Optimal Fertilizer Requirement for 9 Greenhouse Vegetable Crop Cultivation with Fertilization System: On-Site Survey

Ye-Jin Lee, Seul-Bi Lee, and Jwakyung Sung^{1*}

Division of Soil & Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, 55365, Republic of Korea

¹Department of Crop Science, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea

*Corresponding author: jksung73@chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

Received: October 28, 2019

Revised: November 7, 2019

Accepted: November 14, 2019

The fertigation system has continuously been increasing to extend crop cultivation, to provide simultaneously water and mineral nutrients, and to finally enhance yield and quality. The fertigation has a strength to regulate water and fertilizer relatively freely without any limitation of time, quantity, and type of fertilizers. However, a decision for those extremely depends on farmer's experience due to an absence of standardized fertigation manual for each crop. As a measure to solve these problems, it should be firstly considered when, what and how farmers implement various requirements, and thus we surveyed some basic information to make a concept for crop-customized fertigation manual. The workflow was as followed: 1) choose crops → 9 major vegetables growing with fertigation, 2) monitor massive production area and select 2 sites with different cultivation period, 3) on-site survey and sampling at least two times during cultivation, early harvest and maximum harvest stages, and 4) analyze soil and plant samples and compute optimal rates for crop- and cultivation type-customized fertigation. Plant density was greater in forcing cultivation, and application rates were relatively higher in sequential harvest. The ratio of top dressing (fertigation) to total application generally ranged from 60 - 80% although some farmers were beyond the bounds. Mineral nutrient contents (N, P, and K) were more concentrated in *Solanaceae*, and it was observed that the quantity and concentration of fertigation were higher in sequential (e.g. cucumber) compared to once (e.g. watermelon). Given the result from the present on-site survey, it is carefully suggested to revise an application rate of top dressing for fertigation, to make the standardized- or customized-fertigation manual by crops, to implement practical means to optimize soil mineral contents, and to extend an education about application of smart and effective fertigation for farmers.

Keywords: Fertigation, Mineral uptake, Soil nitrate-N, Vegetable crops

Differences in nutrients uptake by cultivation period and crops under fertigation system.

Species	Crop	Cultivation period	Uptake (kg 10a ⁻¹)		
			N	P	K
<i>Solanaceae</i>	Pepper	Sep. ~ June	27.7 ± 5.9	3.7 ± 0.8	32.2 ± 5.0
		Feb. ~ June	19.4 ± 3.3	2.5 ± 0.5	22.2 ± 3.5
	Tomato	Sep. ~ Apr.	12.0 ± 0.9	3.3 ± 0.3	25.5 ± 2.3
		May ~ Oct.	21.3 ± 4.3	5.8 ± 1.0	41.1 ± 6.3
	Eggplant	Sep. ~ July	44.6 ± 5.2	9.4 ± 0.4	99.5 ± 9.0
		Feb. ~ July	30.7 ± 10.9	5.8 ± 2.4	56.7 ± 14.5
<i>Cucurbitaceae</i>	Cucumber	Dec. ~ May	18.7 ± 1.5	4.0 ± 0.3	16.7 ± 1.2
		Jan. ~ July	30.8 ± 2.4	6.6 ± 0.5	27.4 ± 2.1
	Watermelon	Jan. ~ Apr.	9.6 ± 1.0	1.4 ± 0.1	15.6 ± 1.6
		Mar. ~ June	8.0 ± 1.3	1.2 ± 0.1	13.9 ± 1.5
	Oriental melon	Dec. ~ Aug.	10.6 ± 2.7	2.1 ± 0.5	19.0 ± 4.1
		Jan. ~ May	9.3 ± 1.3	2.5 ± 0.3	19.7 ± 2.9
	Melon	Apr. ~ July	12.1 ± 4.5	3.2 ± 1.3	24.4 ± 8.2
		Mar. ~ July	24.9 ± 7.8	5.5 ± 1.7	30.3 ± 9.5
<i>Rosaceae</i>	Strawberry	Sep. ~ May	13.0 ± 2.8	2.8 ± 0.6	17.1 ± 3.6

Introduction

연중 작물재배가 가능한 시설하우스는 관비(물과 양분)시스템의 구축을 통해, 작물의 안정적인 생산에 유리하나 (Sinclair and Rufty, 2012), 과도한 양분의 투입으로 인해 토양 중 염류집적, 연작장애에 의한 토양 질 악화 등 지속적인 농업생산활동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2012; Gao et al., 2017). 물과 양분(비료)를 동시에 공급하는 방법은 관비(fertigation)은 작물의 생육양상을 고려하여 공급시기, 공급량, 공급농도 및 양분(비료)종류의 조절이 용이하여 양분의 이용효율을 향상시킬 수 있어 (50 - 90%, 입상 대비 2배 이상) (Hagin and Lowengart, 1996), 비료의 공급량을 40 - 60%까지 절약할 수 있는 장점이 있다 (Kumar and Singh, 2002; Ebrahimian et al., 2014; Chauhdary et al., 2017).

작물의 안정적인 생산, 비료의 효율적 이용 및 농업생산환경의 보전 등 합리적인 관비재배기술의 장점은 시설재배에서 재배하는 과채류(고추, 오이, 토마토, 오이, 애호박, 참외 등)와 엽/근/인경채류(양파, 브로콜리, 상추, 시금치, 무 등) 등 많은 작물에 대하여 적정 관비공급량, 작물 생산성 등이 연구된 바 있다 (Cho et al., 1998; Moujabber et al., 2002; Kang et al., 2003; Jung et al., 2005; Ewais et al., 2010; Badr et al., 2011; Ha et al., 2015; Sung et al., 2016; Chauhdary et al., 2017). 우리나라 관비재배면적은 약 24천ha로 시설재배 관수시설의 46%를 차지하고 있으나 (MAFRA, 2017), 대부분의 시설재배 농가에서는 작물의 생육상황을 고려한 물과 양분의 공급하는 방식보다는 다년간의 경험 또는 선진농가 재배방식의 활용 등을 통해 관비재배를 하고 있는 실정이다.

앞서 언급한 문제점들을 해결하기 위한 방법 중의 하나로, 본 연구에서는 주요 과채작물의 주산단지 실태조사를 바탕으로 재배기간, 관비방법, 수량 및 양분흡수량 분석을 통해 작물의 재배기간 및 목표수량에 맞춘 관비공급량의 설정과 기존 시설재배작물의 비료사용처방 (NAS, 2017) 밀거름/웃거름 비율을 재산정하기 위한 근거자료를 제공하고 자 실시하였다.

Materials and Methods

On-Site Survey and Sampling 주요 시설재배작물에 대한 영농현장의 관비공급 실태를 조사하기 위하여, 재배면적과 생산량을 바탕으로 주요 과채작물의 주산단지별로 구분하여 2017 - 2019년 상반기까지 조사를 실시하였다; 고추 (충남 공주시, 경남 밀양시), 토마토 (경기 화성시, 강원 화천군, 경남 창녕군), 가지 (경기 여주군, 전남 나주시), 오이 (충남 천안시, 경북 상주시), 수박 (충북 진천군, 충남 부여군), 참외 (경북 성주군), 멜론 (전남 나주시, 전남 영암군), 애호박 (경기 평택시, 충북 청주시), 딸기 (충남 논산시, 경남 하동군). 주산단지 내 해당 시군농업기술센터의 협조를 통해 5 - 6의 선진 농가를 대상으로 품종, 재배년수, 재배면적, 재식밀도, 재배기간, 비료공급량 (밀거름, 웃거름, 비종 등) 및 수량 등 기본정보를 확보하였으며 (10 - 12농가/작물), 작물의 수확초기와 최대 수확기에 토양과 식물체를 채취하여 양분흡수량 분석을 위한 시료로 사용하였다.

Plant and Soil Analysis 식물체 무기성분 분석을 위해 채취한 시료를 증류수로 세척하여 이물질을 제거, 건조 (48시간, 80°C), 마쇄한 후, 농촌진흥청 국립농업과학원의 식물체 표준분석법에 따라 식물체 분석시료 0.5 g에 식물체 분해액 (377 mM H₂SO₄ + 36% HClO₄)으로 습식 분해하여 여과 (Whatman No.6) 하였다 (Lee et al., 2017). 여과액을 증류수로 10배 희석한 후, 질소는 질소 자동분석기 (Auto analyzer 3, BRAN+LUEBBE, Germany)로 660 nm에

서 측정하였다. 인산은 UV-Spectrometer (Hitachi, Japan)을 이용하여 880 nm에서 측정하였다. 칼륨은 ICP (GBC, Intergra XL, Australia)를 이용하여 측정하였다 (Lee et al., 2017). 토양 건조 후, 2 mm 체로 쳐서 분석시료로 사용하였고, 질산태 질소는 습토 5 g에 2 M KCl 25 mL를 넣고 30분간 진탕 후 여과 (Whatman No.2)하여 질소자동분석기로 분석하였다 (440 nm) (Lee et al., 2017).

Results and Discussion

General State of Cultivation and Yield by Crops 주산단지를 지역별로 구분하고 2군데의 주산단지 내 선진

Table 1. General on-site fertilizer application rates for greenhouse vegetable crops (*Solanaceae*) by cultivation period

Species	Crop	Cultivation period	Planting density (plant 10a ⁻¹)	Additional (kg 10a ⁻¹ , A)			Total (kg 10a ⁻¹ , B)			A/B (%)		
				N	P	K	N	P	K	N	P	K
<i>Solanaceae</i>	Pepper	Sep. ~ June	1,400	15.4	12.3	15.7	24.0	14.6	21.6	64	84	73
		Feb. ~ June	1,000	13.7	9.5	13.0	19.5	11.5	18.2	70	83	71
		Recommendation		10.3	-	4.0	22.5	6.4	10.1	46	-	40
	Tomato	Sep. ~ Apr.	3,200	6.3	1.7	3.4	16.4	9.8	11.6	38	17	30
		May ~ Oct.	2,300	12.4	6.3	18.4	19.0	9.3	21.8	65	68	85
		Recommendation		8.8	-	8.1	20.4	10.3	12.2	43	-	66
	Eggplant	Sep. ~ July	2,000	16.7	-	22.7	32.5	7.9	29.3	51	0	77
		Feb. ~ July	1,600	12.7	5.7	11.1	21.2	8.7	15.3	60	66	72
		Recommendation		11.0	-	7.1	19.3	8.7	11.2	57	-	63

Table 2. General on-site fertilizer application rates for greenhouse vegetable crops (*Cucurbitaceae*, *Rosaceae*) by cultivation period.

Species	Crop	Cultivation period	Planting density (plant 10a ⁻¹)	Additional (kg 10a ⁻¹ , A)			Total (kg 10a ⁻¹ , B)			A/B (%)		
				N	P	K	N	P	K	N	P	K
<i>Cucurbitaceae</i>	Cucumber	Dec. ~ May	2,300	16.4	9.8	23.1	25.1	14.5	29.4	66	68	78
		Jan. ~ July	1,800	21.0	21.1	23.8	33.4	23.3	26.7	63	91	89
		Recommendation		10.5	-	4.1	19.7	10.3	12.2	54	-	34
	Watermelon	Jan. ~ Apr.	900	19.0	16.2	14.5	31.6	19.8	22.2	60	82	65
		Mar. ~ June	700	12.0	8.3	11.9	18.7	13.3	18.3	64	62	65
		Recommendation		8.3	-	4.3	13.8	4.9	8.7	60	-	49
	Oriental melon	Dec. ~ Aug.	600	4.7	9.0	15.5	7.2	13.0	26.0	65	69	60
		Recommendation		9.0	-	5.2	18.7	6.3	10.9	48	-	48
	Melon	Jan. ~ May	2,000	1.0	0.6	1.6	3.7	3.3	2.1	27	17	76
		Apr. ~ July	2,100	2.9	2.2	4.8	4.9	2.5	9.6	59	88	50
		Recommendation		4.4	-	3.7	8.8	3.0	7.4	50	-	50
	Green pumpkin	Mar. ~ July	800	11.6	6.6	8.6	12.8	7.0	9.1	91	94	95
		Recommendation		10.0	-	5.5	20.0	8.4	9.9	50	-	56
<i>Rosaceae</i>	Strawberry	Sep. ~ May	8,000	9.4	7.0	17.1	11.2	8.7	18.1	84	81	95
		Recommendation		6.1	-	1.8	9.6	4.9	7.4	64	-	24

Table 3. Yield of 9 greenhouse vegetable crops (*Solanaceae*, *Cucurbitaceae*, *Rosaceae*) by cultivation period.

Species	Crop	Cultivation	Yield (Mg 10a ⁻¹)
<i>Solanaceae</i>	Pepper	Sep. ~ June	9.05 (31)
		Feb. ~ June	5.83 (17)
	Tomato	Sep. ~ Apr.	8.58 (15)
		May ~ Oct.	9.97 (21)
	Eggplant	Sep. ~ July	15.11 (12)
		Feb. ~ July	11.48 (53)
<i>Cucurbitaceae</i>	Cucumber	Dec. ~ May	12.86 (8)
		Jan. ~ July	20.14 (11)
	Watermelon	Jan. ~ Apr.	6.00 (12)
		Mar. ~ June	5.74 (15)
	Oriental melon	Dec. ~ Aug.	5.59 (19)
	Melon	Jan. ~ May	2.97 (8)
		Apr. ~ July	3.86 (12)
<i>Rosaceae</i>	Green pumpkin	Mar. ~ July	3.59 (37)
		Sep. ~ May	3.97 (26)

농가들을 방문하여 일반적인 재배현황과 수확량을 조사하였다 (Tables 1, 2 and 3). 작물은 가지과 (고추, 토마토, 가지), 박과 (오이, 수박, 참외, 멜론, 애호박), 장미과 (딸기) 등 9종의 과채작물을 대상으로 하였다. 작물별 재배기간은 축성, 반축성 또는 보통재배의 방식을 취하고 있으며, 재식밀도는 작물에 따라 상이한데 고추 (1,000 - 1,400주 10a⁻¹), 토마토 (2,300 - 3,200주 10a⁻¹), 가지 (1,600 - 2,000주 10a⁻¹), 오이 (1,800 - 2,300주 10a⁻¹), 수박 (700 - 900주 10a⁻¹), 참외 (600주 10a⁻¹), 멜론 (2,000주 10a⁻¹), 애호박 (800주 10a⁻¹), 딸기 (8,000주 10a⁻¹) 등으로 조사되었으며, 보통재배에 비해 축성재배에서 약 20% 가량 재식밀도를 높이는 것으로 파악되었다.

관비형태로 공급되는 비료의 공급량도 작물 및 재배기간에 따라 상이하게 나타났는데, 고추, 가지 및 수박은 축성 재배에서, 토마토, 오이 및 멜론은 보통재배에서 공급량이 많은 것으로 파악되었다. 또한 고추, 가지, 오이 및 수박은 비료공급량이 높은 편이었고, 토마토, 참외, 멜론, 애호박 및 딸기는 비료공급량이 상대적으로 적은 편이었다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서 추천하는 (NAS, 2018) 작물별 표준비료사용량과 비교하면, 토마토, 참외 및 멜론은 농가의 공급량이 상대적으로 적게 공급하는 것으로 나타났다. 총 비료공급량에 대한 웃거름 공급량의 비를 비교하면, 작물별로 다소 차이가 있지만 추천 비율의 경우 질소는 40 - 60%, 인은 전량 밑거름, 칼륨은 20 - 60%로 제시되어 있다. 반면, 농가에서는 질소 (30 - 90%), 인 (20 - 90%), 칼륨 (30 - 90%)로 농가에 따라 큰 차이를 보였으나, 전반적으로 대부분의 조사농가에서 질소, 인, 칼륨의 웃거름 비율은 60% 이상인 것으로 파악되어 이에 대한 조정이 필요하다고 생각된다.

작물별 수확량은 재배방식에 따라 차이를 보였는데 (Table 3), 조사결과를 종합하면 작물 수확량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 재배기간으로 나타났고, 작물의 광합성량과 상관이 높은 일조량 (재배기간의 계절)이 또다른 요인으로 작용하는 것으로 확인되었다.

Optimal Nutrient Requirement for Crop Cultivation 작물의 초기 수확기와 최대 수확기에 지상부를 채취하여 건물생산량과 무기성분 흡수량을 분석하고, 관비공급 시 양분의 최대 이용효율 (N, 90%; P, 50%; K, 80%)을 반영하

여 양분요구량 (질소, 인, 칼륨)을 산정하였다 (Table 4), 주요 시설재배작물을 관비형태로 양분을 공급하는 경우, 양분의 흡수/이용효율은 상대적으로 높게 나타났으며, 특히 질소의 경우 노지공급량 대비 25% 가량 절감이 가능한 것으로 보고된 바 있다. (Jung et al., 2010; Ha et al., 2015; Sung et al., 2016). 작물의 무기성분 흡수량은 건물생산능력 외에 각 작물의 무기성분 함량에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 조사된 모든 작물에서 무기성분함량은 전반적으로 잎 > 과실 > 줄기의 순으로 측정되었으며, 가지, 토마토, 고추 (이상 가지과) 및 오이 (박과)에서 잎의 질소함량이 4.0% 이상이었고, 고추, 가지 (이상 가지과)와 오이, 애호박 (이상 박과)에서 과실의 질소함량이 3.0% 이상으로 측정되었다. 작물의 생육량, 무기성분 함량 등을 바탕으로 재배작기에 따른 작물의 양분흡수량과 양분요구량을 산정한 결과, 가지, 고추, 오이, 애호박에서 높게 나타났다. 특히 양분흡수량에 근거한 양분요구량은 연속수확형 작물이 일회수확형 작물에 비해 상당히 크다는 것이 파악되었다. 또한 작물의 초기 수확기와 최대 수확기에 토양을 채취하여 질산태질소 함량을 분석한 결과 (Fig. 1), 토마토, 수박, 애호박 및 가지를 재배하는 토양에서 200 - 300 mg kg⁻¹ (평균 기준)로 농촌진흥청 국립농업과학원의 권장기준인 70 - 200 mg kg⁻¹을 크게 상회하고 있어, 작물의 양분흡수량과 토양 질산태질소 함량은 높은 상관성이 없는 것으로 파악되며, 오히려 영농현장에서는 양분의 과도한 공급 또는 비효율적인 흡수/이용이 발생하고 있음을 예상할 수 있었다 (NAS, 2015).

주요 시설과채작물의 재배방식에 따른 양분공급량과 수량 및 토양 질산태질소 함량을 조사하여 효율적인 양분의 공급과 활용을 위한 방안을 고안하고자 수행한 본 연구의 결론을 요약하면; 1) 관비형태로 양분을 공급하는 경우, 웃거름의 비율이 60 - 80% 이었고, 2) 양분의 요구량은 재배방식 (촉성 vs. 반촉성 vs. 보통)과 수확형태 (일회 vs. 연속)에 따라 큰 차이를 보였다. 따라서 영농현장에서 관비의 활용율을 제고하기 위해서는 표준화된 관비공급처방 기준과 활용 매뉴얼 개발, 2) 토양양분함량을 권장기준범위로 유도하기 위한 구체적인 실천적 방안 마련 및 3) 맞춤형 (재배방식, 목표수량, 토양조건 등) 관비활용 농업인 교육 등의 확대가 필요함을 제안한다.

Table 4. Mineral nutrients uptake and optimal requirement for 9 vegetable crops with fertigation system.

Species	Crop	Cultivation period	Uptake (kg 10a ⁻¹)			Requirement (kg 10a ⁻¹)		
			N	P	K	N	P	K
<i>Solanaceae</i>	Pepper	Sep. ~ June	27.7 ± 5.9	3.7 ± 0.8	32.2 ± 5.0	30.8	7.4	40.3
		Feb. ~ June	19.4 ± 3.3	2.5 ± 0.5	22.2 ± 3.5	21.6	5.1	27.7
	Tomato	Sep. ~ Apr.	12.0 ± 0.9	3.3 ± 0.3	25.5 ± 2.3	13.3	6.6	31.8
		May ~ Oct.	21.3 ± 4.3	5.8 ± 1.0	41.1 ± 6.3	23.7	11.6	51.4
	Eggplant	Sep. ~ July	44.6 ± 5.2	9.4 ± 0.4	99.5 ± 9.0	49.5	18.8	124.4
		Feb. ~ July	30.7 ± 10.9	5.8 ± 2.4	56.7 ± 14.5	34.1	11.5	70.8
<i>Cucurbitaceae</i>	Cucumber	Dec. ~ May	18.7 ± 1.5	4.0 ± 0.3	16.7 ± 1.2	20.8	8.1	20.9
		Jan. ~ July	30.8 ± 2.4	6.6 ± 0.5	27.4 ± 2.1	34.2	13.1	34.3
	Watermelon	Jan. ~ Apr.	9.6 ± 1.0	1.4 ± 0.1	15.6 ± 1.6	10.7	2.8	19.5
		Mar. ~ June	8.0 ± 1.3	1.2 ± 0.1	13.9 ± 1.5	8.9	2.4	17.4
	Oriental melon	Dec. ~ Aug.	10.6 ± 2.7	2.1 ± 0.5	19.0 ± 4.1	11.7	4.1	23.8
	Melon	Jan. ~ May	9.3 ± 1.3	2.5 ± 0.3	19.7 ± 2.9	10.4	5.0	24.7
		Apr. ~ July	12.1 ± 4.5	3.2 ± 1.3	24.4 ± 8.2	13.4	6.4	30.5
	Green pumpkin	Mar. ~ July	24.9 ± 7.8	5.5 ± 1.7	30.3 ± 9.5	27.7	10.9	37.8
<i>Rosaceae</i>	Strawberry	Sep. ~ May	13.0 ± 2.8	2.8 ± 0.6	17.1 ± 3.6	14.4	5.7	21.4

Fig. 1. Distribution of nitrate-N from greenhouse soils grown vegetable crops. Soil samples obtained from each crops were varied from 9 to 35.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ013537), Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

References

- Badr, M.A., A.S. Taalab, and E.W.A. Tohamy. 2011. Nitrogen application rate and fertigation frequency for drip irrigated potato. *Australian J. Basic and Applied Sci.* 5:817-825.
- Chauhdary, J.N., A. Bakhsh, M. Arshad, and M. Maqsood. 2017. Effect of different irrigation and fertigation strategies on corn production under drip irrigation. *Pak. J. Agric. Sci.* 54:855-863.
- Cho, Y.D., S.K. Joung, and J.C. Heo. 1998. Effects of fertigation system on the yield and quality of cherry tomatoes in plastic house. *Kor. J. Soc. Hort. Sci. and Tech.* 16(1):142 (Abstr.).
- Ebrahimian, H. and E. Playán. 2014. Optimum management of furrow fertigation to maximize water and fertilizer application efficiency and uniformity. *J. Agric. Sci. Tech.* 16:591-607.
- Ewais, M.A., A.A. Mahmoud, and A.A. Khalil. 2010. Effect of nitrogen fertigation in comparison with soil application on onion production in sandy soils. *Alexandria J. Agri Res* 55:75-83.
- Ha, S.K., Y.K. Sonn, K.H. Jung, Y.J. Lee, M.J. Cho, H.J. Yun, and J.K. Sung. 2015. Estimation of growth stage-based nitrogen supply levels for greenhouse semi-forcing zucchini cultivation. *J. of Agricultural Sci.* 42:319-324.
- Hagin, J., M. Sneh, and A.A. Lowengart. 2002. Fertigation – Fertilization through irrigation. IPI esearch Topics No.

23. Ed. by A.E. Johnston. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Jung, B.G., H.J. Jun, Y.S. Song, and K.S. Lee. 2005. Establishment of optimum nitrogen application rates in fertigation system for vegetable cultivation. p.270-289. In: Annual report of National Academy of Agricultural Science.
- Jung, K.S., K.H. Jung, W.K. Park, Y.S. Song, and K.H. Kim. 2010. Establishment of the optimum nitrogen application rate for Oriental Melon at various growth stages with a fertigation system in a plastic film house. *Kor. J. of Soil Sci. Fert.* 43:349-355.
- Kang, J.G., S.Y. Yang, B.S. Lee, and S.J. Jeong. 2003. Effects of changing fertilizer concentrations and fertigation frequencies on growth and fruiting of subirrigated ornamental pepper. *Kor. J. Hort. Sci. Tech.* 44(4):523-529.
- Lee, Y.J., J.K. Sung, S.B. Lee, J.E. Lim, Y.S. Song, D.B. Lee, and S.Y. Hong. 2017. Plant analysis methods for evaluating mineral nutrient. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50:93-99.
- Moujabber, E.I., M. Atallah, and T. Darwish. 2002. Crop modeling and water use efficiency of protected cucumber. *Int Atomic Energy Agency Tech Documents* 1266:61-67.
- NAS. 2015. Annual report: The monitoring project on agro-environmental quality. National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju, Korea.
- NAS. 2017. Fertilizer recommendation for crop production (3rd ed.). National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju, Korea.
- Sinclair, T.R. and T.W. Rufty. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases: not necessarily plant genetics. *Global Food Secur.* 1:94-98.
- Sung, J.K., H. Jung, H.J. Yun, M.J. Cho, J.E. Lim, Y.J. Lee, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2016. Optimal levels of additional N fertigation for greenhouse watermelon based on cropping pattern and growth stage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:699-704.