Growth Stage-Based Fertigation Guideline for Greenhouse Spring Chinese Cabbage

Seul-Bi Lee, Yang-Min Kim, Ye-Jin Lee, Yo-Sung Song, Deog-Bae Lee, and Jwakyung Sung^{1*}

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

¹Department of Crop Science, College of Agriculture, Life and Environment Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

*Corresponding author: jksung73@chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

Received: September 4, 2019

Revised: October 29, 2019

Accepted: November 4, 2019

With increasing fertigation, the precise fertigation schedule by crop growth stage has been consistently required as a guideline for stable crop production. The aim of this study is to develop the fertigation guideline for spring cabbage. To achieve this goal, we firstly investigated the nutrient uptake pattern of Chinese cabbage, which grown in pots filled with sandy loam soil in a greenhouse from April to June in 2018, and determined optimal nutrient (N, P and K) supply by growth stages. Based on soil NO₃-N based recommendation, nitrogen (N) supply was divided into 4 levels (0.5N, 0.75N, 1.0N and 1.5N). Soil NO₃-N concentrations somewhat differed from growth stages, and 1.5N represented the highest level. Chinese cabbage showed linear growth patterns and there was no clearly significant difference in growth and nutrient uptake by N supply levels except for 0.5N treatment. The relative growth (expressed as a dry weight) of Chinese cabbage occupied 60% and 40% of total accumulated growth (average of 0.75 and 1.0N) at 40 and 60 days, respectively. Mineral uptake (N, P, K) of Chinese cabbage by growth stages showed a linear pattern in general. N was taken up 54% and 46% of total uptake, P uptake 56% and 44%, and K uptake 59% and 41% at 40 and 60 days, respectively. Conclusively, we carefully suggest that the fertigation guideline for Chinese cabbage could save fertilizer supply through daily nutrient demand and target yield, and thus alleviate the problems in relation to nutrient accumulation in greenhouse soils.

Keywords: Chinese cabbage, Growth stage, Fertigation, Soil-testing-based fertilization

Weekly fertigation scheduling (g 10a⁻¹) of N, P₂O₅ and K for greenhouse spring Chinese cabbage. Fertilization level was estimated based on mineral uptake, nutrient use efficiency and target yield (1 Mg 10a⁻¹, FW).

Growth stages	Weeks after transplanting	Cultivation : early April ~ late June		
		Plant density : 4,000 plant 10a ⁻¹		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Early stage	1	-	-	-
	2	-	-	-
Leaf elongation	3	210	120	345
	4	210	120	345
	5	210	120	345
	6	210	120	345
Heading	7	330	200	650
	8	330	200	650
	9	330	200	650
Total requirement		1,830	1,080	3,330

Introduction

관개(물)와 비료(양분)공급은 시설재배 작물의 안정적 생산을 위한 중요 인자로 알려져 있다 (Sinclair and Rufty, 2012). 작물의 연중 재배가 가능한 시설재배지는 화학비료와 가축분 퇴비를 다량 사용하여 토양 염류집적과 작물 연작장애를 야기하고 있으며 (Kim et al., 2012), 과잉의 양분은 토양질 악화와 환경부하를 통해 농업생태계를 악화시킨다 (Gao et al., 2017). 농업의 지속성 유지, 작물의 안정적인 수량과 품질을 확보하기 위해서는 작물 생육단계에 맞춰 적절한 시기에 적절한 양의 양분 공급이 필요하다 (Mattson and van Iersel, 2011).

관비 (fertigation)는 관개수를 통해 비료를 공급하는 방식으로, 비료의 공급시기, 공급량 및 공급농도의 조절이 용이하다 (Hagin et al., 2002). 비료를 관비형태로 공급하는 경우, 양분의 흡수율은 50 - 90%로, 입상비료 양분흡수율 (10 - 40%)의 2배 이상 높다. 이러한 관비의 비료이용효율은 비료의 용탈량을 감소시켜 비료공급량을 40 - 60%정도 절약할 수 있다 (Kumar and Singh 2002; Ebrahimian et al., 2014; Chauhdary et al., 2017). Chauhdary et al. (2017)은 균형 잡힌 관비를 통해 비료 사용량을 25% 줄일 수 있어 작물생산의 경제적 측면에서 유리하다고 하였다. 감자, 고추, 양파, 오이, 브로콜리, 토마토 및 엽채류 등 고소득 작물에 대한 관비연구들이 많이 수행되었다 (Moujabber et al., 2002; Ewais et al., 2010; Badr et al., 2011). 관비재배로 상추, 시금치, 무 등 엽근채류의 생산성이 향상되었고 (Kim, 1970), 관상용 고추와 방울토마토에서도 작물 수량과 품질이 향상되었다고 하였다 (Cho et al., 1998; Kang et al., 2003). Jung et al. (2005)와 Ha et al. (2015)은 오이와 애호박 관비 재배시 질소효율이 각각 40%, 25% 증가한다고 하였다. Ha et al. (2015)은 우리나라 시설재배 토양의 높은 양분집적 특성으로 인해, 관비로 양분을 공급할 경우 표층시비에 비해 양분이용 효율이 높아질 수 있기 때문에 양분공급량을 줄여야 한다고 하였다.

우리나라 관비재배 면적 (점적관수)은 2017년도 기준으로 23,974 ha로 시설 온실 관수시설의 약 46%를 차지하고 있고, 관비면적은 매년 꾸준히 증가하고 있다 (MAFRA, 2018). 우리나라 시설 배추의 재배면적은 2,398 ha로 전체 엽채류중 두 번째로 재배면적이 크다 (MAFRA, 2018). 배추의 비료공급량은 표준비료사용량과 토양검정 비료사용량으로 설정되고 있으며 시설 배추의 표준비료사용량은 질소-인산-칼리가 17.8-3.0-7.3 kg 10a⁻¹이며, 현재는 밑거름과 웃거름의 비율 (질소 35:65, 인산 100:0, 칼리 55:45)만 제시되어 있다 (NIAS, 2017). 이 중 토양검정에 의한 비료사용량은 작물별 양분 흡수량과 토양에 함유된 양분함량을 고려한 비료사용량으로 농경지의 양분집적을 예방하고 양분을 골고루 공급할 수 있는 합리적인 비료사용량으로 알려져 있다 (NIAS, 2017). 그러나 영농 현장에서는 농가 경험에 의존해 관비로 비료를 공급하는 경우가 많아 과학적인 작물별 관비공급 계획 수립이 필요한 실정이다.

일반적으로 관비로 양분을 공급하면 표층시비에 비해 양분이용효율이 높아 작물을 안정적으로 생산하기 위해서는 양분이 필요한 시기에 필요한 양만큼을 공급할 수 있도록 설계된 매뉴얼 개발이 필수적이다 (Azad et al., 2018). 본 연구에서는 시설 봄배추 관비재배시 요구도가 가장 높은 질소를 4개 수준으로 공급한 후 생육단계별로 생육과 양분흡수 양상을 파악하였다. 또한 이를 바탕으로 시설 봄배추 관비재배시 질소, 인산 및 칼륨의 적정 웃거름 관비공급량을 설정하였다.

Materials and Methods

공시재료 및 재배 전북 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 구내 종합유리온실에서 포트당 10 kg씩 충진하여 (용적밀도 1.3 g cm⁻³) 결구품종인 ‘진청’ (팜한농)을 공시품종으로 하여 2018년 4월 17일에 정식하고 6월 27일

에 수확하였다. 시험전 토양 이화학성 분석결과는 Table 1과 같다. 토양 pH와 치환성 칼슘함량은 시설배추 토양 적정 범위보다 약간 높았으나, 대부분의 화학성은 적정범위보다 낮았다. 토양검정 질소공급량은 $29.5 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ ($y = 32.525 - 0.108x$; y : 질소비료 사용량, x : 토양중 질산태 질소, NIAS, 2017)이었고, 인산과 칼리의 공급량은 각각 15.6 , $20.9 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 하였다. 밑거름과 웃거름 공급비율은 질소는 35:65, 인산은 전량 밑거름으로 공급하고, 칼리는 55:45을 적용하여 (NIAS, 2017), 밑거름은 1.0배 기준으로 10a 당 질소는 10.3 kg , 인산은 15.6 kg , 칼리는 11.5 kg 수준으로 처리하여 토양과 혼합하였다 질소의 웃거름 공급량은 토양검정량을 기준으로 0.5배, 0.75배, 1.0배, 1.5배 수준별로 처리하고 (Table 2), 질소 (요소)와 칼리 (염화칼리) 웃거름을 배추 정식후 본엽이 5매 전개되는 때부터 시작하여 20일후에, 그 후로는 10일 간격으로 총 3회에 걸쳐 관비시설을 통해 공급하였다. 물관리는 발작물 물관리 지침 (NIAS, 2018)에 따라 1회 관수량을 설정하였고 33 kPa 이상에서 관수하였다.

Table 1. Physico-chemical properties of the soils prior to Chinese cabbage cultivation.

Soil texture	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg kg^{-1})	OM (g kg^{-1})	Av. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Ex. Cations ($\text{cmol}_c^+ \text{ kg}^{-1}$)		
						K	Ca	Mg
Sandy loam	7.4	0.8	28	23	320	0.40	7.1	1.0
optimum range*	6.0 - 6.5	< 2	50 - 200	25 - 35	350 - 450	0.65 - 0.80	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0

*Optimum range for Chinese cabbage cultivation in greenhouse soil (NIAS, 2017).

Table 2. Nitrogen(N), phosphate and potassium supply ($\text{kg } 10\text{a}^{-1}$)with treatments for Chinese cabbage cultivation.

Treatments	N		P_2O_5	K_2O	
	Basal	Supper-dressing	Basal	Basal	Supper-dressing
0.5N		9.6			
0.75N		14.4			
1.0N	10.3	19.2	15.6	11.5	9.4
1.5N		28.8			

생육조사, 식물체 및 토양분석 배추 정식 후 40일부터 10일 간격으로 3회에 걸쳐 식물체 (지상부)를 채취하여 건물중과 양분흡수량을 분석하였다. 식물체를 건조 (80°C , 48시간)하여 마쇄한 후, 식물체 분석시료 0.5 g 에 식물체 분해액 ($377 \text{ mM H}_2\text{SO}_4 + 36\% \text{ HClO}_4$)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 nm 에서 측정하였다. 인산은 UV-Spectrometer (Hitachi, Japan)을 이용하여 880 nm 에서 측정하였다. 칼리 등 양이온함량은 ICP (GBC, Intergra XL, Australia)를 이용하여 측정하였다 (Lee et al., 2017b). 양분흡수량은 지상부의 건조 무게당 N, P, K 함량을 곱하여 산정하였으며, 재식밀도는 10a 당 4,000주를 적용하였다.

토양 이화학성 분석은 농촌진흥청 분석법에 준하여 실시하였다 (NAAS, 2000). 토양 건조 후, 2 mm 체로 쳐서 분석시료로 사용하였고, 질산태 질소는 습토 5 g 에 $2\text{M KCl } 25 \text{ mL}$ 30분간 진탕후 여과 (Whatman No.2)하여 질소자동 분석기로 분석하였다 (440 nm) (Lee et al., 2017a). pH와 EC는 토양과 증류수 1:5의 비율로 30분간 진탕한 후 pH meter/EC meter로 측정하였다. 유효인산은 토양시료 5 g 에 Lancaster 용액 ($333 \text{ mM Acetic acid} + 1.5\text{N Lactic acid} + 30 \text{ mM Ammonium Fluoride} + 213 \text{ mM Sodium Hydroxide} + 50 \text{ mM Ammonium Sulfate}$, pH 4.25) 20 mL 를 넣

고 10분간 진탕하여 여과 (Whatman No.2)한 후 증류수로 희석하여 UV-Spectrometer를 이용해 측정하였다 (720 nm). 양이온 분석은 건토 5 g에 1N Ammonium acetate (pH 7.0) 25 mL을 가하여 30분간 침출후 여과 (Whatman No.2)하여 ICP로 분석하였다.

웃거름 공급량 산정 시설 봄배추의 웃거름 공급량 산정을 위해 생육단계별 양분 (질소, 인산, 칼리) 흡수량을 구하여 각 생육 단계를 고려하여 일주일 단위로 환산하였다. 일평균 흡수량을 구하기 위해 $n+1$ 차 시기의 양분흡수량에서 n 차시기 양분흡수량의 차이를 일수로 나누어 계산하였다. 최종 차수의 흡수량은 최종수확기 양분흡수량에서 바로 앞 시기의 흡수량을 모두 합하여 뺀 차이를 계산하였다. 총 양분 흡수량에 웃거름 공급비율을 곱하여 웃거름 공급량을 산정하였다. 웃거름 공급비율은 질소는 65%, 인산은 50%, 칼리는 45% (NIAS, 2017)로 하였고, 양분의 이용효율은 질소, 인산 및 칼리를 각각 90%, 50% 및 80%를 적용하였다 (Kumar and Singh, 2002). 배추의 생육단계는 건물중과 발작물 물관리 지침 (NIAS, 2018)을 참고하여 구분하였다.

시험구 배치 및 통계분석 본 실험의 시험구 배치는 완전임의 배치법 3반복으로 하였다. 각 실험결과를 엑셀프로그래를 이용해 평균치와 표준편차를 계산하였다. 질소 수준별 처리간 비교를 위해 SAS 프로그램으로 ANOVA 분석을 실시한 다음, 통계적 유의성이 인정될 경우 Tukey 검정을 실시하였다.

Results and Discussion

배추 생육특성 및 토양 화학성 배추의 생장량은 정식 40일 까지 질소공급량에 영향을 받지 않았으나, 결구기에 질소공급량이 증가함에 따라 생장량도 증가하는 경향을 보였다 (Table 3). 건물중 기준으로 배추 생장량은 정식 40일까지는 151 - 206 kg 10a⁻¹, 정식 60일에는 264 - 312 kg 10a⁻¹였다. 이는 2017년 기준 시설 봄배추 재배단수인 4,574 kg 10a⁻¹ (생중)에 비하여 (MAFRA, 2018), 다소 낮은 것으로 판단되었으며, 향후 재배환경, 품종의 영향을 고찰할 필요가 있는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 시설 상추 및 시설 참외의 질소공급 수준별 생육결과와도 유사하여 (Jung et al., 2010; Lee et al., 2018) 질소공급량이 작물의 생육에 직접적인 영향을 미치는 것이 확인되었다. 토양검정을 통해 배추 재배에 필요한 비료량을 관비시스템을 이용하여 웃거름으로 공급하는 경우 질소 처리 0.75배, 1.0배 및 1.5배 간 유의적 차이가 없어, 질소의 이용효율을 최대 25%까지 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다 (Table 3). Lee et al. (2018)는 시설 상추에서 파종후 60일까지는 질소 수준별 처리간에 생육 차이가 크지 않아 생육초기 (유묘기 - 엽신장기)에는 관비 농도를 낮추어 작물의 양분독성을 방지하는 것이 유리하고, 관비 재배시 웃거름 질소 이용 효율이 토양 검정 질소 웃거름량의 최대 50% 까지 증가한다고 하였다.

Table 3. Effect of nitrogen supply on Chinese cabbage growth (kg 10a⁻¹, DW) cultivated during Spring season (from April to June).

Days after transplanting	N supply level			
	0.5N	0.75N	1.0N	1.5N
40	150.5c	187.4ab	160.3bc	205.5a
60	263.9b	279.5ab	306.2a	311.8a

* Different letters for each row are significantly different at $P \leq 0.05$ according to Tukey's test.

시설 봄배추의 수확기 토양화학성은 질소 처리수준에 따라 토양 중 EC, 질산태 질소 함량, 치환성 칼륨 및 칼슘 함량은 다소 증가하는 경향을 보였다 (Table 4). 특히 토양 질산태 질소 함량이 낮은 0.5배에서 1.0배 처리구에서는 $4-32 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 낮은 수준이었으나 1.5배 처리구에서 97 mg kg^{-1} 으로 크게 증가하였다. Sandal and Kapoor (2015)는 관비 및 관개수를 부적절하게 관리할 경우 직접적으로 질산태 질소 손실에 영향을 주기 때문에 물과 질소 비료 투입에 유의해야한다고 한바와 같이, 토양의 질산태 질소 집적을 고려할 때, 배추의 질소 관비 공급량은 토양검정 질소 윗거름량 1.5배보다 낮게 유지하는 것이 토양의 염류집적 및 그에 따른 환경영향을 최소화할 수 있을 것으로 판단되었다.

또한 시설 배추 재배시 토양 질산태 질소 함량이 $18-32 \text{ mg kg}^{-1}$ 정도로 유지되는 질소 0.75배와 1.0배 처리구에서 배추의 적정 생육이 정상적인 것으로 나타났다. Hong (1998)은 토마토 질소 무비재배에서 질산태 질소 함량이 28.8 mg kg^{-1} 이었고 Kang and Hong (2004)은 시설 토마토 재배시 질산태 질소함량의 하한과 상한 기준을 각각 50, 280 mg kg^{-1} 이라 하였다. 시설 배추 재배를 위한 토양 질산태 질소 하한 및 상한기준 마련을 위해 토양비옥도별 무비 재배구의 질산태 질소 함량에 대한 추가 고찰이 필요하다.

Table 4. Chemical properties of the soils after Chinese cabbage cultivation with N supply levels.

Treatments	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg kg^{-1})	OM (g kg^{-1})	Av. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Ex. Cations ($\text{cmol}_c^+ \text{ kg}^{-1}$)		
						K	Ca	Mg
0.5N	6.2a	0.4c	3.7d	27.3	263	0.17bc	3.5c	1.4c
0.75N	6.0b	0.4c	17.9c	27.3	300	0.13c	3.2d	1.4b
1.0N	6.1ab	0.7b	32.0b	27.4	277	0.19ab	3.8b	1.3c
1.5N	5.7c	1.8a	97.2a	26.6	301	0.23a	4.1a	1.6a

* Different letters for each column are significantly different at $P \leq 0.05$ according to Tukey's test.

배추의 양분흡수 특성 및 관비 윗거름 공급량 배추의 생육단계별 질소, 인산, 칼리의 흡수량은 생장량과 마찬가지로 생육기간이 경과함에 따라 증가하는 양상을 보였다 (Table 5). 질소의 경우 정식 40일까지 전체 질소 흡수량의 60%, 이후 결구기인 정식 60일까지 40%를 흡수하였다. 인산은 정식 40일까지 전체 인산 흡수량의 56%, 이후 결구기인 정식 60일까지는 44%를 흡수하였다. 칼리는 동일한 시기에 대해 각각 60%와 40%를 흡수하는 것으로 나타났다. 질소는 아미노산의 amino groups을 생성하고 핵산의 purine과 pyrimidin 염기의 고리구조에 결합해 존재하며, 에너지 항상성 (Homeostasis), 신호 및 단백질 조절기작에 관여하여 생육초기에 상당부분의 흡수가 일어나는 것으로 판단된다. 비단백질 화합물로 질소는 보조효소 (Co-enzyme), 광합성 색소 (Photosynthetic pigments), 2차 대사체, polyamine의 생화학에 필수적이다 (Tischner, 2000; Orsel et al., 2002). 인산은 3인산 (triphosphate) 핵산의 형태로 DNA와 RNA의 기본골격을 형성하고 세포막의 음전하를 형성하는 역할을 한다 (Gaude et al., 2008). 칼리는 proton을 액포의 루멘으로 축적시키는 액포 PPase 효소를 활성화 시키고 탄소대사와 관련된 pyruvate kinase, phosphofructokinase, ADP-glucose starch synthase 등 많은 효소의 활성화에 관여한다 (Marschner, 1995; Maathuis, 2009).

시설 봄배추의 생육단계별 건물 생산성, 양분흡수량 및 관비공급에 의한 양분이용효율을 고려하여 산정한 윗거름 공급량은 Table 6와 같다. 정식 후 2주까지는 생육초기 배추의 활착기간으로 윗거름 공급 없이 밑거름을 통해 물과 양분을 공급하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 설정된 관비 윗거름 질소 공급량은 경엽 신장기 (정식

Table 5. Daily mineral uptake rate ($\text{g } 10\text{a}^{-1} \text{ day}^{-1}$, average of 0.75N and 1.0N) of Chinese cabbage cultivated during Spring season (from April to June).

Days after transplanting	Mineral uptake		
	N	P	K
40	150.5 ± 14.1	16.3 ± 1.6	158.4 ± 6.6
60	358.0 ± 50.5	41.3 ± 2.2	450.6 ± 12.6

Table 6. Weekly fertigation scheduling ($\text{g } 10\text{a}^{-1}$) of N, P_2O_5 and K for greenhouse spring Chinese cabbage. Fertilization level was estimated based on mineral uptake, nutrient use efficiency and target yield ($1 \text{ Mg } 10\text{a}^{-1}$, FW).

Growth stages	Weeks after transplanting	Cultivation : early April ~ late June		
		Plant density : $4,000 \text{ plant } 10\text{a}^{-1}$		
		N	P_2O_5	K_2O
Early stage	1	-	-	-
	2	-	-	-
Leaf elongation	3	210	120	345
	4	210	120	345
	5	210	120	345
	6	210	120	345
Heading	7	330	200	650
	8	330	200	650
	9	330	200	650
Total requirement		1,830	1,080	3,330

후 3주 - 정식 후 6주)까지는 매주 질소 $210 \text{ g } 10\text{a}^{-1}$ 이 필요하고, 결구기 (정식 후 7주 - 정식 후 9 주)에는 $330 \text{ g } 10\text{a}^{-1}$ 이 요구되었다. 시설 수박의 경우, 재배시기 및 생육단계별 질소 웃거름 공급량은 봄 작기에는 생육초기-최성기-생육후기에 6-90-4%, 여름에는 25-50-25%의 비율로 공급하는 것이 생육과 수량에 효과적이라고 보고된 바와 같이 (Sung et al., 2016), 관비로 질소를 공급하는 경우에는 작물의 생육특성을 고려한 생육단계를 구분하여 공급하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

인산 웃거름 공급량은 경엽 신장기 (정식 후 3주 - 정식 후 6주)까지는 $120 \text{ g } 10\text{a}^{-1}$ 가 필요하고, 결구기 (정식 후 7주 - 정식 후 9주)에는 $200 \text{ g } 10\text{a}^{-1}$ 이 필요한 것으로 계산되었다. Alam (2005)은 노지 밀 재배 시 인산 웃거름 공급으로 생산성과 인산 흡수량이 약간 증가한다고 하였다. 우리나라의 전통적인 인산 시비방법은 밑거름 중심이었으나 (NIAS, 2017), 작물의 양분 흡수량, 관비를 통해 인산 공급시 이용효율 등을 감안할 때 인산 웃거름 공급량 설정이 필요한 것으로 판단된다. Lee et al. (2018)은 시설 상추에서 생산성과 인산 흡수량을 감안할 때 인산 웃거름 공급이 필요하다고 하였다. 향후 작물 생산성뿐만 아니라 인산의 이동성, 토양 집적을 고려한 인산 웃거름 공급량 설정에 대한 고찰이 필요하다.

칼리 웃거름 공급량은 경엽 신장기 (정식 후 3주 - 정식 후 6주)까지는 $345 \text{ g } 10\text{a}^{-1}$ 이 필요하고, 결구기 (정식 후 7주 - 정식 후 9주)에는 $650 \text{ g } 10\text{a}^{-1}$ 이 필요한 것으로 나타났다. 전체 웃거름을 관비로 공급시 양분별 공급비율은 질소-인산-칼리가 약 1.7:1.0:3.1의 비율로 공급하는 것이 작물생육에 가장 유리한 것으로 나타났다. Chauhdary et al. (2019)은 반건조 기후에서 옥수수 재배시 점적관수를 관비요구량의 100%를 매일 공급할 때 가장 생산성이 높다고 추천하

였다. Sandal and Kapoor (2015)은 관비 스케줄 등 모듈을 개발하는데 중요한 요인은 토양 유형, 유효태 질소, 인산, 칼리 함량, 유기 탄소, 토양 pH, 토양 포장 용수량, 유효수분 용량 범위, 토양 입자 크기 분포, 작물 유형, 생리학적 생육 단계 등을 고려할 필요가 있고, 효과적인 관비 스케줄 설계를 하려면 첫째, 작물-토양 특이적 양분관리, 둘째, 작물의 요구도에 맞는 양분공급 타이밍, 셋째, 유효 근권부 아래의 수용성 양분의 용탈을 최소화할 수 있는 효과적인 관개 수 조절 기술이 필요하다고 하였다. 시설 작물 재배를 위한 현장 적용성이 높은 관비스케줄을 개발하기 위해 다양한 요인과 환경영향 부분에 대한 추후 고찰이 필요하다.

Conclusions

시설 봄배추 재배시 생육단계별 양분흡수량을 바탕으로 관비 옷거름 공급량을 설정하였다. 시설 봄배추의 생육단계별 건물량은 질소 공급량과 선형적인 관계를 보였고, 배추의 생산성, 토양의 질산태 질소 함량 등을 고려할 때 토양 검정 옷거름 질소 0.75배와 1.0배가 가장 적합하였다. 시설 봄배추 양분(N, P, K)흡수량은 경엽신장기에는 55 - 60%, 결구기에는 40 - 45%를 흡수하는 것으로 나타났다. 이러한 배추 생육과 양분흡수 특성을 바탕으로 목표수량에 따른 관비 공급 스케줄을 설정한 결과, 경엽신장기(- 정식 6주)에는 생중량 1톤 생산을 기준으로 질소 210, 인산 120, 칼리 345 g 10a⁻¹를 공급하고, 이후 결구기(정식 7주 - 9주)에는 질소 330, 인산 200, 칼리 650 g 10a⁻¹를 공급해야하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 향후 관비 스케줄의 현장 적용성을 높이기 위해서는 토양검정 및 양수분 센서를 연계한 실시간 맞춤형 관비공급량 설정과 다양한 토양특성, 수분 등 환경요인을 고려한 관비 모듈 개발이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No.PJ010899)”, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Azad, N., B. Javad, R. Vahid, F. Abbasi, and M. Navabian. 2018. Developing an optimization model in drip fertigation management to consider environmental issues and supply plant requirements. *Agric. water manag.* 208:344-356.
- 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, B.A. Engel, and R. Ragab. 2019. Improving corn production by adopting efficient fertigation practices: Experimental and modeling approach. *Agric. water manag.* 221:449-461.
- 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. *Korean 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.
- Gao, X.D., T.T. Meng, and X.N. Zhao. 2017. Variations of soil organic carbon following land use change on deep-loess hillslopes in China. *Land Degrad. Dev.*, 28:1902-1912.
- Gaude, N., Y. Nakamura, W.R. Scheible, H., Ohta, and P. Dormann. 2008. Phospholipase C5 (NPC5) is involved in galactolipid accumulation during phosphate limitation in leaves of *Arabidopsis*. *Plant J.* 56:28-39.
- Ha, S.K., Y.K. Son, 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. *CNU J. Agri. Sci.* 42(4):319-324.
- Hagin, J., M. Sneh, and A.A. Lowengart. 2002. Fertigation – Fertilization through irrigation. IPI research Topics No. 23. Ed. by A.E. Johnston. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Hong, S.D. 1998. Fertilizer recommendation based on soil testing for tomato in plastic film house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31:350-358.
- 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. *Korean J. 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. *Korean J. Hort. Sci. Tech.* 44(4):523-529.
- Kang, S.S. and S.D. Hong. 2004. Estimation of optimum application rate of nitrogen fertilizer based on soil nitrate contraction for tomato cultivation in plastic film house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:74-82.
- Kim, M.S., Y.H. Kim, M.Y. Roh, S.S. Kang, H.B. Yoon, and H.Y. Lee. 2012. Effect of chelating agents on the growth of Chinese cabbage and availability of nutrients in plastic film house soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):949-954.
- Kim, Y.C. 1970. Research on developing agricultural resources by fertigation cultivation. 1. Productivity by fertigation and composition for fertigation. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 8:93-105.
- Kumar, A. and A.K. Singh. 2002. Improving nutrient and water use efficiency through fertigation. *Water Management.* 10:42-48.
- Lee, S.B., J.K. Sung, Y.J. Lee, J.E. Lim, Y.S. Sung, D.B. Lee and S.Y. Hong. 2017a. Analysis of soil total nitrogen and inorganic nitrogen content for evaluating nitrogen dynamics. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(2):100-105.
- Lee, S.B., Y.M. Kim, J.K. Sung, Y.J. Lee, and D.B. Lee. 2018. Characteristics of Growth-Stage-Based Nutrient Uptake of Lettuce Grown by Fertigation Supply in a Greenhouse. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(4):626-635.
- Lee, S.T., Y.B. Kim, Y.H. Lee, and S.D. Lee. 2006. Effect of fertigation concentration on yield of tomato and salts accumulation in soils with different EC level under PE film house. *Korean J. Environ. Agric.* 25:64-70.
- Lee, Y.J., J.K. Sung, S.B. Lee, J.E. Lim, Y.S. Sung, D.B. Lee and S.Y. Hong. 2017b. Plant analysis methods for evaluating mineral nutrient. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(2):93-99.
- Maathuis, F.J.M. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12:250-258.
- MAFRA. 2018. Statistics of greenhouse facilities and vegetable productivity. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong-si, Republic of Korea.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition in Higher Plants. London: Academic Press.
- Mattson, N.S. and M.W. van Iersel. 2011. Application of the “4R” Nutrient Stewardship Concept to Horticultural Crops: Applying Nutrients at the “Right Time”. *Hort. Tech.* 21(6):667-673.

- Mmolawa, K. and D. Or. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and Soil*. 222:163-190.
- 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.
- NAAS. 2000. Soil and plant analysis method. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NIAS. 2017. Fertilizer recommendation for crop production (3rd ed.). National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju, Korea.
- NIAS. 2018. Manual of water use for upland crops with soil, crop species and region. National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju, Korea. pp. 24.
- Orsel, M., S. Filleur, V. Fraissier, and F. Daniel-Vedele. 2002. Nitrate transport in plants: which gene and which control? *J. Exp. Bot.* 53:825-833.
- Park, B.G., T.H. Jeon, Y.H. Kim, and Q.S. Ho. 1994. Status of farmer's application rates of chemical fertilizer and farm manure for major crops. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27:238-246.
- Sanchez, C.A. and T.A. Doerge. 1999. Using nutrient uptake patterns to develop efficient nitrogen management strategies for vegetables. *Hort. Tech.* 9(4):601-606.
- Sandal, K.S. and R. Kapoor. Fertigation technology for enhancing nutrient use and crop productivity; An overview. *Himachal J. Agric. Research*. 41(2):114-121.
- 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.
- Tischner, R. 2000. Nitrate uptake and reduction in higher and lower plants. *Plant Cell Environ.* 23:1005-1024.
- Veneklaas, E.J., H. Lambers, J. Bragg, P.M. Finnegan, C.E. Lovelock, W.C. Plaxton, C.A. Price, W.R. Scheible, M. W. Shane, P.J. White, and J.A. Raven. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist*. 195:306-320.
- Zuo, H.J., Y.L. Bai, Y.L. Lu, L. Wang, H. Wang, and Z.Y. Wang. 2012. Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat in North China plain based on high abundance of ¹⁵N. *Scientia Agricultura Sinica*. 15:3093-3099.