

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.3.260>
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

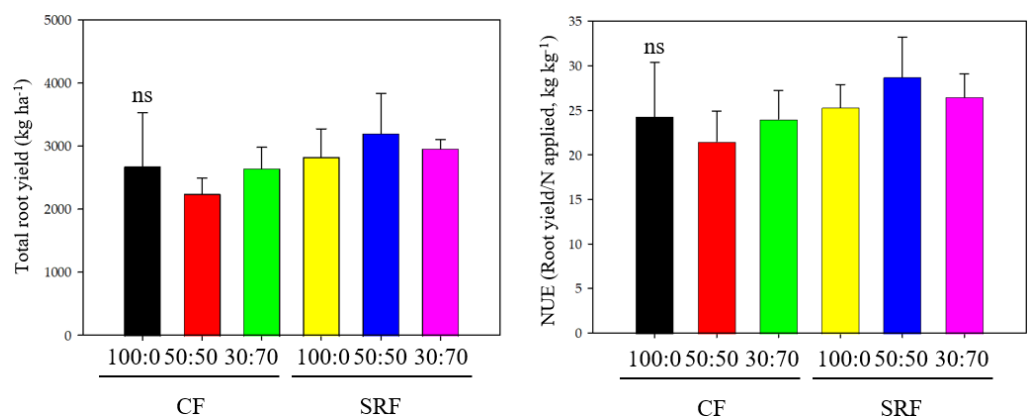
Yield and Nitrogen Use Efficiency of Upland Carrot Affected by Various Basal Fertilizers and Fertigation Ratios

Boyun Lee¹ and Jwakyung Sung^{2*}¹Graduate Student, Department of Crop Science, College of Agriculture, Life and Environment Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea²Professor, Department of Crop Science, College of Agriculture, Life and Environment Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea*Corresponding author: jksung73@chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 10, 2023**Revised:** August 22, 2023**Accepted:** August 31, 2023**Edited by**Chang Hoon Lee,
Korea National College of
Agriculture and Fisheries, Korea**ORCID**Jwakyung Sung
<https://orcid.org/0000-0002-0758-6644>

Fertigation is one of alternative measures not only to ensure crop yield but also to improve nutrient use efficiency. In this work, we evaluated growth and yield, nutrient uptake and nitrogen use efficiency of upland carrot. To do our goal, various basal fertilizers (single chemical and slow release) and fertigations were employed based on the result of soil diagnosis, and the detail was as follows; basal:fertigation = 100:0, 50:50, 30:70. Growth, yield, nutrient (N, P, K) uptake and nitrogen use efficiency were not different from treatments. However, slow release fertilizer resulted in enhancing economic yield (root) and nitrogen use efficiency compared to single chemical fertilizer, and an adjustment of basal:top dressing (fertigation) was relatively effective. In conclusion, the current results suggest that fertigation is favorable for upland carrot production, and the further study including the comparison with conventional practice (broadcasting) and organic fertilizers as a basal source is required to validate fertigation effect.

Keywords: Carrot, Fertigation, Nitrogen use efficiency, Yield

Economic yield and nitrogen use efficiency of upland carrot under the growth condition with different basal fertilizers and fertigation rates. ns: no significance.



Introduction

4차 산업혁명 기술발달에 힘입어 자동화/반자동화 농작물 생산시스템 기술의 발달과 실용화가 광범위하게 이루어지고 있으나, 개발·보급 중인 대부분의 기술은 주로 첨단온실에 국한되어 있다. 농업통계에 따르면 (KOSIS, 2022), 논을 제외한 우리나라 밭 면적 (752,597 ha)의 89% 정도가 노지형태로 작물을 재배하고 있어, 노동력 절감, 자원 (물, 양분 등) 효율화를 고려할 때 관행농법의 대체수단으로 작물재배 자동화 시스템의 도입이 시급한 실정이다.

최적의 양분관리 기술로써, 4R은 필요로 하는 양분을 (right source), 필요한 양만큼 (right rate), 필요한 시기에 (right time), 필요한 위치에 (right place)에 공급하는 방법으로 효율적인 양분관리가 가능한 기술이다 (Bruulsema et al., 2009). 4R 양분관리 기술을 실현할 수 있는 방법이 관개수를 이용하여 비료를 공급하는 방식인 관비 (fertigation)이다 (Hagin et al., 2002). 비료를 관비형태로 공급하는 경우, 양분의 흡수율은 50 - 90%로, 입상비료 양분흡수율 (10 - 40%)에 비해 2배 이상 높다 (Hagin et al., 2002; Jung et al., 2005). 관비는 비료의 용탈량을 감소시켜 비료 사용량을 25 - 60% 줄일 수 있어 작물생산 과정의 경제적 측면을 고려할 때 매우 유용한 방법이다 (Kumar and Singh, 2002; Ebrahimian and Playán, 2014; Chauhdary et al., 2017).

토마토, 참외, 애호박, 수박 등 고소득 시설재배 작물에 대한 관비연구를 통해 작물의 수량과 질소이용효율에 효과가 있음을 제시하였다 (Lee et al., 2007, 2019b; Jung et al., 2010; Ha et al., 2015; Sung et al., 2016). 또한, 고추와 대파의 노지 재배 시 관비효과에 대한 평가도 이루어졌다 (Lee et al., 2022a, 2022b).

당근 (*Daucus carota*)은 1 - 2년생의 근채류로 노지재배 (2,199 ha, KOSIS, 2022)를 주로 하고 있으며, 매작기 비료의 과다 사용으로 연작장해 및 수량감소가 발생하고 있다 (Kim et al., 2013). 당근은 경엽신장기인 파종 후 70일경부터 전체 양분의 60 - 80%를 흡수하는 것으로 알려져 있어 (Hwang et al., 1997). 생육초기보다 생육후기에 더 많은 양분을 필요로 하기 때문에 생육 시기별로 필요한 양의 양분을 공급해주는 것이 당근 생육 및 양분이용효율성 측면에서 유리하다. 따라서, 시설재배작물 국한되어 있는 관비재배 기술을 노지재배에 적용하기 위해서는 표준화된 양분관리 매뉴얼의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구는 밀거름 (단일비료, 완효성복합비료) 종류에 따라 밀거름과 관비 웃거름의 공급비율을 달리하였을 때 당근의 생육, 양분흡수량 및 질소이용효율을 평가하고자 수행하였으며, 연구결과를 바탕으로 노지 당근 표준관비처방서 작성을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

Materials and Methods

시험재료 및 처리방법 연구는 2022년 8 - 11월까지 충청북도 괴산군 (36°8'N, 127°7'E)에 위치한 농가포장에 서 수행하였으며, 연구기간 평균 기온은 11.1°C, 총 강수량은 1,268 mm로 확인되었다 (KMA, 2022). 당근 품종은 ‘에이스 ((주)제농 에스앤티)’이며, 초세가 왕성하고 내한성이 좋아 재배가 용이한 특성을 가지고 있다. 이랑폭을 1 m로 하여 4줄 줄뿌림으로 당근을 파종하였으며, 유묘가 활착한 후 2번에 걸쳐 2본씩 남기고 솟아주기를 하였다. 처리당 시험구 면적은 8.5 m²로 하였으며, 난괴법 3반복 시험구로 배치하였다.

밀거름은 단일비료 (N-P₂O₅-K₂O = 요소-용과린-염화칼리)와 완효성비료 (slow release fertilizer, SRF, N-P₂O₅-K₂O = 15-5-8%)를 토양검정 총 비료사용량 (Table 1, NIAS, 2019)의 100%, 50% 및 30%로 공급하였고, 완효성비료에 의한 부족량은 단일비료로 추가 공급하였다 (단위면적 (ha) 당 밀거름 100% 기준 용과린 및 염화칼리 96 kg 공급).

웃거름은 총 질소 (요소)와 칼륨 (염화칼리) 공급량의 0, 50 및 70%를 파종 후 30일부터 일주일 간격으로 9회에 걸쳐 관비로 공급하였다 (Table 1). 인산은 전량 밑거름으로 공급하였다.

Table 1. Fertilization recipe by treatments based on soil diagnosis.

Treatment		Basal (kg ha ⁻¹)			Fertigation (kg ha ⁻¹)		
		N	P	K	N	P	K
CF	100:0	434	429	274	-	-	-
	50:50	217	429	137	217	-	137
	30:70	130	429	82	304	-	192
SRF	100:0	1,333	-	-	-	-	-
	50:50	666	-	-	217	-	137
	30:70	400	-	-	304	-	192

시료채취 및 분석 토양 이화학성 분석은 농촌진흥청 분석법에 준하여, 토양 건조 후, 2 mm 체로 쳐서 분석시료로 사용하였다 (Lee et al., 2017a). 토성은 비중계법 (Gee and Boudier, 1986)으로 분석하였다. 토양 pH와 EC는 토양과 증류수 1:5의 비율로 30분간 진탕한 후 pH meter/EC meter (Thermo Scientific, USA)로 측정하였다. 토양의 총 질소 함량은 CN 분석기 (Primacs SNC 100, SKALAR, Breda, Noord-Brabant, Netherland)로 분석하였으며, 유기물은 Tyurin법에 의하여 0.4N K₂Cr₂O₇ · H₂SO₄ 혼합용액을 넣고 5분간 가열한 후, 적정하여 유기물 함량을 구하였고, 유효 인산은 토양시료 5.0 g에 Lancaster 용액 (333 mM Acetic acid + 1.5 N Lactic acid + 30 mM Ammonium Fluoride + 213 mM Sodium Hydroxide + 50 mM Ammonium Sulfate, pH 4.25) 20 mL를 넣고 10분간 진탕하여 여과 (Whatman No. 2)한 후 증류수로 희석하여 UV-Spectrometer (Hitachi, Japan)를 이용해 측정하였다 (720 nm). 양이온 분석은 건토 5 g에 1 N Ammonium acetate (pH 7.0) 25 mL를 가하여 30분간 침출 후 여과 (Whatman No. 2)하여 ICP (GBC, Intergra XL, Australia)로 분석하였다.

식물체 시료는 파종 후 30일 (30 DAS)부터 최종 수확 (11월 중순)까지 15일 간격으로 총 5회 (6 plants/treatment) 채취하였다. 식물체 시료는 지상부와 지하부로 분리된 시료는 80°C에서 48시간 열풍건조 후 건물중을 측정하였으며, 이후 마쇄하여 분석시료로 사용하였다. 식물체 분석시료 0.5 g에 식물체 분해액 (377 mM H₂SO₄ + 36% HClO₄)으로 습식 분해 (250°C)하여 여과 (Whatman No. 6)하였다 (Lee et al., 2017b). 여과액을 증류수로 10배 희석한 후, 질소는 질소 자동분석기 (Auto analyzer 3, BRAN+LUEBBE, Germany)로 660 nm에서 측정하였다. 인산은 UV-Spectrometer를 이용하여 880 nm에서 측정하였다. 칼리 등 양이온함량은 ICP를 이용하여 측정하였다 (Lee et al., 2017a).

질소이용효율 (nitrogen use efficiency, NUE) 질소이용효율은 비료공급량 및 당근 건물중과 질소함량 결과를 바탕으로, 아래의 식을 이용하여 계산하였다 (Table 2).

Table 2. Nitrogen use efficiency used for this work (Huang et al., 2018).

Term [†]	Definitions
NUE	Total dry weight (shoot + root) / N-applied (NUpE × NUtE), kg kg ⁻¹
NUpE	Total N uptake (shoot + root) / Total applied N, kg kg ⁻¹
NUtE	Total dry weight / Total N-uptake (shoot + root), kg kg ⁻¹
ENUE	Total root weight / N-applied, V

[†]NUE (nitrogen use efficiency), NUpE (nitrogen uptake efficiency), NUtE (nitrogen utilization efficiency), ENUE (economic NUE).

통계분석 처리간 평균을 비교하기 위해 SAS (v. 9.2, SAS Institute, Cary, NC, USA) 프로그램을 사용하여 수행되었으며 ANOVA가 유의한 F값 ($p < 0.05$)을 나타내는 경우 최소유의차검정 (LSD)을 수행하였다. 그래프는 Sigma Plot (v. 14.5, SYSTAT, Palo Alto, CA, USA)을 사용하였다. 또한 변수들 간의 연관성을 분석하기 위해 R 프로그램 (RStudio, v.4.0.3.)을 이용하여 주성분분석 (principal component analysis, PCA)을 실시하였다.

Results and Discussion

토양 이화학적 성 당근 시험포장의 시험 전·후 토양 이화학적 성을 분석하였다 (Table 3). 시험 후 토양의 화학적 특성은 대체로 감소하는 경향을 보였으나 통계적 유의성은 없었다. 토양 EC가 36 - 64%, Ex. Ca와 Ex. Mg가 6 - 23% 감소하는 것은 당근의 뿌리 생장에 따른 양분흡수와 관련이 있을 것으로 추정되나 보다 세부적인 추가 연구를 통해 검토할 필요가 있다. 또한 관비 공급비율에 따라 OM, TN 및 Avail. P₂O₅의 함량이 차이를 보였다. 본 결과로만 볼 때, 관비에 의한 웃거름 공급은 양분의 이용측면에서 효율적인 것으로 여겨진다. 다만, 분시 효과인지 관비 효과인지를 규명하기 위해서는 웃거름의 표층 분시와 비교할 필요가 있다.

Table 3. Physicochemical properties of the experimental soil.

Time	Treatment	Soil texture	pH (1:5, dH ₂ O)	EC (dS m ⁻¹ , 1:5)	OM (g kg ⁻¹)	TN (%)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)		
								K	Ca	Mg
Before		Sandy loam	7.3 ± 0.16	1.1 ± 0.20	1.8 ± 0.6	0.11 ± 0.03	616 ± 142	0.6 ± 0.16	6.1 ± 0.95	1.8 ± 0.27
	CF 100:0	-	7.1 ± 0.05	0.7 ± 0.01	2.6 ± 0.2	0.15 ± 0.01	648 ± 15	0.6 ± 0.01	5.9 ± 0.13	1.8 ± 0.03
	CF 50:50	-	7.2 ± 0.01	0.6 ± 0.00	1.8 ± 0.1	0.10 ± 0.00	548 ± 13	0.6 ± 0.01	5.7 ± 0.05	1.7 ± 0.01
After (90 DAS)	CF 30:70	-	7.1 ± 0.01	0.5 ± 0.01	1.9 ± 0.1	0.11 ± 0.01	475 ± 12	0.5 ± 0.01	5.7 ± 0.02	1.7 ± 0.02
	SRF 100:0	-	7.3 ± 0.01	0.6 ± 0.00	2.5 ± 0.2	0.15 ± 0.01	634 ± 4	0.4 ± 0.01	5.2 ± 0.04	1.5 ± 0.01
	SRF 50:50	-	7.2 ± 0.01	0.5 ± 0.00	1.7 ± 0.1	0.10 ± 0.00	581 ± 21	0.5 ± 0.01	4.5 ± 0.10	1.4 ± 0.03
	SRF 30:70	-	7.2 ± 0.01	0.5 ± 0.01	1.6 ± 0.1	0.10 ± 0.01	432 ± 11	0.5 ± 0.01	4.7 ± 0.09	1.5 ± 0.02
Optimal			6.0 - 6.5	<2.0	-	-	250 - 350	0.55 - 0.65	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0

생육, 양분흡수량 (N, P, K) 및 수량 당근 파종 후 30일부터 15일 간격으로 최종 수확기 (파종 후 90일)까지의 생장량을 조사하였으며, 처리간 유의적인 차이는 보이지 않았다 (Fig. 1). 식물체 생육에 대한 지하부 (뿌리)의 생육비 (Fig. 1B)와 총 건물중의 증가 (Fig. 1C)을 비교해보면, 지하부의 발달은 활착기 (30 DAS, <10%), 생육 초중

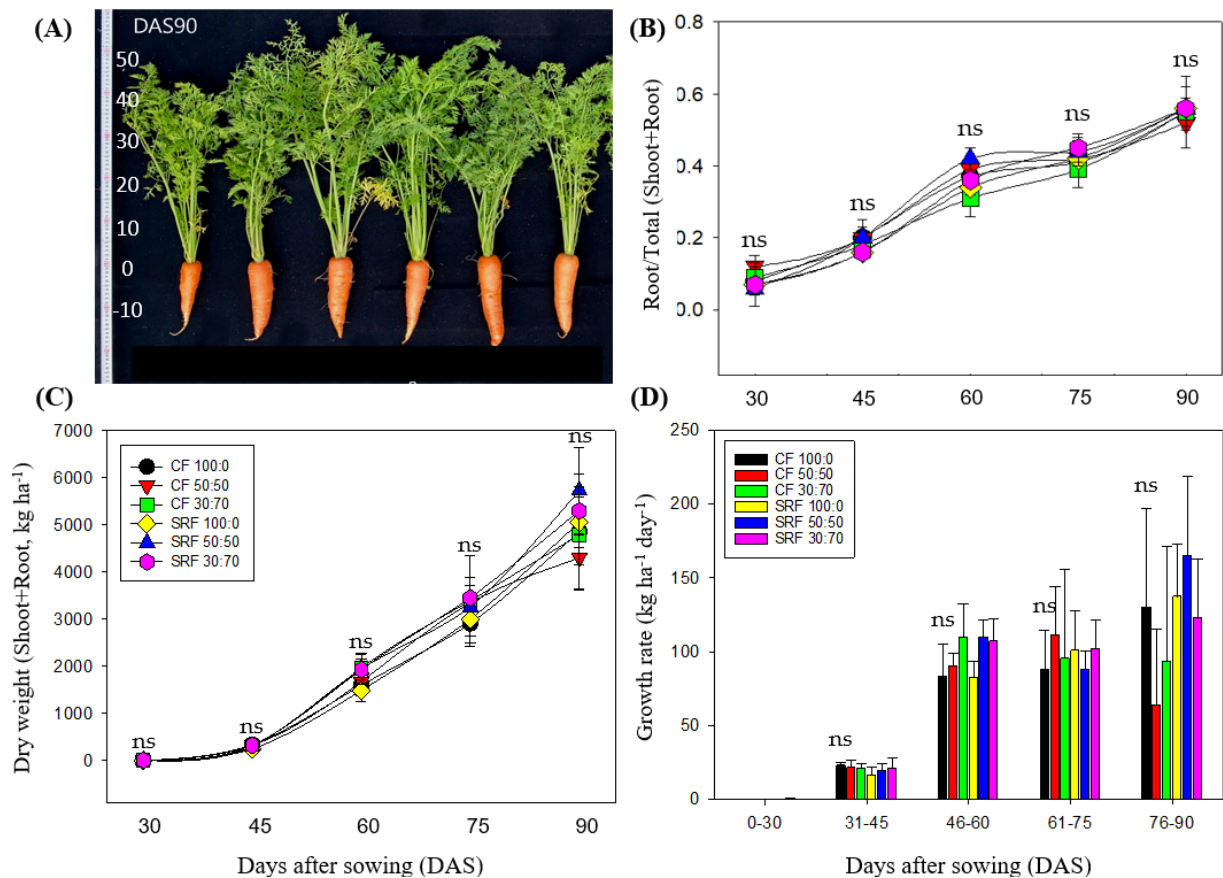


Fig. 1. Growth (A), temporal root ratio (B) and total dry weight (C), and daily growth rate (D) of carrot plants under growing conditions with different basal fertilizers and fertigation ratios ($n = 6$). ns: no significance.

기 (30 - 60 DAS, 16 - 39%), 생육중후기 (70 DAS 이후, 40 - 56%)로 나타나, 파종 후 60일 이후부터 지하부의 발달이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 총 건물중은 활착기 이후부터 직선적으로 증가하여 최종 수확기 (90 DAS)에 4.3 - 5.7 Mg ha⁻¹로 나타났다. 당근의 단위 기간당 일평균 건물 생산성을 분석한 결과 (Fig. 1D), 생육 초기인 파종 후 31 - 45일에는 16.3 - 22.9 kg ha⁻¹, 이후에는 64.0 - 164.7 kg ha⁻¹로 생육중기 (45 DAS 이후)부터 급격하고 균등하게 건물중이 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 생육양상은 근채류 (열무) (Lee et al., 2016)와 인경채류 (대파) (Lee et al., 2022b)에서도 유사한 것으로 확인된 바 있다. 당근의 질소, 인 및 칼륨의 흡수양상은 총 건물중 생산과 유사하게 나타났으며, 처리별 및 시기별로 유의적인 차이는 보이지 않았다 (Fig. 2). 작물생육이 질소공급량에 영향을 받으나 시설작물의 경우 동일한 양분공급량을 밀거름을 달리하거나 관비비율을 조정하였을 때의 효과는 크지 않았는데 이는 토양양분함량, 작물생산특성 (일회수확형, 연속수확형) 등에 영향을 받는 것으로 나타났다 (Ha et al., 2015; Sung et al., 2016; Lee et al., 2019a, 2019b, 2021). 반면, 노지고추의 밀거름 종류 및 관비비율에 따른 생육과 생산성을 평가한 결과, 착과기 이후 웃거름 관비에 의해 생육과 양분흡수가 촉진되는 결과를 보여 (Lee et al., 2022a), 시설과 노지재배 간 관비효과에 차이 (예, 토양양분함량)가 있을 것으로 판단된다. 양분 흡수량의 급격한 변화가 시작되는 파종 후 45일 (45 DAS)을 기준으로 보면, 45 DAS 이후 질소, 인 및 칼륨의 일일 흡수량은 각각 2.11 - 2.67, 0.54 - 0.70 및 6.71 - 8.51 kg ha⁻¹이었으며, 이 기간 (45일)동안 흡수된 비율은 전체의 80 - 89% 이르러 대부분의 양분이 생육중기 이후에

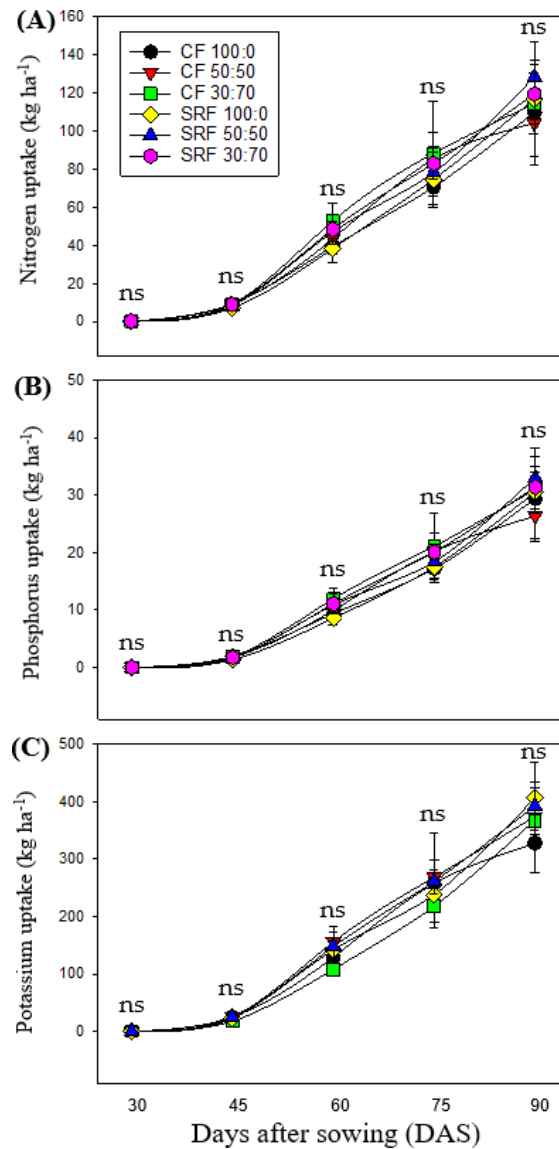


Fig. 2. Temporal trends of N (A), P (B) and K (C) uptake of carrot plants under growing conditions with different basal fertilizers and fertigation ratios (n = 6). ns: no significance.

집중적으로 흡수되는 것을 확인하였다. 특히, 칼륨은 파종 후 75일부터 지하부가 지상부의 흡수량보다 증가하였는데, 칼륨이 당근의 생장, 수량 및 수확부위 (지하부)의 품질에 많은 영향 미친다는 것을 (El-Tohamy et al., 2011) 바탕으로, 칼륨 관비효과가 클 것으로 예상해볼 수 있다. 밀거름 종류 및 관비 비율에 따른 당근 수량은 유의적 차이가 없었다 (Table 4). 그러나, 밀거름으로 완효성 비료 (26.6 - 33.0 Mg ha⁻¹)를 사용하였을 때 단일비료 (34.7 - 38.1 Mg ha⁻¹)에 비해 약 24% 유의적인 증가를 보였으며, 전량 밀거름 (100:0)보다 웃거름을 관비 (분시)로 공급하였을 때 50:50에서는 차이가 없었지만, 30:70에서는 10%가량 증가하는 것으로 나타났다. 밀거름으로 공급된 완효성 비료가 당근과 배추의 수량에 효과적이었다는 연구결과와 동일하게 나타났다 (Sikora et al., 2020).

Table 4. Effect of different fertigation and basal fertilizer on dry weight and nitrogen use efficiency (NUE) of open-field carrot.

Treatment	NUpE (kg kg ⁻¹)	NUtE (kg kg ⁻¹)	NUE (kg kg ⁻¹)	ENUE (kg kg ⁻¹)	Marketable yield (Mg ha ⁻¹)
CF 100:0	0.5 ± 0.1 ns [†]	44.3 ± 2.4 a [‡]	24.3 ± 6.1 ns	13.4 ± 4.3 ns	29.4 ± 9.3 ns
CF 50:50	0.5 ± 0.1	41.4 ± 0.5 b	21.5 ± 3.4	11.2 ± 1.2	26.6 ± 2.5
CF 30:70	0.6 ± 0.1	42.0 ± 0.7 b	24.0 ± 3.2	13.2 ± 1.7	33.0 ± 4.1
SRF 100:0	0.6 ± 0.1	43.3 ± 0.7 ab	25.3 ± 2.6	14.2 ± 2.2	34.7 ± 7.7
SRF 50:50	0.6 ± 0.1	44.6 ± 0.6 a	28.7 ± 4.5	16.0 ± 3.2	38.1 ± 5.6
SRF 30:70	0.6 ± 0.1	44.6 ± 1.6 a	26.5 ± 2.6	14.8 ± 0.7	37.3 ± 4.8
F-value	0.59	3.53	1.13	1.26	1.29
100:0	0.6 ± 0.0 ns	43.8 ± 0.7 ns	24.8 ± 0.7 ns	13.8 ± 0.5 ns	32.0 ± 8.5 ns
50:50	0.6 ± 0.1	43.0 ± 2.3	25.1 ± 5.0	13.6 ± 3.4	32.3 ± 4.0
30:70	0.6 ± 0.0	43.3 ± 1.9	25.2 ± 1.8	14.0 ± 1.1	35.1 ± 4.4
F-value	1.67	2.9	2.43	2.55	0.37
CF	0.5 ± 0.0 ns	42.6 ± 1.5 ns	23.3 ± 1.5 ns	12.6 ± 1.2 ns	29.7 ± 5.3 b
SRF	0.6 ± 0.0	44.2 ± 0.7	26.8 ± 1.7	15.0 ± 0.9	36.7 ± 4.8 a
F-value	0.08	0.41	0.37	0.43	6.77

[†]ns: no significance; [‡]Different letters in a column indicate a significance at $p < 0.05$ (LSD).

질소이용효율 (nitrogen use efficiency, NUE) 질소이용효율 (nitrogen use efficiency, NUE)은 Table 1의 식을 이용하여 질소흡수효율 (NUpE), 흡수된 질소의 건물생산기여효율 (NUtE), 질소이용효율 (NUE) 및 수확부위 질소이용효율 (ENUE)를 계산하였으며, 처리간에 유의적인 차이를 보이지 않았다 (Table 4). 전체적으로 NUpE는 0.5 - 0.6 kg kg⁻¹, NUtE는 41.4 - 44.6 kg kg⁻¹, NUE는 21.5 - 28.7 kg kg⁻¹ 및 ENUE는 11.2 - 16.0 kg kg⁻¹이었다. 수량 분석 결과처럼 질소이용효율 지표들이 밀거름 종류에 의해 차이가 있는 것으로 나타났다. 통계적 유의성은 없었지만, 완효성 비료가 단일비료에 비해 NUpE, NUtE, NUE 및 ENUE가 다소 높게 나타났으며, 밀거름과 웃거름 비율에서도 NUE와 ENUE가 전량 밀거름에 비해 웃거름 관비에서 높았다. 완효성 비료 공급이 토양의 질산염 축적 및 용탈을 감소시키며 (Lu et al., 2019), 수량과 질소이용효율을 향상시키는 것을 (Sikora et al., 2020) 고려할 때, 본 연구결과에서도 완효성 비료의 효과가 있었음을 추론해 볼 수 있다. 따라서, 밀거름으로 완효성 비료를 공급하고 웃거름으로 요소와 염화칼리와 같은 비료를 관비로 공급하면 당근과 같은 생육 중기 이후 양분흡수량과 건물생산량이 높은 작물에 유리할 것으로 판단된다.

주성분 분석 (principle component analysis, PCA) Biplot을 이용하여 원변수 (측정변수)와 주성분(PC) 간의 관계를 분석하였다 (Fig. 3). 벡터 (화살표) 크기 (분산 정도)를 고려할 때, 지상부와 지하부의 총 질소함량이 밀거름 비중 및 관비비율에 가장 크게 영향을 미치는 변수로 나타났다. 주성분(PC1, 65.3%)에 의해 모든 변수가 같은 면에 위치하였으며, PC2 (23.8%)는 질소함량, 질소흡수량, 건물중 (총, 지상부) 및 NUE와 경제적 수량, 건물중 (지하부), ENUE 및 NUtE로 구분하였다. 또한, 질소이용효율 (NUE), 총 건물중, 수량 등의 변수는 높은 양의 상관관계를 보였다. 따라서, 측정변수에 대한 기여도는 완효성비료 (밀거름) 처리에서 높게 나타났으며, 화학비료 (밀거름) 처리는 큰 특징을 보이지 않았다.

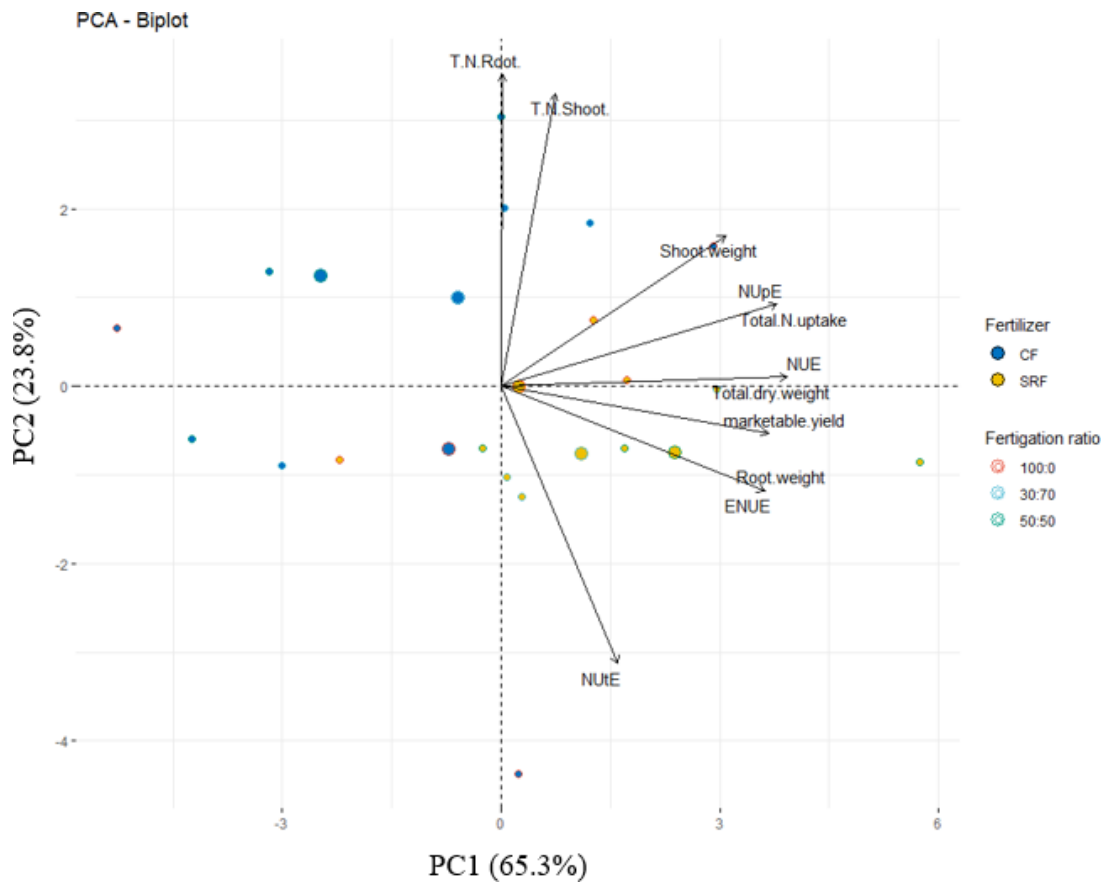


Fig. 3. Interrelationship between fertilization (fertilizer and fertigation ratio) and variables by principal component analysis (PCA).

Conclusions

본 연구는 당근의 노지 재배 시 밑거름 종류와 밑거름과 웃거름을 달리하여 관비로 공급하였을 때, 당근의 생육, 양분흡수량, 질소이용효율 및 생산성을 평가하여 최적의 관비조합을 설정하고 표준관비 처방서 작성을 위한 기초자료로 활용하기 위해 수행하였다. 당근의 생육, 양분흡수량, 질소이용효율 및 생산성은 처리간에 유의적인 차이를 보이지 않았으나, 밑거름으로 완효성 비료를 사용하는 경우에 질소이용효율과 생산성에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 전량 밑거름 보다는 밑거름과 웃거름의 비율을 50:50 또는 30:70로 조절하여 공급하는 것이 보다 효과적이었다. 본 연구결과를 바탕으로, 관비효과의 규명과 최적 관비조건을 설정하기 위해서는 표층시비와의 비교가 필요하며, 생육 중기 이후 양분흡수와 생육이 급격히 증가하는 특성을 고려할 때, 완효성 비료 외에 유기질 비료의 밑거름 사용 시 적정 관비 비율 설정을 위한 연구가 필요하다.

Acknowledgement

This work was supported by the “Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ015635)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Bruulsema, T., J. Lemunyon, and B. Herz. 2009. Know your fertilizer rights. *Crops and Soils* 42:13-18.
- 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.
- Ebrahimian, H. and E. Playán. 2014. Optimum management of furrow fertigation to maximize water and fertilizer application efficiency and uniformity. *J. Agric. Sci. Technol.* 16:591-607.
- El-Tohamy, W., H. El-Abagy, M. Badr, S. Abou-Hussein, and Y. Helmy. 2011. The influence of foliar application of potassium on yield and quality of carrot (*Daucus carota* L.) plants grown under sandy soil conditions. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 5:171-174.
- Gee, G.W. and J.W. Boudet. 1986. Particle size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd edition). Agronomy No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- 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. Agric. Sci.* 42:319-324.
- Hagin, J., M. Sneh, and A.A. Lowengart. 2002. *Fertigation - Fertilization through irrigation*. IPI Research Topics No. 23. Edited by A.E. Johnston. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Huang, S., C. Zhao, Y. Zhang, and C. Wang. 2018. Chapter 10 - Nitrogen use efficiency in rice. p. 187-208. In Amanullah and S. Fahad (ed.) *Nitrogen in Agriculture - Updates*. InTech, London, UK.
- Hwang, K.S., J.H. Yoon, S.J. Lee, Y.H. Kwack, and S.M. Lee. 1997. Optimum contents of soil phosphorus and potassium for carrot growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30:89-93.
- 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. Annual Report. National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju, Korea.
- Jung, K.S., K.H. Jung, W.K. Park, Y.S. Song, and K.H. Kim. 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 J. Soil Sci. Fert.* 43:349-355.
- Kim, S.H., D.C. Seo, J.H. Park, S.T. Lee, S.W. Lee, H.C. Kim, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2013. Effects of green manure crops on growth and yield of carrot for reduction of continuous cropping injury of carrot through crop rotation. *Korean J. Environ. Agric.* 32:279-286.
- KMA. 2022. Weather statistics (<http://www.weather.go.kr>). Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea.
- KOSIS. 2022. Agricultural area statistics (<http://www.kosis.kr>). Korean Statistical Information Service.
- Kumar, A. and A.K. Singh. 2002. Improving nutrient and water use efficiency through fertigation. *Water Manage.* 10: 42-48.
- Lee, I.B., J.H. Lim, and J.M. Park. 2007. Effect of reduced nitrogen fertigation rates on growth and yield of tomato. *Korean J. Environ. Agric.* 26:306-312.
- Lee, S.B., J. 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.* 50:100-105.
- Lee, S.B., J.E. Lim, Y.J. Lee, and J. Sung. 2016. Crop growth stage-based nitrogen requirement for lettuce and young radish under greenhouse cultivation. p. 189. In *Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, Muju, Korea.
- Lee, S.B., Y.M. Kim, Y.J. Lee, Y.S. Song, D.B. Lee, and J. Sung. 2019a. Growth stage-based fertigation guideline for greenhouse spring Chinese cabbage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52:429-437.
- Lee, Y.J., G.E. Kim, T.K. Oh, and J. Sung. 2022a. Yield and nitrogen use efficiencies (NUEs) in open-field pepper: Effect of different types of basal fertilizer and fertigation ratio. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 55:286-298.

- Lee, Y.J., J. Sung, S.B. Lee, J.E. Lim, Y.S. Song, D.B. Lee, and S.Y. Hong. 2017b. Plant analysis methods for evaluating mineral nutrient. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50:93-99.
- Lee, Y.J., J. Sung, Y.S. Song, Y.X. Kim, and B.G. Hyun. 2022b. The effects on nutrients uptake and soil chemical properties according to fertigation ratio of green onion (*Allium fistulosum* L.) in open field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 55:113-120.
- Lee, Y.J., S.B. Lee, and J. Sung. 2019b. Optimal fertilizer requirement for 9 greenhouse vegetable crop cultivation with fertilization system: On-site survey. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52:513-519.
- Lee, Y.J., S.B. Lee, and J. Sung. 2021. Optimal fertigation guide for greenhouse strawberry: Development and validation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54:322-330.
- Lu, J., Z. Bai, G.L. Velthof, Z. Wu, D. Chadwick, and L. Ma. 2019. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China. *Agric. Water Manage.* 212:407-415.
- NIAS. 2019. Fertilizer recommendation for crop production (4th edition). National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju, Korea.
- Sikora, J., M. Niemiec, M. Tabak, Z. Gródek-Szostak, A. Szeląg-Sikora, M. Kuboń, and M. Komorowska. 2020. Assessment of the efficiency of nitrogen slow-release fertilizers in integrated production of carrot depending on fertilization strategy. *Sustainability* 12:1982.
- 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.