로 지중 15~30 cm 깊이에서 무시비구를 제외하고 질소 양분량이 가장 높았다. 하지만 오이 수확이 끝난 작기 후에는 물 공급이 없는 상태에서 건조로 인해 토양수분이 지표면으로 향하면서 질소 양분도 같이 토양 표층쪽으로 이동하는 결과를 나타내어 0~15 cm 깊이에서 가장 질소 양분량이 많았다. Kong et al. (2012)은

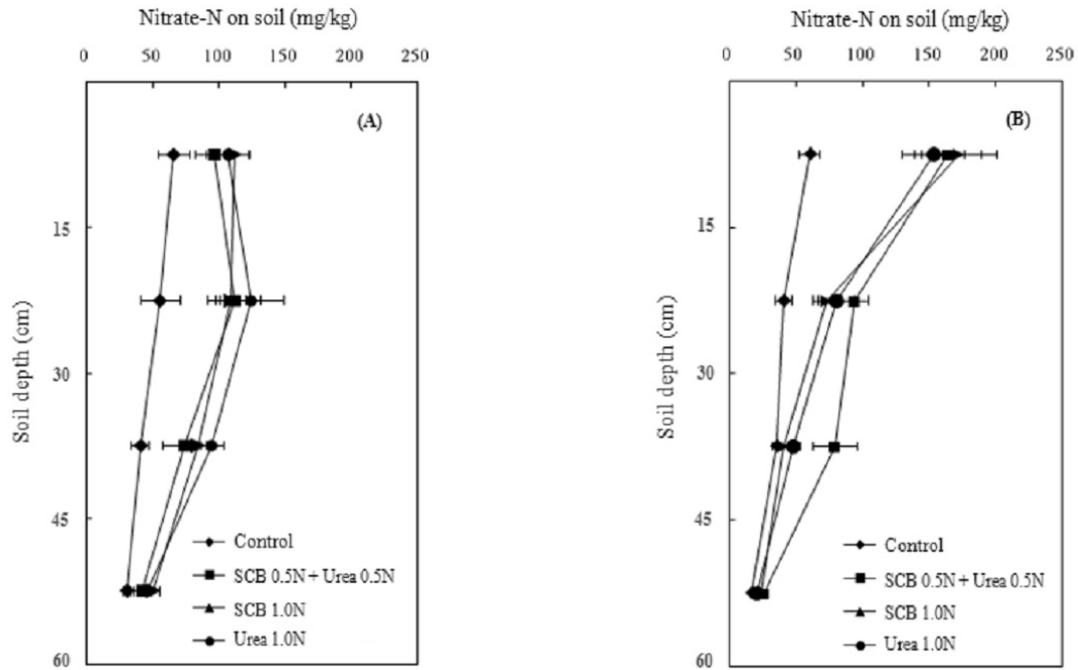


Fig. 1. The concentration of soil nitrate nitrogen by soil depths under subsurface drip fertigation at 85 days after planting (A) and 25 days after cucumber harvest end (B) in semi-forcing culture.

Table 5. N uptake and N use efficiency by N sources under subsurface drip fertigation.

Treatment	Applied N			N uptake		N use efficiency	
	SCB	Urea	Total	Semi-forcing	Retarding	Semi-forcing	Retarding
	kg ha ⁻¹					%	
Control	0	0	0	172	54		
SCB 0.5N + Urea 0.5N	55	55	110	213	83	37	26
SCB 1.0N	110	0	110	209	86	34	29
Urea 1.0N	0	110	110	207	77	32	21

고추 재배에서 지표 및 지중관비에 의한 토양 깊이별 질산태 질소의 변화에서, 지표관비는 0~20 cm 깊이에서 하지만 지중관비에서는 20~40 cm 깊이에서 가장 높은 질산태 질소량을 보인다고 보고하여 본 연구와 비슷한 결과를 나타내었다.

질소 흡수량은 재배기간의 영향으로 인해 오이의 생육 및 수량이 많았던 반축성작형이 억제작형과 비교하여 높았다 (Table 5). 처리별 질소 흡수량은 오이 수량증대에 따라 흡수량도 동일한 경향으로 증가하였는데 반축성작형에서는 액비 0.5N + 요소 0.5N에서 213 kg ha⁻¹를 억제작형에서는 86 kg ha⁻¹를 보인 액비 1.0N에서 최대의 질소 흡수량을 나타내었다. 질소이용효율은 처리 구분없이 반축성작형에서 0.32~0.37 이었고, 억제작형에서는 0.21~0.29의 범위를 보였다. 억제작형에서의 질소이용효율이 낮은 것은 오이의 생육 및 수량이 반축성작형과 비교해서 낮아 흡수량이 적었기 때문이다. 액비 1.0N 및 액비

0.5N + 요소 0.5N의 질소이용효율은 반축성작형에서 0.34와 0.37를 억제작형에서는 0.29와 0.26를 각각 보였다. 이러한 결과는 요소 1.0N의 0.32와 0.21과 비교한 경우 약간 높은 값을 나타내었는데 질소 요구량에 대해서 전량을 또는 절반에 해당하는 양을 액비로 공급해도 충분히 오이에 필요한 질소 양분공급이 가능한 것으로 판단되었다 (Lim et al., 2010; Park et al., 2010). 하지만 액비 1.0N으로의 사용량에 있어서는 작물의 최대수량을 만족하지만 1년간의 오이 재배 시에 칼륨의 경우 표준시비량보다 176 kg ha⁻¹이 추가적으로 토양에 공급되므로 장기간에 걸친 액비의 사용 시에는 칼륨이 과잉으로 집적될 수 있다 (Table 2). 그러므로 지중관비를 이용한 시설 오이 재배에서 질소 추천량에 대해서 반량은 액비로 공급하고 나머지 반량에 있어서는 화학비료로 시비하는 방법이 추천된다.

요약

지중관비를 이용한 시설오이 재배에서 돈분 액비의 공급이 오이의 생육, 수량 및 토양 중 질소 분포에 미치는 영향을 평가하고자 오이 반축성 및 억제작형에 걸쳐서 수행하였다. 초장과 마디수 등 오이의 생육은 정식 후 50 일에서는 처리간의 차이는 보이지 않았지만 정식 후 85 일에서는 무시비의 초장 및 마디수가 각각 388.8 cm와 40.1 ea plant⁻¹를 보여 생육량의 차이를 나타내었다. 오이의 수량에서도 무시비를 제외하고 액비 1.0N 및 액비 0.5N + 요소 0.5N처리와 요소 1.0N간에는 통계적으로 차이가 없이 동일하였다. 오이 재배기간에 토양 중 질산태 질소의 분포는 관비의 영향으로 지중 15~30 cm 깊이에서 무시비구를 제외하고 질산태 질소의 농도가 가장 높았으며 오이 재배가 끝난 작기 후에는 0~15 cm 깊이에서 가장 높은 질소 양분량을 나타내었다. 액비 1.0N과 액비 0.5N + 요소 0.5N의 질소이용효율은 축성작형에서 0.34와 0.37를 억제작형에서는 0.29와 0.26를 각각 보여 요소 1.0N의 0.32와 0.21과 비교하여 약간 높은 값을 나타내었다. 액비 1.0N과 액비 0.5N + 요소 0.5N는 요소 1.0N과 동일한 수량을 만족하지만 2기작에 걸친 액비 1.0N 처리는 칼륨이 176 kg ha⁻¹이 추가적으로 토양에 공급되므로 장기간에 걸친 액비의 사용 시에는 칼륨이 과잉으로 집적될 수 있다. 따라서 지중관비를 이용한 시설 오이 재배에서 질소 추천량에 대해서 반량은 액비로 공급하고 나머지 반량에 있어서는 화학비료로 시비하는 방법이 추천된다.

References

- Ayars, J.E., C.J. Phene, R.B. Hutmacher, K.R. Davis, R.A. Schoneman, S.S. Vail, and R.M. Mead. 1999. Subsurface 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. Kimak, 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.
- Flores, P., I. Castellar, P. Hellín, J. Fenoll, and J. Navarro. 2007. Response of pepper plants to different rates of mineral fertilizers after soil biofumigation and solarization. *J. Plant Nutr.* 30:367-379.
- Gericke, S. and B. Kurmies. 1952. Die kolorimetrische phosphorsäurebestimmung mit ammonium-vandat-molybdat und ihre anwendung bei der pflanzenanalyse. *Z. Pflanzenernährung, Dungung und Bodenkunde*. 59, 235-247.
- Jasso-Chaverria, C., G.J. Hochmuth, R.C. Hochmuth, and S.A. Sargent. 2005. Fruit yield, size, and color responses of two greenhouse cucumber types to nitrogen fertilization in perlite soilless cultures. *HortTechnology*. 15:565-571.
- 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.
- Lancaster, J.D. 1970. Determination of phosphorus and potassium in soils. *Miss. Agr. Exp. Sta. Mimeo*.
- Lee, C.S., K.Y. Shin, J.T. Lee, and G.J. Lee. 2003. Determination of nitrogen application level for Chinese cabbage with application of poultry manure compost in highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(5):280-289.
- Lim, T.J., S.D. Hong, S.H. Kim, and J.M. Park. 2008. Evaluation of yield and quality from red pepper for application rates of pig slurry composting biofiltration. *Korean. J. Environ. Agric.* 27(2):171-177.
- Lim, T.J., S.D. Hong, S.B. Kang, and J.M. Park. 2009. Evaluation of the preplant optimum application rates of pig slurry composting biofiltration for Chinese cabbage. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27(4):572-577.
- Lim, T.J., I.B. Lee, S.B. Kang, J.M. Park and S.D. Hong. 2010. Effects of fertigation with pig slurry on growth and yield of red pepper. *Korean J. Environ. Agric.* 29:227-231.
- 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.* 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.
- Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen inorganic forms. *Methods of soil analysis*. Part 3. SSSA Book Series No 5. SSSA, Madison, WI.
- 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.
- NIAST. 2006. Fertilizer recommendation for crops, National Institute of Agricultural Science and Technology. Rural

- Development Administration, Suwon, Korea.
- Park, J.M., T.J. Lim, S.E. Lee, and I.B. Lee. 2010. Effect of pig slurry fertigation on soil chemical properties and growth and development of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Korean J. Soil Sci. Fert. 43:610-615.
- Park, J.M., T.J. Lim, S.E. Lee, and I.B. Lee. 2011. Effect of pig slurry fertigation on soil chemical properties and growth and development of cucumber (*Cucumis sativus* L.). Korean J. Soil Sci. Fert. 44:194-199.
- 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.
- Paschold, J. S., B.J. Wienhold, D.L. McCallister, and R.B. Ferguson. 2008. Crop nitrogen and phosphorus utilization following application of slurry from swine fed traditional or low phytate corn diets. Agron. J. 100:997-1004.
- 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.
- RDA (Rural Development Administration), 2012. Quality management and recycling of livestock manure and slurry, RDA, Suwon, Korea. pp. 10-16.
- Wang, Z., Z. Liu, Z. Zhang, and X. Liu. 2009. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation. Sci. Horti. 123:51-57.
- 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.