

음식물류 폐기물 혼합 유기질비료를 이용한 벼 생산성 증대와 양분 손실 감소 간의 상충관계

박혜진¹, 이슬비¹, 조송래¹, 현병근¹, 권나현², 이정구^{2,3*}

Trade-off between Increasing Rice Productivity and Reducing Nutrient Loss Using Organic Amendment with Food Waste in South Korea

Hye Jin Park ¹, Seul Bi Lee ¹, Song Rae Cho ¹, Byung Keun Hyun ¹, Na-Hyun Kwon ² and Jeong-Gu Lee ^{2,3*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과, ²경북대학교 농업생명과학대학 응용생명과학부, ³경북대학교 응용생명과학과

¹Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²School of Applied Life Science, College of Agriculture and Life Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ³Department of Applied Biosciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

* Correspondence: jeonggu@knu.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.05>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 37-44

Received: December 10, 2024

Revised: January 14, 2025

Accepted: January 30, 2025

Published: February 27, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The increasing issue of food waste necessitates solutions that prioritize resource recycling and environmental sustainability. This study evaluated the effects of combining food waste-derived organic fertilizer with inorganic fertilizer on rice productivity, nutrient utilization efficiency, and water pollution. The experiment included seven treatments: a control group (Control), a nitrogen-only treatment (PK), a standard inorganic fertilizer treatment (NPK), a full organic fertilizer treatment (OA), an organic fertilizer mixed treatment (MFW), and combinations of NPK+OA and NPK+MFW. Results showed that the organic fertilizer treatment zones (OA, NPK+OA) had significantly lower soil pH after harvest compared to other treatments, while soil electrical conductivity (EC) was higher ($p < 0.05$). Additionally, organic fertilizer-containing zones exhibited 124% and 106% greater water retention and nutrient uptake capacity, respectively, compared to the NPK treatment. The water productivity index was highest in the NPK+MFW treatment, reaching 138%. Nitrogen concentrations in water were highest in the NPK treatment (11.3 mg L⁻¹ on average) but decreased significantly to 6.1–9.6 mg L⁻¹ in the organic fertilizer treatments. In conclusion, the combined use of inorganic fertilizers and food waste-derived organic fertilizers in rice cultivation provides an optimal strategy for enhancing productivity while ensuring environmental sustainability.

Keywords: Nutrient use efficiency, Organic amendment, Paddy field, Sustain agriculture

서론

인구 증가와 더불어 식생활의 변화로 인해 매년 발생하는 음식물류 폐기물의 양도 2005년 약 6억 톤에서 2020년에는 10억 톤에 이르러, 지속적으로 증가하는

추세를 보이고 있다[1]. 그러나 전 세계적으로 여전히 많은 양의 음식물류 폐기물이 매립 및 소각을 통해 처리되고 있으며, 이러한 처리 방식은 장기적으로 음식물류 폐기물에서 발생하는 침출수와 염류 축적, 메탄가스 배출 등을 통해 수계, 토양, 대기오염을 유발하여 전반적인 환경에 악영향을 미친다[2]. 최근 농업 부문에서는 환경보호와 자원 재활용 측면에서 음식물류 폐기물을 퇴비화하여 농업용 비료로 활용하거나, 사료화하여 동물 사료로 전환하려는 노력이 점차 증가하고 있다[3,4].

벼는 세계 3대 식량 작물 중 하나로, 전 세계적으로 160백만 헥터 이상 재배되고 있으며, 대부분이 담수조건에서 재배되고 있다. 이러한 담수 조건의 벼 재배 환경은 염(salt)에 대한 저항성이 높아, 염 농도가 높은 음식물류 폐기물 혼합 퇴비 및 유기질 비료의 활용 가능성이 높게 평가되고 있다. 그러나 음식물류 폐기물의 단독 투입만으로는 벼 생장에 필요한 충분한 양분을 공급하기 어렵고, 양분 불균형을 초래할 수 있다. 음식물류 폐기물을 비료 원료로 사용할 경우, 분해 속도와 영양소 방출이 일정하지 않아 관리가 어렵고, 비료로서의 사용기간도 짧아 농업 자재로 활용하기 위한 종합적인 관리 체계가 아직 완벽하게 갖추어지지 않은 상태이다. 반대로, 필요한 양분을 충족하기 위해 음식물류 폐기물의 투입량을 증가시킬 경우, 염류 장애뿐만 아니라 토양 구조의 교란, 작물 근권의 생육 저하, 환원 장애 등의 문제가 발생할 수 있어 음식물류 폐기물을 비료로 사용하는 데에는 여러 가지 제약이 따른다[5].

음식물류 폐기물의 문제점을 보완하기 위해, 이를 단독으로 사용하기보다는 가축분퇴비, 유기질 비료, 녹비 작물(예: 클로버, 자운영) 등의 다양한 유기물 비료와 혼합하여 시비하는 방법이 널리 활용되고 있다[6,7]. 특히, 유기물 투입은 토양 pH 조절, 수분 함량 유지, 완충 능력 증대, 중금속 유해 작용 감소, 탄소 축적 능력 향상 등 다양한 긍정적 효과가 있다[8]. 그러나 유기물 비료는 미생물의 무기화 과정을 거쳐야만 작물이 흡수할 수 있는 무기태 형태로 전환되므로, 작물이 이용하기 위해 투입 후 약 10~50일 이상의 시간이 필요하다. 이러한 무기화 과정으로 인해 작물의 초기 생장에 필요한 영양소를 적시에 공급하기 어려워지며, 이는 작물의 생산성 저하를 초래할 수 있어 중요한 문제가 된다[9].

본 연구는 벼 재배 기간 동안 무기질 비료 사용을 대체하기 위해 음식물류 폐기물의 활용 가능성을 높이고자 수행되었다. 본 연구의 가설은 벼 생장 초기에는 무기질 비료로 필요한 양분을 신속하게 공급하고, 중·장기적으로는 유기물 비료의 무기화를 통해 추가적인 양분을 안정적으로 제공함으로써 음식물류 폐기물 유기질비료를 활용하여 질소 손실을 최소화할 수 있다는 것이다. 이를 위해, 1) 음식물류 폐기물의 단점을 보완하기 위해 유기질 비료와 혼합한 비료를 투입하고, 2) 기존에 투입되는 무기질 비료와 동일한 양의 양분을 대체하여 투입하였다. 또한, 담수 조건에서 발생하는 양분 손실을 줄이기 위해, 벼 재배 과정 중 필요한 질소를 유기물 비료(일반 및 음식물류 폐기물 혼합 유기질 비료)와 무기질 비료를 혼합하여 공급하여 주었다.

재료 및 방법

시험 설계 및 처리구 설정

본 시험은 강우 등 외부 환경 영향을 최소화하기 위하여 국립농업과학원 종합유리온실 내부에서 포트 시험으로 수행하였다 (35°49'N, 127°2'E). 전북 김제시 논 토양을 공시토양으로 사용하였으며 1/3000 a 와그너 포트에 용적밀도를 1.2 g cm⁻³로 맞추어 시험을 진행하였다. 공시된 토양의 특성은 pH (1:5 H₂O) 5.8, EC 0.96 dS m⁻¹, 유기물 함량 19 g kg⁻¹, 질산태 질소(NO₃-N) 17.6 mg kg⁻¹, 암모니아태 질소(NH₄-N) 13.6 mg kg⁻¹, 유효 인산 39 mg kg⁻¹로 나타났다(Table 1). 시판 중인 유기질비료(pH 6.4, TN 9%, P₂O₅ 1%, 수분 함량 0.72%)를 사용하였으며, 시험 자재로 사용한 유기질비료와 음식물류 폐기물(음폐)이 혼합된 유기질비료의 구성 원료 및 특성은 Table 2와 같다.

처리구는 총 7개의 처리구로 1.무처리구(control), 2.질소 무처리구(PK), 3.표준 무기질비료 처리구(NPK), 4.유기질비료 처리구(Organic amendment, OA), 5.유기질비료와 음폐 혼합 처리구(mixture of organic amendment with food waste, MFW), 6. NPK +OA, 7. NPK+MFW로 설정하였으며, 무처리구를 제외한 6개의 양분 처리구는 동일한 양의 양분(N, P₂O₅, K₂O)을 투입하여 주었다. 유기질비료와 음폐 혼합 유기질비료 처리량은 벼 표준사용량(N-P₂O₅-K₂O : 9.0-4.5-5.7 kg 10a⁻¹)과 Eq. (1) 식을 이용하여 계산하였고, 표준사용량과 비교하여 부족한 양분(N, P, K)은 무기질비료로 보충하였다(Table 3). 시험은 완전임의배치 3반복으로 수행하였다.

$$\text{유기질비료 사용량}(kg\ 10a^{-1}) = N\text{표준 사용량}(kg\ 10a^{-1}) \times \frac{100}{\text{유기질비료 } N\text{함량}(\%)} \quad \text{Eq. (1)}$$

Table 1. Chemical properties of the soil before rice cultivation

Properties	Soil	Optimum range ¹⁾
pH (1:5 H ₂ O)	5.8	5.5-6.5
EC (dS m ⁻¹)	0.96	-
Organic matter (g kg ⁻¹)	19	20-30
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	17.6	-
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	13.6	-
Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	39	80-120
Ex. Cations (cmol _c kg ⁻¹)	K	0.20-0.30
	Ca	5.0-6.0
	Mg	1.5-2.0
	Na	-
Available SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	508	≥ 157

¹⁾ Optimum range for rice cultivation in a normal paddy (NAAS, 2017).

Table 2. Components and properties of experimental materials

Treatment	Component	pH	Content (%)				C/N
		1:5	TN	P ₂ O ₅	K ₂ O	Moisture content	
Organic amendment	Organic matter over 60%	6.4	9	1	2	0.72	4.8
MFW ¹⁾	Castor oil-cake 63%, Rice bran 6%, Molasses 1%, Dried food waste 30%	6.2	4	1.6	1.4	9.08	9.1

¹⁾ MFW: mix of organic amendment with food waste

Table 3. Amount of NPK application by different treatment

Treatment ¹⁾	Fertilizer input (kg 10a ⁻¹)								
	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	Inorganic	Organic	Sum	Inorganic	Organic	Sum	Inorganic	Organic	Sum
Control	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PK	-	-	-	4.5	-	4.5	5.7	-	5.7
NPK	9	-	9	4.5	-	4.5	5.7	-	5.7
OA	-	9	9	3.5	1.0	4.5	3.7	2.0	5.7
MFW	-	9	9	0.9	3.6	4.5	2.5	3.2	5.7
NPK+OA	4	5	9	3.9	0.6	4.5	4.6	1.1	5.7
NPK+MFW	4	5	9	2.5	2.0	4.5	3.9	1.8	5.7

¹⁾ OA: organic amendment, MFW: mix of organic amendment with food waste

포트 벼 재배 관리

재배 품종은 신동진 벼를 사용하였으며, 2020년 6월 5일에 정식하여 10월 26일에 수확하였다(146일). 무기질 비료는 분시 비율에 따라 유묘 이앙 1주 전 밑거름, 이앙 13일 후 가지거름, 58일 후 이삭거름으로 나누어 시비하였고, 유기질 비료(시판 및 음폐 혼합)는 밑거름으로 전량 시비하였다. 물 관리는 벼 수확 2주 전까지 토양 표면에서 5cm 높이로 상시 담수하였으며, 재배기간동안 벼의 생육 특성(초장, 분얼비 등) 및 수량 조사는 농촌진흥청 농사시험연구 조사기준에 준하여 실시하였다.

토양 및 식물체 분석

토양과 식물체 분석은 국립농업과학원의 ‘토양 및 식물체 분석법’에 준하여 실시하였다. 토양은 자연 건조한 후 분쇄하여

2 mm 체로 거른 뒤 분석 시료로 사용하였다. pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5 비율로 혼합한 뒤, 30분간 진탕하여 pH/EC 미터(Thermo Fisher, USA)를 이용해 측정하였다. 유기물(OM)은 Tyurin법, 유효 인산(Av. P₂O₅)은 Lancaster법을 통해 분석하였으며, 교환성 양이온(K, Ca, Mg, Na)은 1M NH₄OAc (pH 7.0)로 침출한 뒤 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES, Integra XL, GBC, Australia)를 사용하여 측정하였다. 유효 규산(Av. SiO₂)은 1N NaOAc (pH 4.0)로 침출한 뒤 비색계를 이용하여 분석하였다.

식물체는 80°C에서 48시간 건조한 후 분쇄하여 분석 시료로 사용하였다. 식물체 시료 0.5g은 분해액(H₂O:H₂SO₄:HClO₄ = 1:5:9)을 사용하여 습식 분해하였다. 질소는 자동 분석기(Auto Analyzer 3, BRAN+LUEBBE, Germany)를 이용하여 분석하였으며, 인산은 UV-Spectrometer (UH700, Hitachi, Japan)를 사용하여 측정하였다. 양이온(K, Ca, Mg, Na) 함량은 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES)를 이용하여 분석하였다.

양분이용효율 및 양분용출

처리 간 작물 수량 변화를 확인하기 위해 Eq. (2) 식을 이용하여 수량지수(Yield index, %)를 산출하였으며, 투입된 양분 대비 작물의 흡수량을 비교하기 위해 질소 이용 효율(Nutrient use efficiency, NUE)을 Eq. (3) 식을 통해 계산하였다. 또한, 양분 용출을 평가하기 위해 벼 답수 기간동안 주 1회 포트 내 표면수를 채취하였다. 채취한 표면수는 국립농업과학원의 ‘농업용수 수질분석’ 기준에 따라 멸균 과정을 거친 후, 총질소(total N) 함량을 분석하였다.

$$Yield\ index(\%) = \frac{Grain\ yield\ (g)}{Grain\ yield\ in\ NPK(g)} \times 100 \quad Eq. (2)$$

$$NUE(\%) = \frac{N_{uptake}\ (Treatment - Control)}{Applied\ N\ amount} \times 100 \quad Eq. (3)$$

통계분석

모든 결과데이터는 SPSS (ver. 27)를 이용하여 ANOVA 분석하였고, 처리 간 평균 비교는 유의수준 5%에서 Duncan 검정으로 분석하였다.

결과 및 고찰

토양의 이화학적 특성 변화

모든 처리구에서 143일간 벼를 재배한 후, 토양의 pH는 시험 전 토양의 pH (5.8, 1:5 H₂O)와 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 수확 후에도 토양의 pH는 여전히 벼 재배에 적합한 수준을 유지하였다(Table 4). 특히, 유기질 비료를 투입한 처리구는 다른 처리구에 비해 수확 후 토양의 pH가 통계적으로 낮게 나타났다(p<0.05). 이는 유기질 비료의 C/N 비율이 4.8로, 음폐 혼합물(9.1)에서 비해 약 47% 낮기 때문으로 판단된다(Table 2). 낮은 C/N 비율의 유기질 비료는 음폐 혼합물보다 더 높은 질소(TN) 함량을 보유하고 있어 질산화 작용을 촉진하게 된다. 이 과정(NH₄⁺ + 2O₂ → NO₃⁻ + 2H⁺ + H₂O)에서 암모니아(NH₄⁺)가 질산염(NO₃⁻)으로 변환되면서 수소 이온(H⁺) 방출이 증가해 토양 pH를 낮출 수 있다. 또한, 유기질 비료의 분해 과정에서 미생물에 의해 유기산(초산, 젖산 등)이 방출되면서 다른 처리구에 비해 낮은 pH를 보일 가능성이 있다[10,11].

토양의 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 토양 내 총 양이온 함량과 매우 밀접한 정의 상관관계를 보인다. 일반적으로 유기질 비료나 음폐에는 K⁺(칼륨), Ca²⁺(칼슘), Mg²⁺(마그네슘)과 같은 양이온이 다량 포함되어 있고, 투입 후 질소 무기화 과정이 진행되므로 무기태 질소가 증가하면서 EC가 상승하는 경향을 보인다[8]. 토양 유기물(OM)과 유효 인산(Av. P₂O₅)의 경우, 토양의 높은 완충력으로 인해 처리구 간에 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다.

벼 생육 특성 평가

벼 생육 특성으로 총 6가지 요인(초장, 분얼수, 수당 입수, 천립중, 등숙률, 수량 지수)을 측정하였다(Table 5). 초장은 생산량

Table 4. Chemical properties of the soil after harvest

Treatment ¹⁾	pH (1:5 H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. Cations (cmol _c kg ⁻¹)			
					K	Ca	Mg	Na
Control	6.0 a	0.35 c	21 ns ²⁾	90 ns	0.08 ns	5.9 ns	0.9 ns	0.18 a
PK	6.0 a	0.51 b	22 ns	95 ns	0.09 ns	6.0 ns	1.0 ns	0.20 a
NPK	5.9 a	0.48 b	22 ns	91 ns	0.09 ns	6.0 ns	0.9 ns	0.21 a
OA	5.7 b	0.62 a	23 ns	98 ns	0.08ns	6.4 ns	1.0 ns	0.14 b
MFW	6.0 a	0.47 b	22 ns	94 ns	0.09 ns	6.0 ns	1.0 ns	0.17 ab
NPK+OA	5.7 b	0.66 a	21 ns	98 ns	0.07 ns	6.1 ns	1.0 ns	0.15 b
NPK+MFW	5.9 a	0.47 b	22 ns	95 ns	0.10 ns	6.3 ns	1.0 ns	0.16 ab
Optimum range ³⁾	5.5-6.5	-	20-30	80-120	0.20-0.30	5.0-6.0	1.5-2.0	-

¹⁾ OA: organic amendment, MFW: mix of organic amendment with food waste; ²⁾ Not significantly; ³⁾ Optimum range for rice cultivation in a normal paddy (NAAS, 2017).

Table 5. Growth characteristics of rice with different fertilizer treatments

Treatment ¹⁾	Plant height (cm, plant ⁻¹)	Tiller number per hill	Grains per panicle	1000-grain weight (g)	Ripening rate (%)	Yield Index (%)
Control	107 ns ²⁾	13 c	103 c	23 bc	55 d	57
PK	109 ns	16 c	123 b	24 ab	69 bc	94
NPK	111 ns	17 bc	130 ab	25 a	67 c	100
OA	113 ns	22 a	147 a	22 c	69 bc	126
MFW	110 ns	20 ab	132 ab	23 bc	84 a	123
NPK+OA	108 ns	21 a	127 b	22 c	76 abc	95
NPK+MFW	111 ns	21 a	145 a	22 c	77 ab	138

¹⁾ OA: organic amendment, MFW: mix of organic amendment with food waste; ²⁾ Not significantly

과 큰 연관성을 보이지 않았으며, 처리구 간에도 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 반면, 분얼수는 무질소 처리구(PK)를 제외하고, 모든 처리구에서 무처리구(control)에 비해 높은 분얼수를 보였다. 특히, 유기물을 투입한 처리구(OA, MFW, NPK+OA, NPK+MFW)는 무기질비료(NPK) 처리구에 비해 24%, control에 비해 최대 62% 높은 분얼수를 나타냈다. 수당 입수 역시 분얼수와 비슷한 경향을 보였으며, NPK+MFW와 OA처리구에서 각각 145립과 147립으로 가장 높은 수당 입수를 나타냈다(Table 5). 이러한 결과는 투입된 유기물질이 N, P, K와 같은 주요 양분뿐만 아니라 미량 원소를 함께 공급하여, 벼의 생장 초기 양분 요구량을 충족시키고 새로운 분얼 생성을 촉진했기 때문이다[12]. 또한, 유기물질의 특성상 함유된 전하(charge)가 토양 입자 간 공극을 증가시키고 토양 내 산소 공급을 원활히 하였으며, 이로 인해 토양의 물리성이 개선된 결과로 보인다[8,13,14]. 분얼수와 수당 입수가 유기물질을 공급한 처리구에서 높은 수준을 보였음에도 불구하고, 천립중은 NPK 처리구에서 25 g으로 가장 높게 나타났다(Table 5). 반면, 유기물을 투입한 처리구(NPK+OA, NPK+MFW, OA, MFW)는 22~23 g으로 가장 낮은 값을 보였다. 하지만 벼의 등숙률을 고려한 실제 수량을 환산했을 때, control 처리구에서는 12.7 g으로 가장 낮은 생산량을 보인 반면, 유기물을 투입한 처리구(NPK+OA, NPK+MFW, OA, MFW)는 평균 17.0±1.7 g으로, NPK 처리구에 비해 약 2% 이상 높은 벼 이삭 생산량을 기록했다. 이를 통해 유기물질을 투입한 처리구에서는 추가적인 투입 없이도, 미생물에 의해 유기물이 천천히 분해되면서 지속적으로 양분이 공급되었음을 확인할 수 있다[11,15]. 마지막으로, 수량지수를 이용하여 NPK 대비 벼의 생산성을 평가한 결과, 유기물을 투입한 처리구 중 NPK+OA 처리구를 제외하고는 모두 NPK 처리구 대비 높은 수량을 나타냈다(Table 5). 특히, NPK+MFW처리구에서 수량지수가 138%로 가장 높게 나타났다. 이를 통해 벼 생육 초기의 양분 요구는 무기질 비료를 통해 충족시키고, 이후 지속적인 양분 공급은 음폐 유기질 비료를 활용하는 방법이 벼의 생산성을 극대화하는 데 가장 효과적임을 확인할 수 있었다.

양분이용효율과 양분 용출

작물의 양분이용효율을 알아보기 위해 작물의 지상부(벼짚, 알곡)의 생산량을 측정하였다(Fig. 1). 양분의 투입량이 상대적으로 부족했던 control 처리구와 PK 처리구에서는 벼짚의 생산량이 알곡의 생산량보다 약 13% 높게 나타난다. 이는 알곡은 생식 생장 단계에서 고농도의 양분을 필요로 하지만, 양분이 충분하지 않을 경우 줄기와 잎에 양분이 더 많이 축적되면서 벼짚의 생산량이 상대적으로 증가할 수 있다[16]. 또한, 양분 부족 환경에서는 벼가 탄소를 주로 사용하여 줄기와 잎을 형성하는 경향이 있어, 결과적으로 벼짚의 생산량이 증가하고 알곡의 등숙률이 낮게 형성되었다(Table 5). 이와 반대로, 충분한 양분이 공급된 NPK와 유기물을 투입한 처리구(NPK+OA, NPK+MFW, OA, MFW)에서는 알곡 생산량이 지상부 생산량 대비 약 22% 이상 높게 나타났다(Fig. 2). 특히, 알곡 생산 지수가 가장 높았던 NPK+MFW 처리구에서 알곡 비율은 56%이며, 양분이 효과적으로 알곡 형성에 활용되었음을 보여준다. 이는 양분 공급이 균형 있게 이루어진 결과로, 벼의 알곡 생산성을 극대화하는 데 중요한

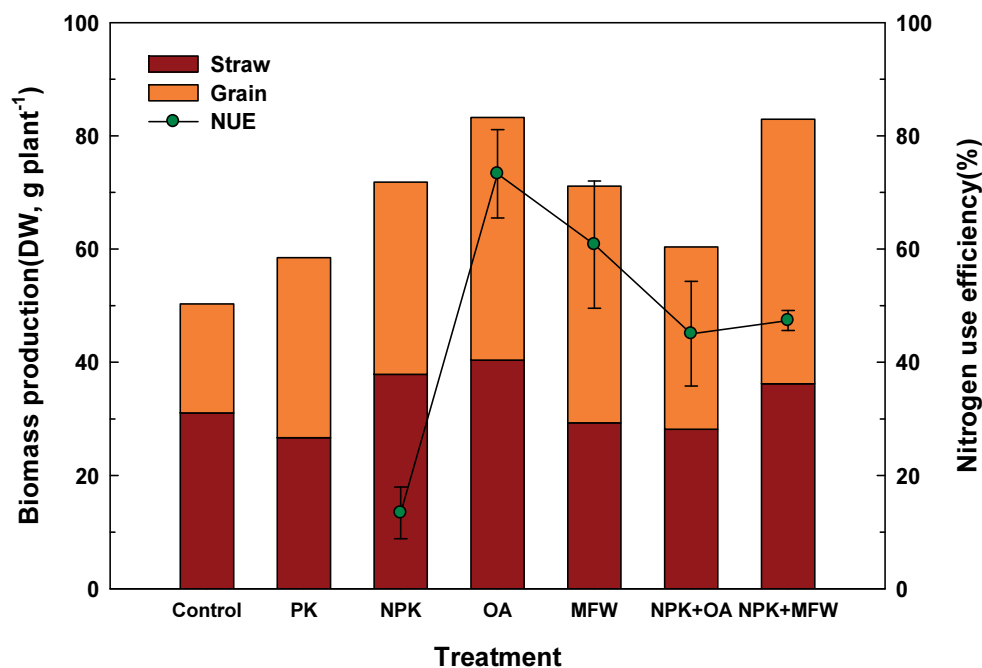


Fig. 1. Total biomass production of rice and nitrogen use efficiency (NUE) with different fertilizer treatments.

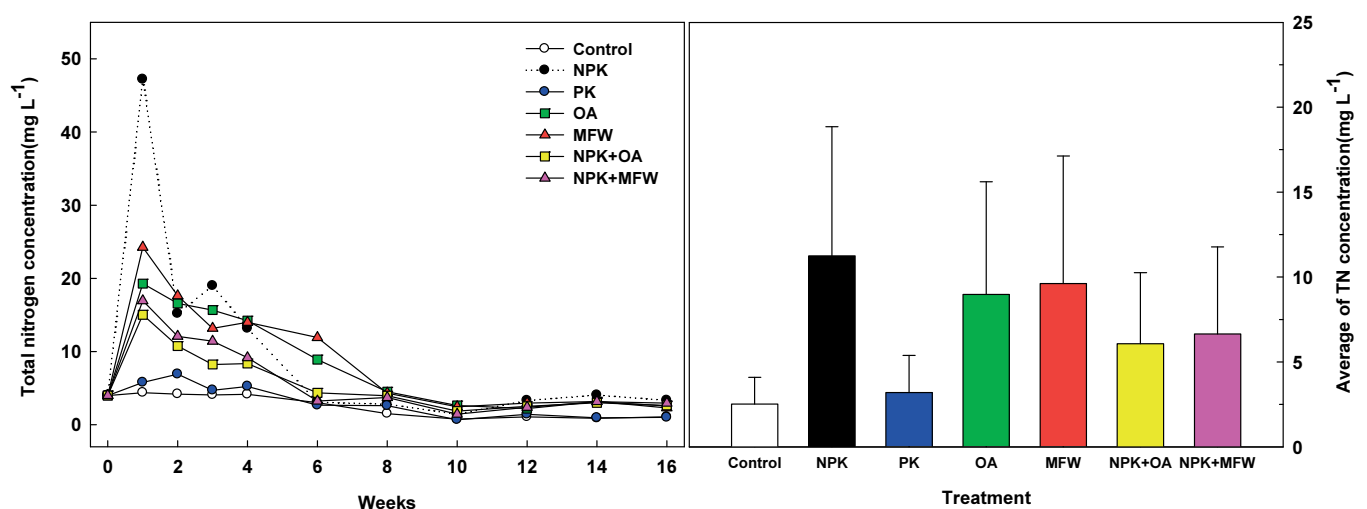


Fig. 2. Changes in total nitrogen (TN) concentration in surface water during rice cultivation.

역할을 했음을 시사한다[11].

질소 이용 효율을 계산하기 위해 양분 처리구와 무처리구 간의 양분 흡수 차이를 활용하였다. 질소를 투입하지 않은 control 처리구와 PK 처리구에서는 질소가 공급되지 않아 질소이용효율을 계산할 수 없었으며, NPK 처리구의 질소 이용 효율은 13.4%이며, 가장 효율이 높았던 OA 처리구의 질소 이용 효율은 73.3%였다(Fig. 1). 또한, 모든 유기물을 투입한 처리구는 NPK 처리구보다 평균 4배 이상 높은 양분 이용 효율을 나타냈다. 이러한 결과는 앞선 결과와 마찬가지로 유기물을 토양에 처리할 경우 무기질 비료와 달리 양분이 점진적으로 방출되어 작물이 생육 단계에 따라 필요로 하는 양분을 지속적으로 흡수할 수 있었기 때문이다. 이와 같은 점진적 방출은 작물의 흡수율을 높이는 데 기여하며, 결과적으로 유기물 처리구에서 더 높은 양분 이용 효율을 보이게 한다[6].

이를 증명하기 위해 포트 표면수 내 질소의 방출량을 시기별로 측정한 결과, 무기질 비료 처리구에서 질소가 투입된 초기 1일차에 47.2 mg L^{-1} 로 가장 높은 질소 방출량을 기록하였다(Fig. 2). 또한, 2차와 3차로 질소가 투입된 13일차와 58일차에도 각각 18 mg L^{-1} 과 3 mg L^{-1} 의 질소가 수질로 방출되었다. 한편, 양분 이용 효율이 높았던 OA 처리구와 MFW 처리구에서도 control 처리구에 비해 약 3.6배 더 높은 평균 질소 함량이 확인되었다. 그러나, NPK+OA와 NPK+MFW 처리구는 다른 유기질 비료 처리구에 비해 수질로 방출된 질소의 평균 농도가 상대적으로 32% 적었으며, 특히 NPK+MFW 처리구는 평균 수질 농도가 약 6.7 mg L^{-1} 로 생산량 대비 가장 낮은 방출량을 나타냈다. NPK+OA 처리구와 NPK+MFW 처리구는 무기태 양분을 투입했음에도 불구하고, NPK 처리구에 비해 훨씬 낮은 질소의 수질 배출을 했을 뿐 아니라 오직 유기물만 넣은 처리구(OA, MFW)에 비해서도 낮은 질소의 손실을 보였다. 이는 혼합된 토양이 입단 구조를 개선하고, 양이온 교환 능력(CEC)을 증가시킴으로써 암모늄(NH_4^+)과 같은 양이온 형태의 질소를 토양에 더 오래 보유할 수 있도록 질소 보유 능력을 향상시켰기 때문이다[17]. 이를 통해, 투입된 무기태 양분은 벼의 초기 생장에 효과적으로 이용되고, 이후 점진적으로 미생물 활성의 증대를 통해 분해된 유기태 양분이 사용되면서 양분 이용 효율이 증진되고 질소의 유출이 감소한 것으로 보인다.

결론

본 연구는 벼 재배 시 음식물류 폐기물과 유기질 비료의 활용 가능성을 평가하고, 무기질 비료 대비 양분 이용 효율과 수질 오염에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 유기질 비료 처리구(OA, NPK+OA)는 control 대비 토양의 pH와 전기전도도(EC)에 유의미한 변화를 나타냈으며, 총 Na^+ 함량과 EC는 정의 상관관계를 보였다. 벼의 생산성은 유기물을 투입한 처리구(OA, MFW, NPK+OA, NPK+MFW)에서 무기질 비료 처리구(NPK)보다 높은 양분 이용 효율과 생산성을 보였으며, 표면수 내 평균 질소 함량은 유기물을 투입한 처리구가 NPK 처리구에 비해 약 30% 낮게 나타났다. 결론적으로, 벼 재배에서 음식물류 폐기물을 활용한 유기질 비료는 양분 이용 효율과 생산성을 향상시키는 동시에 수질 오염을 감소시키는 지속 가능한 농법으로 평가되었다. 그 중에서도, 특히, NPK+MFW 처리구는 NPK 처리구에 비해 355% 높은 양분 이용 효율과 138%의 최고 수량 지수를 기록하였고, 표면수 내 평균 질소 함량은 6.7 mg L^{-1} 로 낮게 나타났다. 따라서 무기질 비료와 음폐 유기질 비료를 혼합 처리하는 방식은 농업 생산성과 환경적 지속 가능성을 동시에 고려한 최적의 재배 전략으로 제안될 수 있다. 본 연구는 음식물류 폐기물의 자원화와 친환경 농업 실현을 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: H.-J. P. Software, Methodology, Formal analysis, Writing – original draft, Software. S.-B.L. Visualization, Conceptualization, Methodology. S.-R.C. Software, Visualization, Conceptualization, Methodology. B.-G.H. Conceptualization, Project administration. N.-H.K. Software, Writing – original draft. J.-G.L. Conceptualization, Writing – review & editing, Software, Formal analysis.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ01516002)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.05>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Jeong-Gu Lee.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Stuart T (2009) Waste: Uncovering the Global Food Scandal, 1-451, WW Norton & Company, New York, NY, USA.
2. Kim NC, Kim DH (2000) Effect of salinity concentration on aerobic composting of food waste. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 8(2), 124-129.
3. Rajeh C, Sapid IP, Kharroubi S, Naalbandian S, Abiad MG (2021) Food loss and food waste recovery as animal feed: A systematic review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01102-6>.
4. Kim KH, Kwon YH, Lee DJ, Kang JK, Sin SK, Son JI (2015) A study on applied device of reduction for decrease of food waste. *Journal of Korea Society of Waste Management*, 32(3), 281-288. <https://doi.org/10.9786/kswm.2015.32.3.281>.
5. Kwon SI, So KH, Hong SG, Kim GY, Lee JT, Seong KS, Kim KR, Lee DB, Jung KY (2009) The effect of continuous application of the food waste composts on the paddy field environment. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 17(3), 55-70.
6. Ryu DB, Jeong YJ, Shim JH, Kim SH, Jeon SH, Lee DW, Yun JJ (2024) Contribution of feed waste-mixed livestock manure pellet compost to soil chemical properties and Kimchi Cabbage (*Brassica rapa* L.) yield. *Journal of Agriculture & Life Science*, 58(5), 41-47. <https://doi.org/10.14397/jals.2024.58.5.41>.
7. Yoo JH, Kim JH, Lee JH, Chun JH, Deogratlu L, Kang YG, Woo HN, Oh TK, Kim SH (2020) Effect of organic fertilizer mixed with dehydrated food waste powder on growth of leaf lettuce. *Korean Journal of Agricultural Science*, 47, 1021-1027. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20200085>.
8. Kwon SI, So KH, Hong SG, Kim GY, Lee JT, Seong KS, Kim KR, Lee DB, Jung KY (2009) The continuous application effect of the food waste composts on the cultivated upland soils and plants. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 17(3), 71-81.
9. Laakso J, Setälä H, Palojarvi A (2000) Influence of decomposer food web structure and nitrogen availability on plant growth. *Plant and Soil*, 225(1-2), 153-165.
10. Zebbarth BJ, Forge TA, Goyer C, Brin LD (2015) Effect of soil acidification on nitrification in soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 95, 359-363. <https://doi.org/10.4141/CJSS-2015-040>.
11. Oh TS, Kim CH (2013) Effect of using organic fertilizer on the growth of rice and soil. *Korean Journal of Crop Science*, 58(1), 36-42. <http://dx.doi.org/10.7740/kjcs.2013.58.1.036>.
12. Kang BG, Kim IM, Kim JJ, Hong SD, Min KB (1997) Chemical characteristics of plastic film house soil in Chungbuk area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 30, 265-271.
13. Mader P, Bach A, Dubois D, Gunst L, Fried P, Niggli U (2002) Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296, 1694-1697. <https://doi.org/10.1126/science.1071148>.
14. Haynes RJ, Naidu R (1998) Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 123-137. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>.
15. Kim SH, Hwang HY, Seo HB, Rim JE, Park SJ, Lee YH, Kim MS (2019) Response of yield and nitrogen use efficiency for garlic on different types and rates of organic fertilizer. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 27(4), 35-42. <https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.4.35>.
16. Liu X, Wang H, Zhou J, Hu F, Zhu D, Chen Z, Liu Y (2016) Effect of N fertilization pattern on rice yield, N use efficiency and fertilizer-N fate in the Yangtze River Basin, China. *PlosOne*, 11(11), e0166002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166002>.
17. Kim SC, Ko BG, Park SJ, Kim MS, Kim SH, Lee CH (2018) Estimation of optimum organic fertilizer application under fertilizer recommendation system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 51(3), 296-305. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.3.296>.