

음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비 연용에 따른 고추(*Capsicum annuum* L.) 생육 및 토양 화학적 특성 평가

윤진주^a, 정영재^b, 김성현^c, 전상호^c, 노안성^d, 권순익^d, 이유나^e, 심재홍[†]

Evaluation on Growth Characteristics of Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) and Soil Chemical Properties by Continuous Application of Food Waste Compost with Manure

Jin-Ju Yun^a, Young-Jae Jeong^b, Seong-Heon Kim^c, Sang-Ho Jeon^c, Ahn-Sung Roh^d,
Soon-Ik Kwon^d, Yu-Na Lee^e, Jae-Hong Shim[†]

(Received: Aug. 14, 2024 / Revised: Sep. 8, 2024 / Accepted: Sep. 11, 2024)

ABSTRACT: Food waste compost with high salt content produced by aerobic digestion, but concerns about application of cropland. To address this issue, food waste is being composted by mixing it with livestock manure, which has a lower salt content. Therefore, this study aimed to evaluate the growth characteristics of red pepper and soil chemical properties for continuous application with different amounts of food waste compost with manure (FWC). Treatments were consisted of no fertilizer (NF), inorganic fertilizer (N-P₂O₅-K₂O, 19.0-11.2-14.9 kg 10a⁻¹), and inorganic fertilizer + food waste compost with manure (NPKFWC). FWC treatment was applied at three treatment rates based on soil organic matter content: 900 kg 10a⁻¹, 1,800 kg 10a⁻¹, and 2,700 kg 10a⁻¹ (referred to as FWC 1, 2, 3, respectively). As a result of the red pepper yield was about 1.8 times higher in NPKFWC 1 and NPKFWC 2 than that in the NF, but decreased in the NPKFWC 3, 300% of the recommended FWC application rate. Yield decreased in all FWC treatments with continuous application for three year and also decreased about 40% from 3,265 kg 10a⁻¹ in the first year to 1,948 kg 10a⁻¹ in the third year. For the soil chemical properties, the content of soil organic matter, available P₂O₅, and exchangeable cations increased in the FWC treatments, and were higher than the NF. Exchangeable sodium in all treatments was increased slightly compared to the soil before used, and no significant salinization was observed in the FWC. This study confirmed that excessive use of FWC not only reduced nutrient use efficiency, but also decreased the red pepper yield. Therefore, it is concluded that optimum usage of FWC is effective for agroecological impacts.

Keywords: Food waste, Food waste compost with manure, Red pepper growth, Soil chemical properties

^a 농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 박사후연구원 (Postdoctoral Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

^b 농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화평가과 연구사 (Agricultural Researcher, Division of Climate Change Assessment, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

^c 농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 연구사 (Agricultural Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

^d 농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 연구관 (Agricultural senior researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

^e 농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 석사후연구원 (Postmaster Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

† Corresponding author(e-mail: jaysoil@korea.kr)

초 록: 음식물류폐기물은 호기성퇴비화 방법으로 음식물류폐기물 퇴비를 제조하여 자원화하고 있다. 그러나 음식물류폐기물의 높은 염분 함량으로 인해 토양염류집적 등 농경지 사용에 대한 우려가 제기되며, 이를 해결하기 위해 염분함량이 낮은 가축분뇨 등을 혼합하여 퇴비화하고 있다. 이에 본 연구는 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비(이하, 음폐혼합퇴비, Food Waste Compost with Manure, FWC)의 연용 및 사용량에 따른 고추의 생육 및 토양 화학적 특성을 평가하고자 하였다. 본 연구는 무처리구(NF), 무기질비료 처리구(NPK, N-P₂O₅-K₂O=19.0-11.2-14.9 kg 10a⁻¹), 무기질 비료 + 음폐혼합퇴비 처리구(NPKFWC)로 설정하였으며, 음폐혼합퇴비 처리구는 토양 유기물 함량에 따른 퇴비 사용량을 기준하여 900 kg 10a⁻¹, 1,800 kg 10a⁻¹ 및 2,700 kg 10a⁻¹(FWC1, 2, 3)으로 설정하였다. 고추 수량 조사 결과, 무처리구 대비 NPKFWC1, NPKFWC2에서 약 1.8배 높았으며, 추천사용량의 300%를 처리한 NPKFWC3에는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 또한 3년간 연용시 모든 음폐혼합퇴비 처리구에서 감소하는 경향을 보였으며, NPKFWC3에서 1년차에 3,265 kg 10a⁻¹에서 3년차에 1,948 kg 10a⁻¹로 약 40% 감소하였다. 시험 후 토양 화학성 분석 결과, 무기질비료를 단독 처리하였을 때보다 음폐혼합퇴비 처리 시 토양유기물, 유효인산, 교환성 양이온 등의 함량이 증가하였다. 교환성 나트륨은 모든처리구에서 시험 전 토양에 비해 통계적 유의성 있게 증가하였으나 변화는 미미하였으며, 음폐혼합퇴비에 따른 염류집적피해는 나타나지 않은 것으로 판단된다. 본 연구 결과, 음폐혼합퇴비 과량사용은 양분이용효율 뿐만아니라 작물수량을 감소시키는 것을 확인하였으며, 따라서 작물의 생육 및 토양에 대한 영향 등을 종합적으로 고려했을 때 음폐혼합퇴비는 정량사용이 효과적이라고 판단된다.

주제어: 음식물류폐기물, 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비, 고추 생육, 토양 화학성

1. 서 론

음식물류폐기물은 음식 재료 또는 음식물의 생산, 유통에서부터 보관, 소비 등 전 과정에서 발생하는 쓰레기와 남겨져 버려지는 음식을 의미하며, 미생물에 의해 분해 가능한 다량의 유기물을 포함하고 있어 유기성 폐기물로 분류된다^{1,2)}. 최근 환경부가 발표한 ‘2022년 전국 폐기물 발생 및 처리현황’에 따르면 국내 음식물류폐기물 발생량은 2022년 기준 연간 500만톤으로 전체 생활계폐기물의 약 21.7%를 차지하는 단일 최대 발생원이다³⁾. 음식물류폐기물 처리 방법에는 매립, 소각, 자원화 등이 있으나 2005년부터 음식물류폐기물 직매립이 금지되고, 2013년 런던협약에 의해 해양배출이 금지됨에 따라 발생량의 대부분은 소각과 자원화에 의존하고 있다⁴⁾. 그러나 소각처리의 경우 우리나라 음식문화 특성상 수분함량이 약 80% 이상으로 높고, 발열량이 낮을뿐만 아니라 소각 시 발생하는 대기오염물질(다이옥신 등)로 인해 널리 활용되지 못하고 있다^{5,6)}.

음식물류폐기물의 자원화는 자원화 방법에 따라 호기성 퇴비화, 혐기성 퇴비화, 건식 사료화, 습식 사료화 등으로 구분되며 각각 경제적, 기술적, 환경적 측면에 차이가 있지만 대표적으로 호기성 퇴비화가

경제성이 높은 것으로 알려져 있다⁷⁾. 호기성퇴비화는 호기성조건에서 유기물을 안정화시키는 방법 중 하나으로써 호기성 퇴비화로 제조된 음식물류폐기물 퇴비는 유기물 함량이 높아 토양에 처리 시 토양의 물리성과 화학성을 개선시킨다고 보고되고 있다⁸⁾. 그러나 음식물류폐기물의 4%이상의 높은염분(NaCl) 함량으로 인해 토양염류집적 등 농경지 사용에 대한 우려가 제기되고 있다^{6,9)}. 토양의 염분은 토양의 비옥도와 질에 영향을 미치는 요인 중 하나로 토양염류집적 시 근권의 삼투퍼텐셜 저하로 작물의 수분흡수를 저해하여 작물 생산성이 감소되며 토양의 투수성과 통기성이 불량하게 되거나 작물에 독성을 일으켜 양분 불균형과 흡수를 저해하여 생육이 불량하게 된다¹⁰⁻¹³⁾. 현재 이러한 문제를 해결하기 위해 처리시설에서 음식물류폐기물을 퇴비화할 때 왕겨, 톱밥과 같은 수분조절제를 50%이상 첨가하거나 염분 함량이 낮은 가축분뇨를 혼합하는 등 퇴비화 시 염분함량을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다¹⁴⁾. 특히 가축분퇴비는 낮은 염분함량 뿐만아니라 작물에 필요한 양분과 미량원소를 지속적으로 공급하는 것으로 알려져 있어, 염분함량이 높고 미량원소 함량이 낮은 음식물류폐기물의 단점을 보완할 수 있다¹⁵⁻¹⁸⁾.

선행연구 결과 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비

의 N, P₂O₅, K₂O의 평균 함량은 각각 2.08%, 2.09%, 1.13%로 양분함량이 높아 작물 생육에 효과적이며¹⁹⁾, 양이온 교환능력 향상, 완충능력 증대, pH 조절에 따른 토양의 이화학적 개선 및 양분흡수력 향상 등 다양한 긍정적인 효과가 보고되고 있다²⁰⁾. 하지만 음식물류폐기물 혼합 퇴비 처리에 따른 청경채의 생장효과, 배추 수량 및 토양화학적 평가 등 대부분 단기간의 작물재배실험 결과로 퇴비 연용에 따른 작물생육과 토양특성변화에 대한 연구는 미비한 실정이다^{21,22)}. 작물의 생육과 토양 반응은 단기간에 나타나지 않는 경우가 많으므로 음식물류폐기물 혼합퇴비를 지속적으로 사용하였을 때 작물의 생육과 토양에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비 연용에 따른 고추 생육 및 토양의 화학적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 시험에 사용된 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비(이하 음폐혼합퇴비)는 경기도 포천에 위치한 J 산업에서 생산된 음식물류폐기물 25%와 가축분퇴비가 혼합된 음폐혼합퇴비(FWC; Food Waste Compost with manure)를 사용하였다. 가축분퇴비는 계분, 톱밥을 사용하여 제조된 시판제품을 사용하였으며, 퇴비의 성분분석은 농촌진흥청 비료품질검사방법 및 시료채취기준²³⁾에 준하여 pH, EC, 유기물(OM), 암모니아태질소(NH₄-N), 질산태질소(NO₃-N), 질소, 인산, 칼륨 전량 및 염분(NaCl)과 유해중금속 8종(As, Cd, Hg, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn) 등을 분석하였다(Tables 1, 2).

2.2. 작물 재배시험

음폐혼합퇴비 연용에 따른 고추 생육 및 토양 화학적 변화를 확인하기 위하여 전라북도 완주군에 위치한 포장에서 3년간(2020~2022년) 수행되었으며, 시험 전 토양의 화학적 특성은 Table 3과 같다. 처리구

Table 1. Chemical Characteristics of Food Waste Compost with Manure(FWC) Used in this Experiment

Compost	pH	EC	Organic Matter	NH ₄ -N	NO ₃ -N	N	P	K	NaCl
	1:10	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			%		
FWC	6.59	30.57	667	1,415	3.10	2.79	2.97	1.03	1.4

Table 2. Concentration of Heavy Metals in Food Waste Compost with Manure(FWC) Used in this Experiment

Compost	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
	mg kg ⁻¹							
FWC	ND	ND	ND	0.3	5.2	49.3	3.9	141.5
Standard	≤45	≤5	≤2	≤130	≤200	≤360	≤45	≤900

*ND: not detected.

Table 3. Chemical Properties of Soil Used in this Experiment

	pH	EC	Organic Matter	Av. P ₂ O ₅	TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	K	Ca	Mg	Na
	1:5	ds m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹			
	6.6	0.3	15.4	97.2	0.1	22.9	3.3	1.1	6.3	1.7	0.06
Optimal range	6.0-6.5	<2	25-35	450-550	-	-	-	0.7-0.8	5.0-6.0	1.5-2.5	-

는 음폐혼합퇴비 사용량에 따른 효과를 확인하고 적정 사용량을 알아보기 위해 무처리구(NF: no fertilizer), 무기질비료(NPK)와 무기질비료(NPK) + 음폐혼합퇴비(FWC) 3수준 (900, 1,800 and 2,700 kg 10a⁻¹)으로 설정하였다. 무기질비료는 농촌진흥청 고추 표준 시비량(N-P₂O₅-K₂O=19.0-11.2-14.9 kg 10a⁻¹)을 기준으로 처리하였으며, 음폐혼합퇴비는 시험 토양의 유기물 함량에 따른 검정시비량(900 kg 10a⁻¹)을 기준하여 100%, 200% 및 300%에 해당하는 900 kg 10a⁻¹(FWC1), 1,800 kg 10a⁻¹(FWC2) 및 2,700 kg 10a⁻¹(FWC3)를 처리하였다. 시험 처리구별 면적은 15m² (3m×5m)이며 임의 배치법으로 3반복 진행하였다.

2.3. 토양 및 식물체 분석

토양 화학성 및 식물체 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법²⁴⁾에 준하여 실시하였다. 토양 시료는 건조 후 2 mm(10 mesh)의 체를 통과한 토양을 이용하였으며 식물체 시료는 생육 조사 후 70°C dry oven에서 48시간 건조한 후 분석에 이용하였다. 토양 pH 및 EC는 토양시료와 증류수를 1:5 (w/v)비율로 혼합한 후 pH meter (Orion 5 star, Thermo Scientific, USA) 및 EC meter (Orion star A222, Thermo Scientific, USA)로 각각 측정하였으며 유효인산은 Lancaster 법으로 토양시료를 추출하여 720 nm에서 비색계(UV-1900i, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 토양 총탄소, 총질소는 원소분석기(vario Maz CN, Elmentar Analysensysteme GmbH, German)로 분석하였으며, 유기물함량은 분석된 총탄소함량에 유기물 환산 계수인 1.724를 곱하여 환산하였다. 무기태질소(NH₄⁺, NO₃⁻)는 이온자동분석기(DE/QUAATRO, BRAN+LUEBBE GmbH, German)로 분석하였으며, CEC(cation exchange capacity)와 교환성 양이온은 1 M NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계(AU/CINTRA6, GBC scientific Equipment Pty Ltd, Malaysia)로 측정하였다. 치환성나트륨비율(ESP)는 치환성 Na/CEC × 100 으로 산정하였다. 식물체의 양분이용효율을 조사하기 위해 식물체의 질소함량은 건조 후 분쇄한 식물체 시료를 원소분석기, 인산함량은 Ammonium Vanadate법, 칼륨은 유도결합 플라즈마 발광광도계로 분석하였다. 양분이용효율은 Eq.(1) 식을 이용하여 산

출하였다.

$$\text{양분이용효율(\%)} = \frac{\text{각 처리구 양분흡수량}(kg10a^{-1}) - \text{무처리구 양분흡수량}(kg10a^{-1})}{\text{양분총사용량}(kg10a^{-1})} \times 100 \quad \text{Eq.(1)}$$

2.4. 통계분석

통계분석은 IBM SPSS 27을 사용하였으며 모든 데이터는 ANOVA 분산분석과 DMRT (Duncan's multiple range test)를 이용하여 $p < 0.05$ 수준의 유의성 검정을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 음식물류폐기물 혼합 가축분퇴비 연용에 따른 토양 특성

음폐혼합퇴비 연용이 토양에 미치는 영향을 평가하기 위하여 고추 수확 후 토양의 화학적 특성을 분석하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 토양 pH의 경우 NPKFWC3에서 7.0으로 가장 높았으며, NPK처리구 대비 음폐혼합퇴비 처리구에서 높은 경향을 보였다. EC는 시험 전 토양과 큰 차이 없이 모든 처리구에서 적정기준 이내였으며, 음폐퇴비 연용 및 사용량 증가에 따라 토양 EC 증가 및 염분증가로 인한 양분 용해도 감소 등의 문제가 발생한다고 알려져 있으나 본 연구결과 음폐혼합퇴비 연용 및 사용량에 따른 EC 증감의 경향성은 나타나지 않았다²⁵⁾.

유기물, 유효인산 함량은 퇴비사용량이 많을수록 높은 경향을 보였으며, NPKFWC3에서 각각 19.3 g kg⁻¹, 344 mg kg⁻¹로 가장 높았다. 이는 음폐혼합퇴비 연용으로 인한 토양 유기물 증가에 따른 유효인산 함량의 증가로 판단되며 음폐혼합퇴비 사용 시 무기질비료에 비하여 식물체 근권의 인산활성도를 증가시킨다는 선행연구결과와 유사하였다²⁵⁾. 교환성 양이온은 무처리구에 비해 음폐혼합퇴비 처리구에서 높게 나타났는데, 퇴비 내 포함되어 있는 Ca, Mg 등 양이온 함량에 영향을 받은 것으로 판단된다²⁶⁾.

Table 4. Soil Chemical Characteristics after Harvesting of Red Pepper by Food Waste Compost with Manure Applications

Treatments	pH	EC dS m ⁻¹	OM g kg ⁻¹	Av. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	TC %	TN %	NH ₄ -N mg kg ⁻¹	NO ₃ -N mg kg ⁻¹	Exchangeable cations					CEC %	ESP
									K	Ca	Mg	Na			
NF	6.5b	0.3b	13.5c	224b	0.78c	0.10c	9.1a	2.3a	0.6c	5.9c	1.6a	0.10b	8.7b	2.56b	
NPK	6.4b	0.5ab	16.0bc	319ab	0.92bc	0.11bc	8.0a	4.0a	0.6bc	5.9bc	1.7a	0.15b	9.2b	2.43b	
NPKFWC1	6.7ab	0.4ab	17.0ab	328a	0.98ab	0.13b	9.9a	5.0a	0.7ab	6.6b	1.7a	0.14b	9.1b	3.72ab	
NPKFWC2	6.6b	0.5a	16.6abc	333a	0.96abc	0.13b	12.8a	8.4a	0.6abc	6.5b	1.6a	0.19a	11.1a	3.70ab	
NPKFWC3	7.0a	0.4ab	19.3a	344a	1.12a	0.15a	9.0a	3.6a	0.7a	7.3a	1.7a	0.23a	12.2a	5.41a	
Optimal range	6.0~6.5	≤2	25~35	450~550	-	-	-	-	0.7~0.8	5.0~6.0	1.5~2.5	-	-	<15	

*Values are the means (n=3) with standard deviations in the parentheses. Numbers with the same letter within a column are not significantly differed(DMRT, p<0.05), NF : no fertilization, NPK: inorganic fertilizer, NPKFWC1: inorganic fertilizer + 900 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure, NPKFWC2: inorganic fertilizer + 1,800 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure, NPKFWC3: inorganic fertilizer + 2,700 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure.

교환성 나트륨은 모든 처리구에서 시험 전 토양에 비해 통계적 유의성 있게 증가하였으나 변화는 미미하였으며, 음폐혼합퇴비에 따른 염류집적피해는 나타나지 않은 것으로 판단된다.

또한, 음폐혼합퇴비를 추천사용량의 200% 처리한 NPKFWC2에서 CEC 증가가 통계적으로 유의성이 확인되었고, 토양 중 치환성 나트륨 함량의 증가로 ESP가 상승됨을 확인하였다(p<0.05). 연속재배 시험결과 2차년도에서는 처리구간 ESP 증가폭이 컸으며(data not show), 3차년도 결과에서 ESP 변화는 통계적 유의성이 있으나 2차년도 증가 보다는 낮음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 3차년도에 2차년도 대비 강우량 및 강우빈도 증가가 영향을 준 것으로 예상된다.

3.2. 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비 연용에 따른 고추 생육 특성

음폐혼합퇴비 사용에 따른 고추 생육 특성을 조사한 결과는 Table 5와 같다. 1년차 고추의 초장은 무처리구를 제외하고 전체 처리구간 유의한 차이는 없었으며, NPKFWC2에서 93.5 cm로 가장 높았다. 생과중은 초장과 유사한 경향을 보였으며, NPKFWC2에서 NPK처리구 대비 뿌리, 줄기, 잎에서 각각 약 11%, 15% 및 37%, 열매는 162% 높게 나타났다. 2년차 초장은 무처리구와 NPK처리구 대비 음폐혼합퇴비 처리구에서 높게 나타났으며 NPK처리구에 비해 NPKFWC1과 NPKFWC3은 약 12%, FWC2는 약 10% 높게 나타났다. 생과중은 1년차와 유사하게 NPKFWC2에서 가장 높게 나타났다. 3년차 초장은 NPKFWC3에서 100.1 cm로 가장 높게 나타났으며 1, 2년차와 같이 NPKFWC2에서 높은값을 보였다. 이러한 결과는 처리된 무기질비료로 인해 식물의 필수영양소인 N, P, K가 공급되었고, 퇴비에 함유되어 있는 유기물이 토양의 비옥도를 증대시켜 초장 및 생과중이 증가한 것으로 판단된다⁸⁾. 본 실험결과와 유사한 경향으로 Lee et al (2023)의 선행연구에서 음식물류 혼합 가축분 퇴비 처리 시 퇴비가 유기물 공급원으로써 토마토 생육제로 작용하여 생육을 증가시킨다고 보고한 바 있다²⁷⁾. 또한 NPKFWC3에서 생과중은 감소하는 경향을 보였는데 이는 퇴비의 과량사용으로 인

Table 5. Growth Characteristics of Red Pepper by Food Waste Compost with Manure Applications

Year	Treatments	Plant height		Biomass (g plant ⁻¹)		
		cm plant ⁻¹	Stem	Leaf	Root	Fruit
2020	NF	79.9b	161.1b	131.3b	53.9b	68.5b
	NPK	92.8a	310.7a	234.0a	88.8a	392.5ab
	NPKFWC1	90.2a	343.8a	273.2a	106.1a	1,017.3a
	NPKFWC2	93.5a	345.0a	268.4a	121.6a	1,027.3a
	NPKFWC3	87.4a	304.4a	221.9a	110.6a	452.0ab
2021	NF	89.2a	144.4b	128.9a	209.9b	25.2b
	NPK	95.6ab	208.7ab	181.9a	276.2a	26.9.b
	NPKFWC1	104.0a	183.9ab	194.1a	267.9a	28.8b
	NPKFWC2	102.1a	338.2a	271.6a	421.1a	45.4a
	NPKFWC3	104.3a	182.2ab	158.4a	242.8a	27.3b
2022	NF	79.3b	80.7b	82.4b	282.3b	51.3c
	NPK	97.8a	240.7a	223.6a	401.1ab	122.7a
	NPKFWC1	89.6ab	213.1a	201.8a	388.2ab	92.0b
	NPKFWC2	97.3a	273.7a	258.4a	563.7a	131.3a
	NPKFWC3	100.1a	245.8a	220.9a	532.3a	124.7a

*Values are the means (n=3) with standard deviations in the parentheses. Numbers with the same letter within a column are not significantly differed(DMRT, $p<0.05$). NF : no fertilization, NPK: inorganic fertilizer, NPKFWC1: inorganic fertilizer + 900 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure, NPKFWC2: inorganic fertilizer + 1,800 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure, NPKFWC3: inorganic fertilizer + 2,700 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure.

해 양분의 과량 투입 및 집적 등으로 인해 작물생육이 저하된 것으로 판단된다²⁸⁻³⁰. Jeong et al (2024)의 연구 결과에서 음폐혼합퇴비 처리 시 고추의 주당 생과중은 NPK처리구에 비해 음폐혼합퇴비 처리구에서 높았으나 무기질비료 정량+음폐혼합퇴비 1배, 무기질비료 정량+음폐혼합퇴비 2배 처리구까지는 증가하다가 무기질비료정량+음폐혼합퇴비 3배 처리구에서 감소하는 경향을 보인다고 하였으며, 본 실험의 연구결과와 유사한 경향을 보였다³¹.

3.3. 음식물류폐기물 혼합 가축분 퇴비 연용에 따른 고추 생산량 및 양분이용효율

음폐혼합퇴비 사용에 따른 고추의 수량(Fig. 1A) 및 양분이용효율(Fig. 1B)을 조사한 결과는 다음과 같다. 1년차에 고추 수량은 NPKFWC2(3,452 kg 10a⁻¹)에서 가장 높았으며, NPKFWC3(3,265 kg 10a⁻¹), NPKFWC1(3,126 kg 10a⁻¹) 순으로 높게 나타났다. 2년차, 3년차에는 NPK처리구와 유의한 차이는 없었으나 음폐혼합퇴비 처리구에서 높게 나타났으며, 음

폐혼합퇴비 사용량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 특히, 3년차에 수량이 가장 낮았으며, 음폐혼합퇴비 3년간 연용시 NPKFWC3에서 1년차에 3,265 kg 10a⁻¹에서 3년 차에 1,948 kg 10a⁻¹로 약 40% 수량이 크게 감소하였다. 이는 앞서 설명한 생육단계에서 1년차에 비해서 3년차에 식물체의 길이 및 생과중이 증가한 것과 상반되는 결과로 나타났다. Lee 등(2023)의 연구에 따르면 음식물류혼합 가축분 퇴비 처리시 영양생장 단계까지는 정상적으로 생육이 이루어지나 생식 성장단계에서 연작장해 등에 의하여 작물수량이 감소한다고 보고한 바 있으며²⁷, 본 연구결과도 이와 유사하게 음폐혼합퇴비 연용으로 식물체 내 염류농도가 증가하여 작물 수량 감소에 영향을 준 것으로 판단된다^{32,33}.

고추의 양분이용효율은 NPK처리구와 비교하여 음폐혼합퇴비 처리구에서 낮은 경향을 보였으며, NPKFWC1에서 질소(N), 인산(P₂O₅), 칼리(K₂O) 이용효율은 각각 61.7%, 58.5%, 52.1%로 나타났다. 음폐혼합퇴비 사용량이 증가함에 따라 흡수량이 감소하여 NPKFWC3에

서 양분이용효율은 23.3%(N), 22.8%(P₂O₅), 21.2%(K₂O)로 NPKFWC1에 비해 약 3배 감소하였다. 이는 음폐

혼합퇴비의 과다사용으로 토양에 양분이 축적되어 이용효율이 감소한 것으로 판단되며, Cho and Park

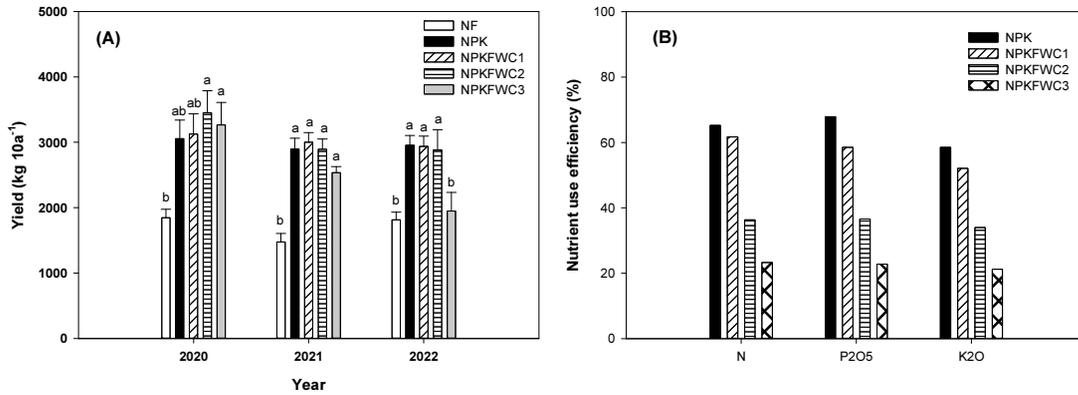


Fig. 1. Yield (A) and Nutrient use efficiency (B) of red pepper during 2020-2022 by food waste compost with manure applications. *Numbers with the same letter within a column are not significantly differed(DMRT, $p < 0.05$), NF : no fertilization, NPK: inorganic fertilizer, NPKFWC1: inorganic fertilizer + 900 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure , NPKFWC2: inorganic fertilizer + 1,800 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure, NPKFWC3: inorganic fertilizer + 2,700 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure.

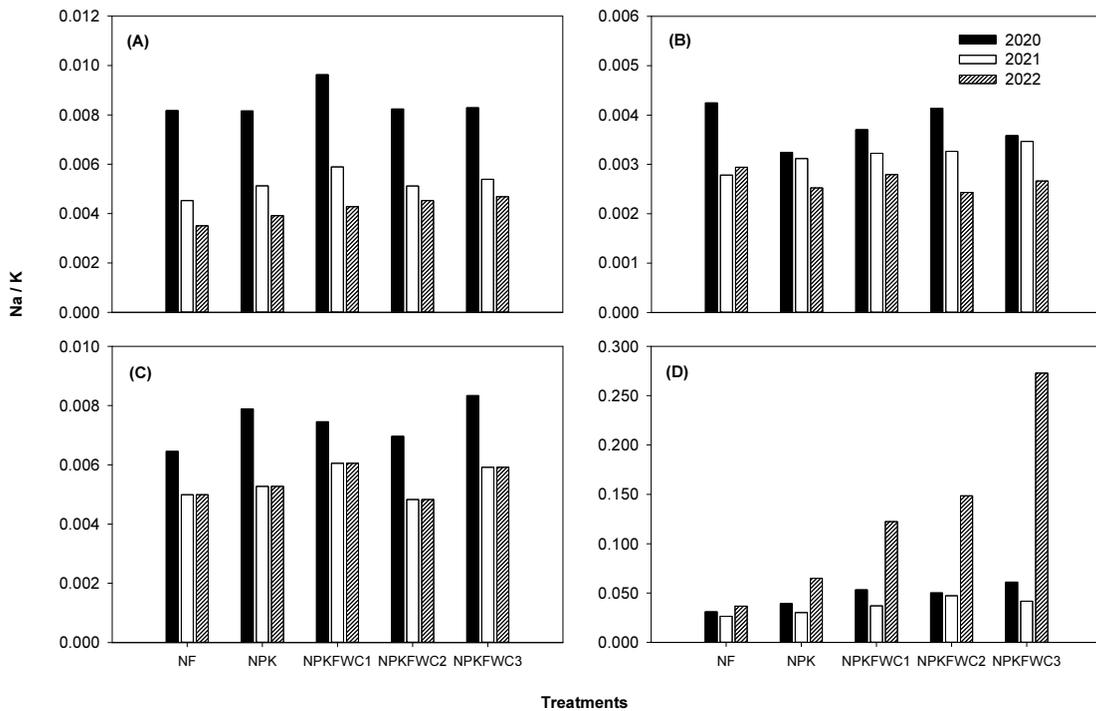


Fig. 2. Na/K ratio in the fruit (A), leaf (B), stem (C) and root (D) of red pepper during 2020, 2021, 2022 by food waste compost with manure applications. *Numbers with the same letter within a column are not significantly differed(DMRT, $p < 0.05$), NF : no fertilization, NPK: inorganic fertilizer, NPKFWC1: inorganic fertilizer + 900 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure , NPKFWC2: inorganic fertilizer + 1,800 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure, NPKFWC3: inorganic fertilizer + 2,700 kg 10a⁻¹ food waste compost with manure.

(2002)의 선행연구에서 보여준 유기질 비료의 사용이 증가함에 따라 질소 등 양분이 토양에 축적된다는 보고와 일치하였다³⁴⁾. 또한, 작물의 질소이용효율은 작물생장과 수량에 중요한 요소로서 정의 상관관계를 갖는다고 알려져 있으며³⁵⁻³⁷⁾, 앞서 확인한 바와 같이 본 연구결과에서도 생육 및 수량과 유사한 경향으로 나타났다.

고추의 Na/K는 줄기를 제외한 생과, 잎, 뿌리에서 NPK처리구에 비해 음폐혼합퇴비 처리구에서 높았다(Fig. 2). 음폐혼합퇴비 사용량이 증가함에 따라 토양의 Na 함량이 증가하고, Na와 K는 길항작용에 의하여 식물체에서 흡수되는 Na 농도는 증가하며 K의 흡수는 저해되어 Na/K비가 높아진 것으로 판단되며 이러한 이유로 Na/K는 염분스트레스의 지표로 활용되고 있다³⁸⁻⁴⁰⁾. 음폐혼합퇴비 연용에 따라 고추의 생과, 줄기, 잎의 Na/K 비율은 감소하였고, 뿌리의 경우 2년차에 감소하다가 3년차에 증가하였다. 특히 3년차 뿌리의 Na/K는 퇴비 사용량이 증가함에 따라 증가하여 NPKFWC3이 NPKFWC1에 비해 약 2배 높았는데, 이는 앞서 확인한 결과와 같이 식물체 양분 흡수량 및 생산량 감소로 이어진 것으로 판단된다⁴¹⁾.

4. 결론

본 연구는 음폐혼합퇴비의 연용 및 사용량에 따른 고추의 생육 및 토양화학성 변화를 알아보고자 연구를 수행하였다. 고추 생육조사 결과, 식물체 지상부 길이는 무처리구 대비 음폐혼합퇴비 처리구(NPKFWC)에서 길었으며, 생체중은 3년간 NPKFWC2에서 NPK처리구 대비 높게 나타났다. 수량조사 결과 1년차에는 NPKFWC2에서 높았으나 2년차부터 추천사용량(900 kg 10a⁻¹) 이상의 퇴비사용시 수량이 낮아지는 경향을 보였다. 토양 화학성 분석 결과 pH는 NPKFWC3에서 7.0으로 가장 높았으며, 교환성 나트륨 함량의 증가로 ESP가 상승되었다. 유기물 함량, 유효인산, 암모니아성 질소, 질산성 질소 및 양이온은 대조구인 NPK처리구 대비 음폐혼합퇴비 처리구에서 높게 나타났다. 본 연구결과 고추에 음폐혼합퇴비 처리 시 적정사용량을 3년 연속재배 할 경

우 대조구인 NPK처리구에 비해 작물생육과 토양 화학성을 향상시키는 것으로 나타났으나 사용량이 증가함에 따라 양분이용효율 저하 및 작물 수량이 감소되는 경향을 보였다. 따라서 고추의 생육 및 토양에 대한 영향 등 종합적으로 고려했을 때 음폐혼합퇴비는 정량 사용이 추천되며, 과량 사용 및 연용에 따른 염류의 이동특성 등에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업인 농촌현안 해결 리빙랩 프로젝트 중 “음식물류폐기물을 활용한 가축분 퇴비의 품질 균일화 기술 개발 (PJ015293)” 과제의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. Kang, B. M., Hwang, H. U., Kim, J. H., Yang, Y. W., and Kim, Y. J., “Study on reutilization with aerobic microbes of organic food waste leachates”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(1), pp. 54-59. (2011).
2. Shin, H. S., Kim, H. W., and Kang, S. T., “Degradation characteristics in anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste”, *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 10(1), pp. 96-101. (2002).
3. KECO(Korea Environment Corporation), “National Waste Generation and Treatment Status(2022)”, Ministry of Environment, Sejong, Korea. (2023).
4. Kim, K. H., Kwon, Y. H., Lee, D. J., Kang, J. K., Sin, S. K., and Son, J. I., “A study on applied device of reduction for decrease of food waste”, *Journal of Korea Society Waste Management*, 32(3), pp. 281-288. (2015).
5. Lee, D. J., Lee, S. Y., Bae, J. S., Kang, J. G., Kim, K. H., Rhee, S. S., and Seo, D. C., “Effect

- of volatile fatty acid concentration on anaerobic degradation rate from field anaerobic digestion facilities treating food waste leachate in South Korea”, *Journal of Chemistry*, 2015(1), pp. 640717. (2015).
6. Phae, C. G., “Operation Problems and Solutions of Food Waste Composting Facility”, *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 10(2), pp. 25~37. (2002).
 7. Lee, J. I., and Lim, D. S., “Economic Analysis on food waste recycling system”, *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 11(2), pp. 46~53. (2003).
 8. Kim, Y. S., and Kim, B. T., “Effect of food waste and poultry manure compost on the growth of young radish and the change of soil properties”, *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 15(1), pp. 159~170. (2007).
 9. So, K. H., Seong, K. S., Seo, M. C., and Hong, S. G., “Environmental impacts of food waste compost application on paddy soil”, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 40(1), pp. 85~94. (2007).
 10. Mona, S., Bhatia, R., Deepak, B., Kiran, B., and Nisha, R., “Biochar for Reclamation of Saline Soils”, *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions*, pp. 451~466. (2019).
 11. Lee, J. E., Seo, D. H., Ro, H. M., and Yun, S. I., “Yield response of Chinese cabbage to compost, gypsum, and phosphate treatments under the saline-sodic soil conditions of reclaimed tidal land”, *Horticultural Science and Technology*, 34(4), pp. 587~595. (2016).
 12. Lee, J. E., and Yun, S. I., “Effects of compost and gypsum on soil water movement and retention of a reclaimed tidal land”, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 47(5), pp. 340~344. (2014).
 13. Lee, Y. D., Huseein, K. A., Yoo, J. H., and Joo, J. H., “The Effect of Food Waste Compost on Tomato (*Lycopersicon Esculentum*. L) Growth and Soil Chemical Properties”, *Korean Journal of Environmental Agricultural*, 38(4), pp. 332~337. (2019).
 14. Lee, C. H., Park, S. J., Kim, M. S., Yun, S. G., Ko, B. G., Lee, D. B., Kim, S. C., and Oh, T. K., “Characteristics of compost produced in food waste processing facility”, *Korean Journal of Agricultural Science*, 42(3), pp. 177-181. (2015).
 15. Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Hatch, D. J., Cuttle, S. P., Rayns, F. W., and Gosling, P., “Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen?”, *Soil Use and Management*, 18(1), pp. 248~255. (2002).
 16. Chang, J. I., and Hsu, T. E., “Effects of compositions on food waste composting”, *Bioresource Technology*, 99, pp. 8068~8074. (2008).
 17. Cerda, A., Artola, A., Front, X., Barrena, R., Gea, T., and Sánchez, A., “Composting of food waste: Status and challenges”, *Bioresource Technology*, 248, pp. 57~67. (2018).
 18. O’Connor, J., Hoang, S. A., Bradney, L., Dutta, S., Xiong, X., Tsang, D. C. W., Ramadass, K., Vinu, A., Kirkham, M. B., and Bolan, N.S., “A review on the valorisation of food waste as a nutrient source and soil amendment”, *Environmental Pollution*, 272, pp. 115985. (2021).
 19. Lee, C. H., Ko, B. G., Kim, M. S., Park, S., Yun, S. J., and Oh, T. K., “Effect of food waste compost on crop productivity and soil chemical properties under rice and pepper cultivation”, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(6), pp. 682~688. (2016).
 20. Giusquiani, P. L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D. and Benetti, A., “Urban waste compost: Effects on physical, chemical, and biochemical soil properties”, *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America*, 24(1), pp. 175~182. (1995).
 21. Kim, Y. S., Cho, S. H., Lee, H., and Lee, G. J., “Growth properties of mixtures with mixed organic fertilizer and dried food waste powder in Pakchoi (*Brassica rapa* L)”, *Journal of Korea Organic*

- Resources Recycling Association, 29(3), pp. 17~25. (2021).
22. Jeong, Y. J., Lee, S. G., Kim, S. H., Jeon, S. H., Lee, Y. H., Kwon, S. I., and Shim, J. H., "Evaluation of the effect of different application ratios of lime-treated fertilizer mixed with food waste on Chinese Cabbage (*Brassica rapa* L.) yield and soil chemical properties", Korean Journal of Crop Science, 68(2), pp. 81~89. (2023).
 23. RDA, "Establishment and designation of official standard of fertilizers", Rural development administration, Suwon, Korea. (2016).
 24. NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology), "Method of soil and plant analysis", RDA, Suwon, Korea. (2000).
 25. Lee, J. J., Park, R. D., Kim, Y. W., Shim, J. H., Chae, D. H., Rim, Y. S., Sohn, B. K., Kim, T. H., and Kim, K. Y., "Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and lettuce growth", Bioresource Technology, 93, pp. 21~28. (2004).
 26. Shin, S. M., Chang, K. W., Lee, J. J., Han, K. P., Hing, J. H., and Jeon, H. K., "Changes of soil physico-chemical properties and plant growth according to the application of the food waste fertilizer", Journal of Agriculture and Life Science, pp. 269~273. (2006).
 27. Lee, S. H., Jeong, Y. J., Kwon, O. Y., Na, H. S., Cho, H. J., and Shim, J. H., "Effect of continuous application for growth and yield. of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in greenhouse using food waste compost with manure", Journal of Agriculture and Life Science, 57(1), pp. 25~34. (2023).
 28. Kim, T. Y., Kim, K. D., Cho, I. H., Nam E. Y., and Mon, B. H., "Effects of Salt Reduction for Leaf Vegetable Cultivation on High temperature in Salt accumulation House", The Korean Society for Bio-Environment Control, pp. 213~216. (2003).
 29. Sohn, B. K., Cho, J. S., Kang, J. G., Cho, J. Y., Kim, K. Y., Kim, H. W., and Kim, H. L., "Physico-chemical properties of soils at red pepper, garlic and onion cultivation areas in Korea" Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, 32(2), pp. 123~131. (1999).
 30. Jun, H. S., Park, W. C., and Jung, J. S., "Effects of soil addition and subsoil plowing on the change of soil chemical properties and the reduction of root-knot nematode in continuous cropping field of oriental melon (*Cucumis melo* L.)", Korean Journal of Environmental Agriculture, 21(1), pp. 1~6. (2002).
 31. Jeong, Y. J., Lee, S. H., Na, H. S., Kim, S. H., Kwon, S. I., and Shim, J. H. "Effect on Growth and Yield of Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) by the Application Ratio of Food Waste Compost with Manure under Upland", Journal of Agriculture and Life Science, 58(2), pp. 43~51. (2024).
 32. Martinez, V., Cerda, A., and Fernandez, F. G., "Salt tolerance of four tomato hybrids", Plant and Soil, 97(2), pp. 233~241. (1987).
 33. Li, Y. L., Stanghellini, C., and Challa, H., "Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.)", Scientia Horticulturae, 88(1), pp. 11~29. (2001).
 34. Cho, S. H., and Park, T. H., "Effect of organic fertilizer, Microorganism and swaweed extract application on growth of Chinese cabbage", Journal of Korea Organic Resources Recycling Association, 10(4), pp. 81~85. (2002).
 35. Schulten, H. R., and Schunitzer, M., "The chemistry of soil organic nitrogen: Review", Biology and Fertility of Soils, 26, pp. 1~15. (1997).
 36. Choi, H. S., Xiong, L., Kim, W. S., Choi, K. J., Lee, Y., and Jung, S. K., "Soil characteristics and leaf and bud developments with different organic fertilizers in a pear orchard", Korean Journal of Organic Agriculture, 18(3), pp. 363~375. (2010).
 37. Kim, S. H., Hwang, H. Y., Seo, H. B., Lim, J. E., Park, S. J., Lee, Y. H., and Kim, M. S., "Response

- of yield and nitrogen use efficiency for garlic on different types and rates of organic fertilizer”, *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 27(4), pp. 35~42. (2019).
38. Zekri, M., and Parsons, L. R., “Salinity tolerance of citrus rootstocks: Effects of salt on root and leaf mineral concentrations”, *Plant and soil*, 147, pp. 171~181. (1992).
39. He, T., and Cramer, G. R., “Growth and mineral nutrition of six rapid-cycling Brassica species in response to seawater salinity”, *Plant and Soil*, 139, pp. 285~294. (1992).
40. Lee, S. S., and Chang, K. W., “Changes of soil chemical properties and uptake of salts by the plants according to the application of the food waste compost”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 6(2), pp. 59~67. (1998).
41. Sustr, M., Soukup, A., and Tylova, E., “Potassium in root growth and development”, *Plants*, 8(10), pp. 435. (2019).