

PLANT&FOREST

Water/nutrient use efficiency and effect of fertigation: a review

Woojin Kim^{1,†}, Yejin Lee^{2,†}, Taek-Keun Oh^{3,*}, Jwakyung Sung^{1,*}

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

²Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

³Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

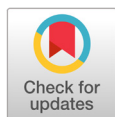
[†]These authors equally contributed to this study as first author.

*Corresponding authors: ok5382@cnu.ac.kr, jksung73@chungbuk.ac.kr

Abstract

Fertigation, which has been introduced in agricultural fields since 1990, has been widely practiced in upland fields as well as in plastic film houses as part of the crop production system. In accordance with demands in the agricultural sector, a huge number of scientific studies on fertigation have been conducted worldwide. Moreover, with a combination of advanced technologies such as big-data, machine learning, etc., fertigation is positioned as an indispensable tool to achieve sustainable crop production and to enhance nutrient and water use efficiency. In this review, we focused on providing valuable information in terms of crop production and nutrient/water use efficiency. A variety of fertigation studies have described that enhancement of crop production did not differ relative to conventional method or slightly increased. In contrast, fertigation significantly improved nutrient/water use efficiency, with a reduction in use ranging from 20 to 50%. Water-soluble organic resources such as livestock manure and agricultural byproducts also have been identified as useful resources like chemical fertilizers. Furthermore, the initial irrigation point was generally recommended in a range of -10 – -40 kPa, although the point differed according to the crop and crop growth stage. From this review, we suggest that fertigation, which is closely integrated with advanced technology, could be a leading technology to attain not only food security but also carbon neutrality via improvement of nutrient/water use efficiency.

Key words: fertigation, irrigation, nutrients, vegetable crops



OPEN ACCESS

Citation: Kim W, Lee Y, Oh TK, Sung J. Water/nutrient use efficiency and effect of fertigation: a review. Korean Journal of Agricultural Science 49:919-926. <https://doi.org/10.7744/kjoas.2022.083>

Received: September 13, 2022

Revised: November 08, 2022

Accepted: November 17, 2022

Copyright: © 2022 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

관비(fertigation)란 관개(irrigation)과 시비(fertilization)의 합성어로 관개수에 수용성 비료를 혼합하여 작물에 공급하는 방법이다. 관비재배는 관수방법에 따라 분사식(spray fertigation), 점적식(drip fertigation) 및 지중식(sub-surface drip fertigation)으로 구분되며, 분사식은 스프링클러와 같은 분사기구에 통해 엽면 또는 표층에 공급, 점적식과 지중식은 작물의 근권부에 공급하는 방식이다(Bar-Yosef, 1999; Mali et al., 2017). 토양의 보수·보비 및 완충능력을 활용하는 관비재배는 최적 양분관리방법인 4R (right source, right rate, right time, and right place)을

바탕으로 근권부에 양수분을 공급할 수 있어, 1) 양수분의 이용효율성 향상, 2) 수확량 및 품질 향상 및 3) 환경부하 경감 등의 효과를 얻을 수 있다(Hagin and Lowengart, 1996; Bruulsema et al., 2009). 양분 흡수·이용효율은 질소, 인산 및 칼륨이 각각 90 - 95, 40 - 45% 및 70 - 80%로, 표층시비에 비해 2배 이상 향상시킬 수 있다(Sandal and Kapoor, 2015). 또한, 관비재배의 높은 양분 이용효율은 토양 중 과도한 염류집적(Jin et al., 2004)과 용탈에 따른 지하수 오염(Abbasi et al., 2014) 등의 부작용을 경감할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 관비자재 및 관비기술의 발달은 양수분의 효율적 활용, 작물 수확량 증대뿐만 아니라 농작업의 편리성으로 인해, 시설재배지에서 광범위하게 활용되고 있으며, 최근에는 노지작물을 대상으로 관비재배기술의 개발과 현장활용이 활발하게 진행되고 있다.

따라서, 본 리뷰논문에서는 작물생산 과정 중 양수분의 효율성을 분석하는 방법들을 살펴보고, 특히 시설재배 작물의 관비효과를 평가하여 자원의 효율적 활용차원에서 관비(시설, 노지)의 현장적용 증대를 위한 연구방향과 고려해야 할 사항을 제시하고자 한다.

Water/nutrient use efficiency

작물생산에 소요된 물과 양분의 효율성을 평가하는 방법은 많은 연구자들에 의해 물과 양분의 이용효율을 평가하는 방법이 제안되었지만, 본 논문에서는 가장 보편적으로 활용되는 몇 가지 방법으로 정리하였다(Table 1).

Table 1. Definition and equation of some universal water/nutrient use efficiencies.

Resource	RUE	Calculation formula	Reference
Water	WUE (water use efficiency)	Crop yield (usually marketable)/total applied water	Howel, 2001
	IWUE (irrigation water use efficiency)	Yield (kg·plant ⁻¹)/total irrigation water (m ³ ·plant ⁻¹)	Singh et al., 2019
	CWUE (crop water use efficiency)	Yield (kg·plant ⁻¹)/crop water use (m ³ ·plant ⁻¹)	Singh et al., 2019
Nutrients	NUE (nutrient use efficiency)	Yield (kg·ha ⁻¹)/nutrient applied (kg·ha ⁻¹)	Singh et al., 2019; Contreras et al., 2020a
	FUE (fertilizer use efficiency)	Nutrient uptake (kg·ha ⁻¹)/nutrient applied (kg·ha ⁻¹)	Huang et al., 2018
Nitrogen	NUE (nitrogen use efficiency)	NU _p E × NU _t E = yield/N available	Huang et al., 2018
	NU _p E (nitrogen uptake efficiency)	NU _p /nav (soil + fertilizer) = acquired N/N available	Huang et al., 2018
	NU _t E (nitrogen utilization efficiency)	Yield/NU _p (assimilation of plant N to produce harvest)	Huang et al., 2018
	ANUE (agronomic NUE)	Marketable fruit yield (kg·ha ⁻¹)/nitrogen applied (kg·ha ⁻¹)	Yasuor et al., 2013
	BNUE (biomass NUE)	Biomass yield (kg·ha ⁻¹)/nutrient applied (kg·ha ⁻¹)	Yasuor et al., 2013
	PPNUE (plant production NUE)	Marketable fruit yield (kg·ha ⁻¹)/nitrogen uptake (kg·ha ⁻¹)	Yasuor et al., 2013

RUE, resource use efficiency.

작물과 수분과의 관계를 평가하는 방법은 요수량(물소모량/단위 건물생산량)과 수분이용효율(건물생산량/단위 물소모량)으로 구분할 수 있는데, 수분이용효율 평가의 측면에서는 후자를 바탕으로 한다. 시설재배의 경우, 단위 물소모량은 관개량으로, 노지재배는 단위 물소모량은 천연공급량 + 관개량을 적용하는 차이가 있다(Singh et al., 2019). 양분이용효율은 공급된 양분에 대한 수량으로 평가하는데(Singh et al., 2019; Contreras et al., 2020a) 일반적으로 작물의 필수 무기원소 중에 질소의 이용효율을 평가하는 것이 가장 광범위하게 활용되고 있다. 질소의 이용효율(nitrogen use efficiency, NUE)은 질소흡수효율(nitrogen uptake efficiency, NU_pE)와 질소활용효율(nitrogen utilization efficiency, NU_tE)의 곱으로 결정된다(Huang et al., 2018). 질소이용효율은 질소의 공급량과 흡수량 외에 작물의 생산량도 관여한다. 또한, 질소이용효율을 보다 세부적으로 평가하기 위한 몇 가지 방법들이 제시되었는데(Yasuor et al., 2013), 작물학적 질소이용효율(agronomic NUE, ANUE), 생물량 질소이용효율(Biomass NUE, BNUE) 및 작물 생산성 질소이용효율(plant production NUE, PPNUE)이다. ANUE는 질소공급량에 대한 상품성이 있는 수확물을, BNUE는 질소공급량에 대한 전체 생물량을, PPNUE는 질소흡수량에 대한 상품성이 있는 수확물을 평가하는 것으로 연구자의 질소이용효율 평가 방향에 따라 선택하여 사용할 수 있다.

Effects of fertigation

시설재배면적의 확대에 따라 국내외에서 수행된 관비연구는 2000년 이후로 약 16,900건(Google scholar, 2022)에 이르고 있으며, 국내에서도 많은 연구가 이루어져 2018년 기준 농촌진흥청 ‘농사로’에 등록된 관비관련 연구는 80여건에 이른다. 본 리뷰에서는 국내에서 주로 재배되는 시설재배작물 중, 연구목적에 부합하는 일부 자료만을 선택하여 분석하였다(Table 2).

Table 2. Effect of fertigation on yield and water/nutrient use efficiency in some greenhouse vegetable crops.

Plant	Fertigation	Application	Effect	Reference	
Pepper	OL: 280 kg·ha ⁻¹ 8.0(N)-2.6(P ₂ O ₅)-3.7(K ₂ O)% 880 kg·N·ha ⁻¹	30,000 L·ha ⁻¹ every 2 weeks after 16 DAT	Yield: 2.3 Mg·ha ⁻¹ NUE: 57.1 (N)-30.1 (P)-182.0 (K)%	Yi et al., 2020	
		Every day	Yield: 81.8 Mg·ha ⁻¹	Yasuor et al., 2013	
		ET-based irrigation amount	ENUE: 96.3%		
Strawberry	100% fertigation: N (urea) + K (K ₂ SO ₄) N-P-K = 20.5-3.6-29.6 kg·ha ⁻¹	SMP: -10 kPa	Yield: 24.0 - 33.1 Mg·ha ⁻¹	Kim et al., 2009	
		12 times every 2 weeks after 30 DAT SMP: -33 kPa	Yield: 51.1 Mg·ha ⁻¹	Lee et al., 2021	
Melon	1/2 - 1/4 of fertigation concentration by SD Urea (156 - 312 g) + KCl (123 - 246 g) ton ⁻¹	Every week during whole season	NUE: 75 (N)-64 (P)-81 (K)%		
		SMP: -15 kPa at vegetative stage SMP: -45 kPa at fruit stage.	Yield: 61.4 - 64.9 Mg·ha ⁻¹	Rhee et al., 2009	
Watermelon	34% fertigation: N (urea, 144 kg·ha ⁻¹)	1/2 (N) + 1/4 (K) strength of SD SMP: -33 kPa	Yield	Sung et al., 2016	
		8 - 10 times depending on the season	- Spring: 26.8 - 29.4 Mg·ha ⁻¹ - Summer: 42.7 - 51.7 Mg·ha ⁻¹ - Autumn: 32.9 - 37.6 Mg·ha ⁻¹		
Oriental melon	100% fertigation: N (urea) + K (KCl)	8 times every 10 days	Yield: 44.6 Mg·ha ⁻¹	Jung et al., 2010	
Zucchini	50% fertigation: N (urea, 113 kg·ha ⁻¹) EC 0.9 - 1.2 dS·m ⁻¹ PBG solution	9 times every 2 weeks	Yield: 84.8 Mg·ha ⁻¹	Ha et al., 2015	
		SMP: -35 kPa	Yield: 101 Mg·ha ⁻¹	Kim et al., 2008	
Cucumber	N-P-K = 240-112-248 kg·ha ⁻¹ (NIHHS)	EC-based SMP: -11 -- -9 kPa	Yield: 70.4 Mg·ha ⁻¹	Lee et al., 2006a	
		EC: 1.2-0.8-0.5 dS·m ⁻¹ by growth stage. 2 L·plant ⁻¹	Soil EC: 85% reduced		
Tomato	61% fertigation: N (urea, 180 kg·ha ⁻¹)	Irrigation point: 80% ET ₀	Yield: 51.6 Mg·ha ⁻¹	Wang et al., 2019	
		7 times every week			
	Fish meal liquid fertilizer (N-P-K = 10-1.01-2.71 kg·ton ⁻¹)	2 times every week (total 21 times)	Yield: 38.0 Mg·ha ⁻¹	An et al., 2017	
	SCBLF (N-P-K = 1.3-2.35-0.14 kg·ton ⁻¹)	SMP: -20 -- -15 kPa	Yield: 11.1 Mg·ha ⁻¹	Park et al., 2011	
	N-P-K = 200-170-110 kg·ha ⁻¹ (NIHHS)	EC 1.0 to 1.5 mS·cm ⁻¹ (N-P-K)	Yield: 28.5 Mg·ha ⁻¹	Lee et al., 2006b	
	100% fertigation: N (240) : P (80) : K (180) kg·ha ⁻¹	3 - 5 times a day 0.2 L·plant ⁻¹			
		12 times, every week	Yield: 74.9 Mg·ha ⁻¹ Recovery = 72 (N)-34 (P)-65 (K)% FUE (kg·yield·kg ⁻¹ NPK): 150	Badr et al., 2010	
70% fertigation: N (urea, 0.2 g·kg ⁻¹ soil)	7% during seedling stage	Yield: 497.1 g·plant ⁻¹ FW	Luo and Li, 2018		
SOF + CF	Vegetative: N (1.6) : P ₂ O ₅ (0.65) : K ₂ O (0.56) Reproductive: N (1.0) : P ₂ O ₅ (0.35) : K ₂ O (0.8) PSCB liquid manure	63% during flowering - fruit maturity	WUE: 25.3 kg·m ⁻³		
		Fertigation: ET ₀ -based	Yield: 75.2 Mg·ha ⁻¹	Wu et al., 2020	
		2 times during vegetative stage	NRE: 39.2%		
		6 times during reproductive stage	NAE: 176.8 kg·kg ⁻¹		
Spinach	75 kg·ha ⁻¹ ((NH ₄) ₂ SO ₄ + NH ₄ NO ₃)	SMP: -20 kPa at vegetative	Yield	Park et al., 2010	
		SMP: -30 kPa at Fruit setting and harvest	-117.7 Mg·ha ⁻¹ in semi forcing		
		52 g·ton ⁻¹ PSCB	-59.6 Mg·ha ⁻¹ in conventional		
Bitter melon	N (150) : P (120) : K (120) kg·ha ⁻¹	Irrigation: 20% of soil water content	Yield: 1.31 g·plant ⁻¹ DW	Machado et al., 2020	
		5 times, every week			
Bitter melon	N (150) : P (120) : K (120) kg·ha ⁻¹	Irrigation: ET 90%	Yield: 31.3 Mg·ha ⁻¹	Mali et al., 2017	
		SDI: 10 cm depth	IWP: 6.33 Mg·ha ⁻¹ ·mm ⁻¹		

OL, organic liquid fertilizer; SD, soil diagnosis; NIHHS, National Institute of Horticultural and Herbal Sciences; SCBLF, slurry composting biofiltration liquefied fertilizer; SOF, soluble organic fertilizer (18% N, 18% P₂O₅, 18% K₂O, 4% humus acid, 0.2% B, 0.1% Zn); CF, chemical fertilizer (urea, potassium dihydrogen phosphate, potassium sulfate); PSCB, pig slurry composting bio filtration; DAT, day after transplanting; ET, evapotranspiration; SMP, soil metric potential; ET₀, crop evapotranspiration; SDI, subsurface drip irrigation; IWP, irrigation water productivity.

화학비료와 유기질비료(축산분뇨, 농산부산물 등)는 시설작물 관비재배에서 주된 비료원으로 활용되고 있다 (Table 2). 화학비료의 경우, 질소는 질산염(질산칼륨, 질산칼슘, 질산마그네슘), 암모늄염(질산암모늄, 황산암모늄) 및 요소(urea)가 가장 일반적으로 사용된다. 질산염은 용해도가 높아 토양 중 이동성이 크고, 토양수를 따라 150 cm 이상의 깊이까지 이동하는 특성을 보인다. 반면, 암모늄염은 토양 콜로이드 입자에 결합되기 쉬워 이동성이 낮으며, 요소는 용해도가 높지만 암모늄으로 전환되어 토양 중 이동성이 크지 않은 경향을 보인다(Hanson et al., 2006). 인산은 음이온형태로 토양에 존재하지만 토양 콜로이드 입자에 강하게 흡착되며, 인산염 형태로 결정화되어 전량 기비의 형태로 공급하지만, 염수와 공급하는 경우에는 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다(Ma et al., 2020; Muhammad et al., 2021). 칼륨은 토양 콜로이드 입자에 쉽게 흡착되어 근권으로의 이동이 높지 않으나, 양이온치환 용량(cation exchangeable capacity, CEC)이 낮은 경우 이동성이 증가하는 특성을 보인다. 토양 중 비료원들의 용해 및 이동 특성을 바탕으로 적시에 적량을 근권에 공급하는 관비를 통해 양분의 흡수율 향상을 꾀할 수 있다. 또한, 유기질비료는 낮은 농도이지만 작물이 필요로 하는 필수영양원소를 포함하고 있어, 관비를 이용한 유기농업뿐만 아니라 관행농업에서도 활용되는 비료원이다.

관비로 공급되는 비중에 따라라도 작물의 수량 및 양분이용효율에도 영향을 미치는데, 시설 고추를 포함한 주요 시설작물(9작물)에 대한 효과를 분석하였다(Table 2). 일부 예로써, 딸기 관비재배시 생육, 수량, 토양전기전도도(electrical conductivity, EC)에 대한 효과를 고려할 때, 질소 공급원으로는 요소가 칼리 공급원으로는 황산칼리가 적합한 공급원이라고 보고하였다(Kim et al., 2009). 토마토 관비재배시 칼륨 공급원으로 질산칼륨, 염화칼리 및 염화칼리+염화마그네슘을 각각 처리하였을 때, 염화칼륨 + 염화마그네슘 혼용처리에서 토마토 과실의 품질이 가장 양호하였다(Chapagain and Wiesman, 2004). 토마토 관비재배시 등 다른 토양pH가 다른 조건(pH 6.9, pH 8.8)일 때, 높은 pH조건에서 수량이 감소하였지만, 질산암모늄 또는 황산암모늄 처리에 의해 수량 감소가 억제되었으며, 낮은 pH조건에서는 비중보다는 관비 농도가 증가할수록 수량이 증가하는 경향이 보였다(Kang et al., 2010). 유기질 액비는 화학비료의 사용을 감소시키거나 대체할 수 있는 수용성 비료로 관비 재배에 이용될 수 있다. 어분액비 100 mg·L⁻¹ 처리시 화학비료를 대체할 수 있어 유기농업에서 활용 가능하다(An et al., 2017). 토양검정에 의한 질소 기준 돈분액비 농도는 화학비료 대비 수확량에 대해 유의한 차이를 보이지 않아 화학비료를 대체할 수 있는 자원으로 평가되었다(Park et al., 2010). 또한 밀거름의 형태로 유기질 비료를 사용하는 경우 지효성인 유기질 비료의 특성으로 인해 토양의 양분 가용성의 지속적인 효과를 얻을 수 있는데, 관비재배시 밀거름으로 유기질 비료를 공급하였을 때 작물의 수량과 품질향상에 대한 효과가 일부 연구에서 입증되었다(Zhang et al., 2009; Lee et al., 2012; Selim and Ali-Mosa, 2012; Uhm et al., 2012; Khaitov et al., 2019; Machado et al., 2020). 따라서, 관비를 이용한 작물재배에서 작물 별 전생육기간 양분의 요구량, 토양 중 양분 가용성 및 토양의 이화학적 특성을 사전에 파악하는 것이 최적 관비 재배조건을 확립하는데 우선적으로 고려해야 할 사항으로 판단된다.

앞서 기술한 양분 요구량, 양분의 유형 이외에 고려해야 할 사항은 작물 별 관수개시점의 설정이다. 11개의 작물을 대상으로 관수 개시점 설정에 대한 연구결과를 정리하였다(Fig. 1). 대부분의 관수 개시점은 작물의 생육단계에 따라 변화를 주었는데, 대체로 -10 ~ -40 kPa의 범위로 나타났다. 이는 농촌진흥청에서 권장하는 작물의 관수개시점(-20 ~ -33 kPa)과 물절약을 위한 관수개시점(-33 ~ -50 kPa)의 범위와 상당히 일치하는 것으로 확인되었다.

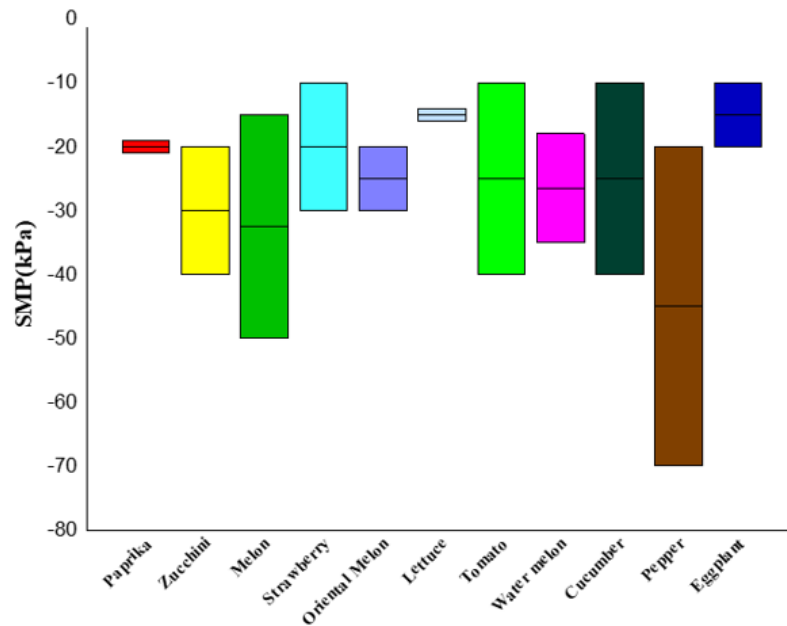


Fig. 1. Initial irrigation range employed in major greenhouse vegetable crops based on soil tension. The irrigation point is differed from crops by growth stage (vegetative - reproductive). SMP, soil moisture potential.

Conclusions

국내의 많은 시설재배 농가에서는 관비시스템(전체 시설농가의 약 50%)을 활용 중에 있으며, 최근에는 노지작물에 대한 관비시스템 적용이 시도되고 있다. 관비시스템 도입을 통한 작물의 생산성과 양분이용효율 평가와 관련된 연구사례를 분석하였을 때, 작물 수량과 양분의 이용효율이 향상된다는 것을 확인하였다. 관비 효과의 향상을 위해서는 작물 별 양분요구량 및 토양 중 양분의 가용성을 평가하는 것이 중요하다는 것을 제시하였다. 또한, 작물의 생육단계별 관수 개시점과 관비 횟수의 설정도 중요한 의사결정 사항이다. 본 리뷰 논문이 시설 재배작물 농가의 직접적 활용, 농업기술센터 담당자들의 교육활용자료 및 노지작물 관비 방법 개발 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 관비처방 기술 고도화를 위한 연구가 진행되길 제안한다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술개발 연구사업(Project No. PJ015635)의 지원으로 수행되었습니다.

Authors Information

Woojin Kim, Department of Crop Science, Chungbuk National University, Master student

Yejin Lee, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher

Taek-Keun, Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Professor

Jwakyung Sung, <https://orcid.org/0000-0002-0758-6644>

References

- Abbasi A, Sajid A, Haq N, Rahman S, Misbah ZT, Sanobar G, Ashraf M, Kazi AG. 2014. Agricultural pollution: An emerging issue. pp. 347-387. In *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes: Volume 1*. edited by Ahmad P, Wani MR, Azooz MM, Tran LSP. Springer, New York, USA.
- An NH, Cho JR, Gu JS, Kim YK, Han EJ. 2017. Effect of fish meal liquid fertilizer application on soil characteristics and growth of cucumber (*Cucumis sativus* L.) for organic culture. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 25:13-21. [in Korean]
- Badr MA, Abou-Hussein SD, El-Tohamy WA, Gruda N. 2010. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands. *Gesunde Pflanzen* 62:11-19.
- Bar-Yosef B. 1999. *Advances in Fertigation*. pp. 1-77. In *Advances in Agronomy* edited by Sparks DL. Academic Press, Newark, USA.
- Bruulsema T, Lemunyon J, Herz B. 2009. Know your fertilizer rights. *Crops and Soils* 42:13-18.
- Chapagain BP, Wiesman Z. 2004. Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield and quality of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae* 99:279-288.
- Contreras JI, Baeza R, Alonso F, Cánovas G, Gavilán P, Lozano D. 2020a. Effect of distribution uniformity and fertigation volume on the bio-productivity of the greenhouse zucchini crop. *Water* 12:2183.
- Google scholar. 2021. Fertigation and vegetable crops since 2010. Accessed in <https://scholar.google.co.kr/> on 12 October 2022.
- Ha SK, Sonn YK, Jung KH, Lee YJ, Cho MJ, Yun HJ, Sung JK. 2015. Estimation of growth stage-based nitrogen supply levels for greenhouse semi-forcing zucchini cultivation. *Korean Journal of Agricultural Science* 42:319-324. [in Korean]
- Hagin J, Lowengart A. 1996. *Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers*. pp. 23-25. Springer, New York, USA.
- Hanson BR, Simunek J, Hopmans JW. 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management* 86:102-113.
- Howel TA. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93:281-289.
- Huang S, Zhao C, Zhang Y, Wang C. 2018. Nitrogen use efficiency in rice. INTECH, Rijeka, Croatia. doi:10.5772/intechopen.69052.
- Jin SJ, Cho HJ, Chung JB. 2004. Effect of soil salinity on nitrate accumulation of lettuce. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 37:91-96. [in Korean]
- Jung KS, Jung KH, Park WK, Song YS, Kim KH. 2010. Establishment of the optimum nitrogen application rates for oriental melon at various growth stages with a fertigation system in a plastic film house. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43:349-355. [in Korean]
- Kang YI, Roh MY, Kwon JK, Park KS, Cho MW, Lee SY, Lee IB, Kang NJ. 2010. Changes of tomato growth and soil chemical properties as affected by soil pH and nitrogen fertilizers. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 29:328-335. [in Korean]
- Khaitov B, Yun HJ, Lee Y, Ruziev F, Le TH, Umurzokov M, Bo A, Cho KM, Park KW. 2019. Impact of organic manure on growth, nutrient content and yield of chilli pepper under various temperature environments. *Internal Journal of Environment Research* 16:3031.

- Kim J, Kim JM, Park ES, Chon HG, Jeong JS. 2008. Effect on the growth and yield in irrigation depth of zucchini pumpkin fertigation culture. *Journal of Bio-Environment Control* 17:431-436. (Abstract)
- Kim SY, Jang YA, Moon JH, Lee JG, Lee SG, Cha SH. 2009. Effects of nitrogen and potassium sources on growth and yield of strawberry 'Seolhyang' and 'Maehyang' in fertigation culture. *Journal of Bio-Environment Control* 18:436-441.
- Lee CH, Lim TJ, Kang SS, Kim MS, Kim YH. 2012. Relationship between cucumber yield and nitrate concentration in plastic film house with ryegrass application. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45:943-948. [in Korean]
- Lee SJ, Im TG, Kim HK, Ko SJ, Lim GC, Yang S. 2006a. Effect of EC level of fertigation according to growth stage on growth and yield of cucumber. *Journal of Bio-Environment Control Proceeding* 15:168-172.
- Lee ST, Kim YB, Lee YH, Lee SD. 2006b. Effect of fertigation concentration on yield of tomato and salts accumulation in soils with different EC level under PE film house. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 25:64-70.
- Lee YJ, Lee SB, Sung J. 2021. Optimal fertigation guide for greenhouse strawberry: Development and validation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 54:322-330. [in Korean]
- Luo H, Li F. 2018. Tomato yield, quality and water use efficiency under different drip fertigation strategies. *Scientia Horticulturae* 235:181-188.
- Ma C, Xiao Y, Puig-Bargues J, Shukla MK, Hou P, Li Y. 2020. Using phosphate fertilizer to reduce emitter clogging of drip fertigation systems with high salinity water. *Journal of Environmental Management* 263:110366.
- Machado RMA, Alves-Pereira I, Lourenço D, Ferreira RMA. 2020. Effect of organic compost and inorganic nitrogen fertigation on spinach growth, phytochemical accumulation and antioxidant activity. *Heliyon* 6:e05085.
- Mali SS, Jha BK, Singh R, Meena M. 2017. Bitter melon response to surface and subsurface drip irrigation under different fertigation levels. *Irrigation and Drainage* 66:615-625.
- Muhammad T, Zhou B, Liu Z, Chen X, Li Y. 2021. Effects of phosphorus-fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with saline water. *Agricultural Water Management* 243:106392.
- Park JM, Lim TJ, Kang SB, Lee IB, Kang YI. 2010. Effect of pig slurry fertigation on soil chemical properties and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43:610-615. [in Korean]
- Park JM, Lim TJ, Lee SE, Lee IB. 2011. Effect of pig slurry fertigation on soil chemical properties and growth and development of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44:194-199. [in Korean]
- Rhee HC, Park JM, Seo TC, Choi GL, Roh MY, Cho MW. 2009. Effects of nitrogen and potassium fertigation on growth, yield and quality of musk melon (*Cucumis melo* L.). *Journal of Bio-Environment Control* 18:273-279.
- Sandal SK, Kapoor R. 2015. Fertigation technology for enhancing nutrient use and crop productivity: An overview. *Himachal Journal of Agricultural Research* 41:114-121.
- Selim EM, Ali-Mosa A. 2012. Fertigation of humic substances improves yield and quality of broccoli and nutrient retention in a sandy soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175:273-281.
- Singh MC, Singh GK, Singh JP. 2019. Nutrient and water use efficiency of cucumbers grown in soilless media under a naturally ventilated greenhouse. *Journal of Agricultural Science and Technology* 21:193-207.
- Sung J, Jung K, Yun H, Cho M, Lim J, Lee Y, Lee S, Lee D. 2016. Optimal levels of additional N fertigation for greenhouse watermelon based on cropping pattern and growth stage. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 49:699-704. [in Korean]
- Uhm MJ, Noh JJ, Chon HG, Kwon SW, Song YJ. 2012. Application effect of organic fertilizer and chemical fertilizer on the watermelon growth and soil chemical properties in greenhouse. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31:1-8. [in Korean]
- Wang H, Li J, Cheng M, Zhang F, Wang X, Fan J, Wu L, Fang D, Zou H, Xiang Y. 2019. Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber. *Scientia Horticulturae* 243:357-366.
- Wu Y, Yan S, Fan J, Zhang F, Zheng J, Guo J, Xiang Y. 2020. Combined application of soluble organic and chemical fertilizers in drip fertigation improves nitrogen use efficiency and enhances tomato yield and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100:5422-5433.

- Yasuor H, Ben-Gal A, Yermiyahu U, Beit-Yannai E, Cohen S. 2013. Nitrogen management of greenhouse pepper production: Agronomic, nutritional, and environmental implications. *HortScience* 48:1241-1249.
- Yi P, Jung D, Selvakumar G, Lee S, Han S, Lee I. 2020. Analysis of soil nutrient balance and enzymatic activity and growth characteristics of red pepper under protected cultivation using organic liquid fertilizer based on condensed molasses soluble. *Horticultural Science and Technology* 38:730-741.
- Zhang CH, Kang HM, Kim IS. 2009. Influence of amount of waste nutrient solution and compost on growth and quality of tomato grown by fertigation. *Journal of Bio-Environment Control* 18:119-123.