

생분해성 수지로 코팅된 수도용 완효성 비료 시용 시 벼 생육 및 온실가스 발생량 평가

이승하^{1†}, 최재이^{2†}, 권오연¹, 조현종¹, 이종원¹, 최재혁¹, 이주혁¹, 신중두^{2*}

Evaluation of Growth Responses and Greenhouse Gas Emissions with Application of Biodegradable Coating Fertilizer during Rice Cultivation

SeungHa Lee ^{1†}, JaeYee Choi ^{2†}, OhYeon Kwon ¹, HyunJong Cho ¹, JongWon Lee ¹, JaeHyeok Choi ¹, JooHyeok Lee ¹ and JoungDu Shin ^{2*}

¹주식회사 누보 중앙연구소, ²다학박이오택

¹Nousbo Co., Ltd., R&D Center, ²Bio-technology of Multidisciplinary Sciences, Co.

* Correspondence: jdshin61@gmail.com

[†]These authors contributed equally to this work.

Abstract: The non-biodegradable resins are used and increased every year with about 1,103 tonnes of non-biodegradable resins for the production of controlled release fertilizers since 2020. Hence, the objective of this study was to investigate the effect on paddy rice growth and greenhouse gas emissions by application of the controlled release fertilizer coated with a biodegradable polymer. This experiment was conducted in a paddy rice field, a farm affiliated with Seoul National University. The experimental design was the randomized complete block design method (RCBD) with 3 treatments to three replications. The treatment consisted of 1) non-fertilizer, 2) biodegradable coating fertilizer (31-6-8) with 30 kg/10a of application rates, and 3) the conventional farming practice (21-17-17) with 40 kg/10a of application rates. For the growth responses, there were no significant differences in leaf color, plant height, number of tillers, and yield components between the biodegradable polymer coating treatment and the conventional treatment. The cumulative CH₄ and N₂O emissions in the biodegradable coating polymer treatment were 91.25 kg/10a and 150.80 g/10a with 35.9% and 53.9% of mitigation rates, respectively, compared to the conventional treatment. Overall, application of biodegradable coating polymer fertilizer reduced 25% of the fertilized amount and 36.4% of greenhouse gas emissions (CO₂-equiv.) with no reduction of yield during rice cultivation.

Keywords: Biodegradable coating polymer fertilizer, Greenhouse gas emissions, Rice cultivation

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.16>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 152-161

Received: March 17, 2025

Revised: April 7, 2025

Accepted: April 9, 2025

Published: April 18, 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.

서론

비료는 식물에 영양분을 공급하고 작물 수량 증가에 기여하는 중요한 농자재로써 세계적으로 사용량이 기하급수적으로 증가하고 있다[1,2]. 우리나라의 화학비료

사용량(2019년)은 262 kg/ha로 일본 191 kg/ha, 미국 109 kg/ha와 같은 주요 선진국과 비교하여 높은 수준이며 2017년 기준 OECD 회원국 중 질소 수치 1위(212 kg/ha), 인수지(46 kg/ha)가 2위인 나라로 꼽힐 정도로 비료를 많이 시비하는 국가 중 하나이다[3].

비료의 3대 다량원소 중 질소(N)는 식물 생장에 가장 중요하고 필수적인 원소이며, 요소는 46%의 높은 질소함량과 낮은 비용으로 인해 가장 일반적으로 사용되는 질소질 비료이다[4,5]. 하지만 요소는 농경지에 시비하면 일반적으로 30~70%가 암모니아(NH_3) 휘산, 질산태질소(NO_3^-) 용탈과 유거 및 아산화질소(N_2O) 휘발 등을 통해 대부분이 작물에 흡수되지 못하고 유실되며 지하수 오염, 중금속 오염, 부영양화 등의 환경오염뿐만 아니라 비료 이용 효율 감소에 따른 수확량 감소를 초래하기도 한다[6-8].

완효성 비료는 작물의 생육단계에 맞춰 비료 성분이 서서히 용출되어 작물이 양분이 필요할 때 이용할 수 있으므로 비료 이용 효율을 증가시킬 뿐만 아니라 비료 사용량을 줄이고 노동력을 절감할 수 있어 각광받고 있다. 완효성 비료는 용출방법에 따라 미생물이나 화학적 분해로 서서히 용출되는 용출지연비료(Slow release fertilizer, SRF)와 피복물질의 조성 및 구조에 따라 인위적인 비료 양분의 용출이 가능한 용출제어비료(Controlled release fertilizer, CRF)가 있다[9,10]. 합성 SRF에는 세계적으로 상용화되고 있는 Methylene urea (MU), Latex coated urea (LCU) 및 Isobutylidene diurea (IBDU) 등이 있으며 펠릿 형태로서 물에 녹지 않으며, 용출 기간은 토양 수분 및 온도에 따라 달라진다[9]. 용출제어형 비료(CRF)는 Sulphur/Sulphur-polymer, Polymer, Neem, Degradable polymer, Latex, Clay and Gypsum 같은 다양한 피복제가 사용되어왔다[11,12]. 특히 폴리머 코팅은 간단한 메커니즘을 가진 소수성의 코팅 방법으로 비료 용출을 완전하게 제어할 수 있는 것이 장점이지만 대부분 비분해성이고 가격이 높은 것이 단점이다[13]. 폴리머 코팅에 이용되는 일반적인 Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), Polyvinyl Chloride (PVC), Polyethylenep (PE) 등과 같은 범용 석유계 소재 기반의 난분해성 플라스틱 수지는 분해되지 않고 흩날려 2차 환경오염을 유발하는 반면 Polycaprolactone (PCL), Polybutylene succinate (PBS), Polybutylene adipate terephthalate (PBAT)와 같은 석유화학 기반 생분해성 플라스틱 수지와 polylactic acid (PLA), thermoplastic starch (TPS), polyhydroxyalkanoates (PHAs)와 같은 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱 수지는 자연의 박테리아(세균), 곰팡이 효모 등의 생물체에 의해 분해될 수 있고 이를 통해 이산화탄소 혹은 물, 생물 유기자원(Biomass), 무기 염류 등 작은 화학물질 단위로 분해되어 환경오염 저감, 온실가스 배출 저감, 미세플라스틱 감소에 이바지할 것으로 판단된다[14-16].

특히 고분자 화합물인 생분해성 수지를 이용하여 제조된 용출제어형 비료는 일반 관행 비료 대비 농경지로부터 유출되는 비료 성분을 감소시킬 수 있고 온실가스 감축에 기여하고 비점오염 등의 환경오염을 줄일 수 있어 기존 난분해성 수지로 제조된 완효성 비료와 비교하였을 때 친환경적인 특성이 있다[17,18]. 논은 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O) 배출의 주된 농업 근원지로 확인되며 N_2O 배출량은 토양 N_2O 배출량의 7~11%를 차지하고 총 메탄 배출량의 10.5%를 차지한다는 보고가 있다[19], 단위 질량당 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)는 이산화탄소(CO_2)에 비해 각각 28배, 265배에 이를 정도로 지구온난화에 미치는 영향이 훨씬 크다[20,21]. 메탄은 메탄 생성 균에 의해 발생하는데 논과 같은 담수 상태의 환원 조건에서 유기물이 분해되는 과정 중에 발생된다[22,23]. 아산화질소는 주로 휘산 과정에서 발생하며, 주로 밭 토양에서 배출되므로 논에서는 그 양이 상대적으로 적다. 그러나 대기 중에 100년 이상 존재할 수 있기 때문에 N_2O 배출량 감축은 기후변화 완화를 위해 매우 중요하다[24,25].

따라서 본 연구는 난분해성 수지를 대체할 수 있는 생분해성 수지로 코팅된 완효성비료를 벼 재배포장에 시비하여 이에 따른 벼의 생육 영향 및 온실가스 발생량을 구명하고자 수행하였다.

재료 및 방법

생분해성 코팅 비료 공정

(※)누보에서 개발한 생분해성 고분자 화합물을 활용하여 유동층 코팅기를 사용하여 생분해성 코팅 비료를 제조하였다. 유동층 코팅기에 폴리머 용액을 반응기에 넣어 교반하면서 일정액을 코팅기 안으로 분사를 해주면서 공기를 Air pump로 반응기 안쪽으로 불어넣어 코팅기 안에서 비료를 공중에 띄우면서 코팅하였다(Fig. 1). 고분자 화합물로 코팅한 생분해성 코팅 비료(31-6-8, N-P₂O₅-K₂O)의 모양은 Fig. 2에 나타내었다.

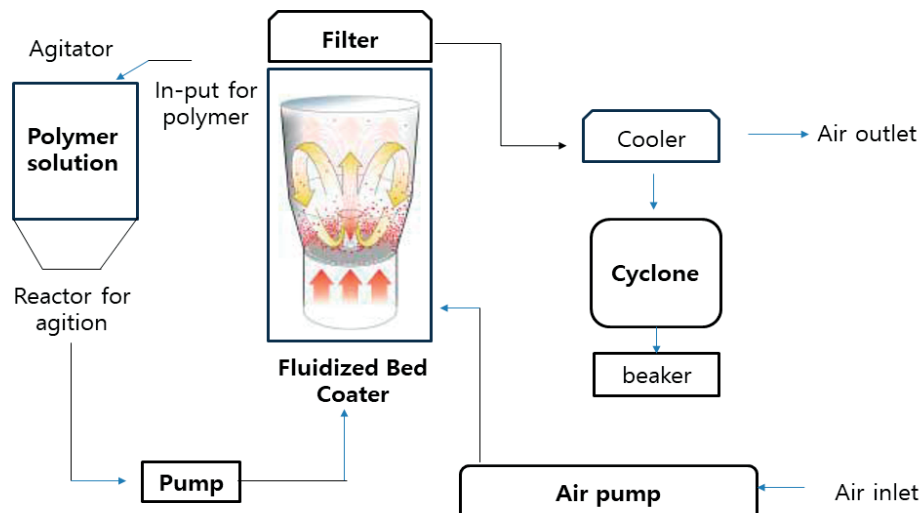


Fig. 1. Design of fluid bed coating system.



Fig. 2. Shape of biodegradable polymer coated fertilizer.

작물 재배

경기도 수원시 소재 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장 내 수도작 시험포장에서 벼 이앙을 하였으며, 품종으로는 농촌진흥청과 수원농협이 공동으로 개발한 수원 지역의 대표 품종인 중만생종의 정다미(*Oryza sativa* L. cv. jungdami)를 공시작물로 이용하였고 시험 전 토양에 대한 화학적 특성을 Table 1에 제시하였다.

이앙 7일 전에 논에 물을 대어 경운 후 씨레질을 실시한 후 40일간 육묘한 묘를 주당 5본씩 재식거리 30 cm × 15 cm로 5월 24일에 기계 이앙하였다. 각각의 시험구는 썬라이트를 설치하여 비료 성분 유출을 방지하였으며, 물 관리는 중간 물떼기 기간을 제외한 기간에는 상시 담수를 하였다. 처리는 1) 무처리구, 2) 관행(대조구), 3) 생분해성 수지 코팅 완효성비료 총 3개의 처리구로 구성하였으며, 처리구의 구당 면적은 21 m²로 난괴법 3반복으로 수행하였다. 생분해성 수지로 코팅된 수도용 완효성비료의 시비량은 9.3-1.8-2.4 kg/10a(N-P₂O₅-K₂O)이며, 이앙일(5/24)에 30 kg/10a를 전량 기비로 축조 시비하였다. 관행구의 비료 사용량은 12.5-6.8-8.4 kg/10a(N-P₂O₅-K₂O)로 일반복합비료(21-17-17)를 40 kg /10a 기준으로 밑거름으로 토양 혼화처리하였으며,

Table 1. Chemical properties of soil used

pH (1:5)	EC (1:1) ds/m	O.M. %	Av. P ₂ O ₅ mg/kg	T-N --%--	Inorganic N		Exchangeable cations			
					mg/kg		-----cmol _c /kg-----			
					NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	K	Ca	Mg	Na
6.32	0.30	2.42	168.91	0.129	112.05	280.20	0.26	4.44	0.67	0.12

추비로서 이앙 2주 후(6/7) 분얼비로 요소(46%)를 5 kg/10a를 표층 시비하였으며 이삭거름(7/24)은 복합비료(18-0-16) 10 kg/10a를 표층 시비하였다.

온실가스 발생량 산정

생분해성 수지 코팅 완효성비료 CH_4 와 N_2O 발생량에 미치는 영향을 구명하기 위해 아크릴 소재의 상향식 온실가스 챔버를 포장에 설치하였다(Fig. 3). 가스채취는 하루 중 온실가스의 평균 농도에 해당하는 오전 10~11시 사이에 1시간 동안 아크릴 챔버 내부의 공기 순환을 위해 소형 팬을 가동하여 가스 시료의 균질한 조건을 유지하였다. 이후 50 ml 시린지를 이용해 채취되었으며, 챔버 체적 변동을 고려하기 위해 챔버 내 온도가 함께 조사되었다. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)의 파리 협정에서 채택한 지구 온도 목표 1.5°C 와 관련된 명확한 증거를 요구하는 SR15 보고서를 채택하였다[26]. 이러한 관점에서 실험 포장에 설치된 온실가스 포집 챔버의 외부 온도에 의한 영향을 최소화해야 하므로 외부 온도에 의한 영향을 최소화하기 위해 상향식 온실가스 포집 챔버를 이용하였다(Fig. 3). 온실가스 포집 장치는 프레임과 포집 챔버로 구성되어 있다. 프레임 상부 중앙에는 도르래가 설치되어 있으며 평상시에는 온실가스 포집 챔버를 지면에서 2m 높이로 올려두었다. 시료 채취 시에는 챔버를 논 표면에 일정 시간 고정된 후 시료를 채취하였으며, 채취된 시료는 온실가스 농도를 분석하기 위해 Gas Chromatography (Agilent 7890B, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 CH_4 및 N_2O 농도를 분석하였으며, 발생한 CH_4 와 N_2O 의 발생량 산정은 아래와 같은 수식을 이용하였다.

$$F = \rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \quad (1)$$

F : CH_4 or N_2O flux ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)

ρ : gas density (mg/L)

V : volume of chamber (m^3)

A : surface area of chamber (m^2)

$\Delta c/\Delta t$: rate of increase of gas concentration ($\mu\text{L}/\text{L}/\text{h}$)

T : absolute temperature ($273 + \text{mean temperature in chamber}$)

작물 생육 조사

벼 생육 상태 변화를 조사하기 위하여 벼 이앙 후(DAT, Day After Transplanting) 31일, 63일, 90일 총 3회에 걸쳐 초장, 엽색도(SPAD-502, Japan), 분얼수를 측정하였고, 이앙 후 140일에 벼 생산성을 파악하기 위해 수량구성요소를 농촌진흥청의 농업과학기술 연구 조사 분석기준에 따라 조사하였다.



Fig. 3. Diagram of gas collection chamber for evaluation of greenhouse gas emissions in rice paddy.

통계분석

통계분석은 R studio를 사용하였으며 모든 데이터는 ANOVA 분석하였으며, 각 처리구간 평균 비교는 유의 수준 5% 기준으로 Duncan 검정하였다.

결과 및 고찰

생분해성 코팅 비료 시용에 따른 벼 생육 및 수량 변화

생분해성 수지로 코팅된 수도용 완효성비료 처리에 따른 초장, 엽색도, 분얼수 등의 벼 생육 Parameters를 나타냈다(Table 2). 생분해성 수지 완효성비료 처리구는 관행 처리구와 비교하여 벼의 전반적인 생육 차이는 없는 것으로 나타났다. 생분해성 수지 완효성비료 처리구의 이앙 후 31일 분얼기에 초장, 엽색도 및 분얼수의 생육 조사 결과 각각 31.8 cm, 41.4, 13.5개로 조사되었다. 이는 관행 대비 각각 7.4%, 1.2%, 2.3%로 생분해성 수지 완효성비료 처리구와 비교하였을 때 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 이앙 후 63일에 초장, 엽색도 및 분얼수 생육 조사 결과 각각 79.1 cm, 36.4, 17.3개로 관행 대비 각각 2.1%, 2.5%, 1.8% 높은 것으로 나타났다. 일반적인 재배포장에서 관행시비방법(전층시비)은 질소 이용 효율이 20~30% 범위로 알려져 있으며 질소는 쌀의 성장에 영향을 주는 가장 중요한 양분이다[27]. 생분해성 수지 완효성비료 처리구 또한 영양생장 기간에 지속적으로 양분이 용출되어 관행 대비 생육은 차이가 없는 것으로 판단된다. 출수기 이후인 이앙 후 90일에 생분해성 수지 완효성비료 처리구는 초장과 분얼수는 관행 대비 차이가 없었으나 엽색도의 경우 관행 대비 3.6% 낮은 것으로 나타났다. 이는 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서 비료 성분이 영양생장기까지 지속적인 용출로 엽색도가 유지되었으며 생식생장기 이후에 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 잎의 엽록소 함량은 작물의 성장과 발달에 영향을 미치며 벼에서 SPAD 값이 높아짐에 따라 광합성 능력과 관련된 Rubisco 효소의 함량, Gross photosynthetic rate, Maximum quantum yield of PSII (Fv/Fm) 모두 증가하는 보고가 있으며[28], 엽록소 함량과 광합성 능력 사이에는 밀접한 연관성이 존재한다. 전반적인 벼의 생육 비교 시 생분해성 수지 완효성비료 처리구는 기존 관행 대비 생육 차이가 없으며 밀거름 1회 시비하여 작물을 안정적으로 재배할 수 있다고 판단된다. 현재 이삭거름을 많이 시비하는 엽채류와 잔디 등 다양하게 실험이 이루어지고 있으며[29,30], 관행 시비와 비교해 양분흡수율과 수량 또한 양호하여 추비 시용에 따른 노력을 절감할 수 있을 것으로 보인다.

생분해성 수지로 코팅된 수도용 완효성비료 처리에 따른 벼 수량구성 요소로서 이삭장, 간장, 주당 이삭수, 이삭당 립수, 등숙률, 천립중, 조곡 수량을 조사하여 나타냈다(Table 3). 관행 처리구와 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서 벼의 이삭장과 주당 이삭수는 무처리 대비 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 생분해성 수지 완효성비료 처리구는 간장, 주당 이삭수, 천립중은 각각 85.4 cm, 16.9개, 27.4 g으로 관행 대비 차이가 없었으나 등숙률이 85.6%로 관행 대비 통계적으로 유의한 차이를 보였다.

벼 수량은 수량구성요소인 개체당 이삭수, 이삭당 립수, 등숙률, 천립중에 의해 정해지는데 수확량을 높이기 위해서는 이들 요소가 모두 높게 유지되도록 하는 것이 중요하다. 본 연구에서 대조구인 관행은 총질소 12.5 kg를 시비하였고 생분해성 수지 완효성비료 처리구는 총질소 9.3 kg를 사용함으로써 비료 사용량을 34.4%를 절감하였다. 총 질소 사용량이 줄었음에도 생분해성

Table 2. Effects of rice growth characteristics to biodegradable coating fertilizer during rice cultivation

Treatments	Plant height (cm)			SPAD value			Tiller numbers		
	DAT 31	DAT 63	DAT 90	DAT 31	DAT 63	DAT 90	DAT 31	DAT 63	DAT 90
Non-fertilizer	27.4±1.60c ^{a)}	67.8±2.51b	91.4±2.35b	31.8±2.33b	32±2.07b	29.6±2.04c	7.4±0.62b	12.5±0.69b	12.8±0.74b
Conventional treatment	29.6±2.06b	77.5±2.57a	102.8±3.49a	40.9±2.11a	35.5±1.75a	33.3±1.83a	13.2±1.01a	17.0±1.04a	19.1±0.91a
Biodegradable coating fertilizer	31.8±2.04a	79.1±2.83a	102.8±3.06a	41.4±2.65a	36.4±1.95a	32.1±1.50b	13.5±0.95a	17.3±1.17a	19.1±0.66a
CV	6.27	4.70	3.43	5.76	7.86	6.28	9.44	9.51	6.15
Significance	***b)	***	***	***	***	***	***	***	***

^{a)} Numbers with the same letter within a column are not significantly differed(Duncan's test, ±SD),

^{b)} ns, *, **, ***: non significant or significant at $p=0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

Table 3. Effects of the yield components of biodegradable coating fertilizer during rice cultivation

Treatments	Panicle length (cm)	Culm length (cm)	No. of panicle per hill	No. of spikelets per panicle	Ripened grain ratio (%)	1000 grain weight (g)	Unhulled rice yield (kg/10a)	Index
Non-fertilizer	19.1±3.82a ^{a)}	66.7±0.42b	11.9±1.10b	98.1±10.62a	83.4±0.91c	25.7±0.70b	523.7±70.62b	64
Conventional treatment	19.7±1.48a	85.4±0.94a	17.2±1.29a	101.9±11.98a	85.0±0.29b	27.3±1.22a	839.2±43.97a	100
Biodegradable coating fertilizer	19.6±1.54a	85.4±0.96a	16.9±0.66a	101.7±6.79a	85.6±0.29a	27.4±1.12a	842.3±41.74a	101
CV	4.76	3.24	6.63	9.95	0.66	5.57	7.62	
Significance	ns ^{b)}	***	***	nf	***	*	***	

a) Numbers with the same letter within a column are not significantly differed (Duncan's test, ±SD),

b) ns, *, **, ***: non significant or significant at $p=0.05$, 0.01 , and 0.001 , respectively.

수지 완효성비료 처리구와 관행은 수량의 차이가 없었으며, 질소소비량은 높지만 질소 이용 효율성이 낮은 관행구에서 수량이 낮았다. 또한 생분해성 완효성비료 처리구의 조곡 수량은 10a당 842.3 kg로 관행 839.2 kg 대비 큰 차이가 없고 정상적인 수량구성 요소를 형성하는 것으로 보아 안정적인 재배가 가능한 것으로 판단된다. 반면 무처리구의 경우 벼 재배 시 질소가 부족하여 생육이 불량해지고 수량이 감소하였다. 특히 재배기간 관행과 생분해성수지 완효성비료 처리구는 질소 과다 시비에 따른 병해충과 도복 발생은 없었으며 심복백미와 동할미 또한 적었다[31]. 이를 통해 최근 국내에서 활발히 전개 중인 드문 모심기와 같은 벼의 재배면적 조정과 질소비료 사용량을 줄여 적정 시비를 통한 쌀 품질 향상 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다[32,33].

생분해성 코팅 비료 시용에 따른 메탄(CH₄) 배출량 변화

생분해성 수지 완효성비료 처리구와 관행 처리구의 CH₄ 배출량 변화는 Fig. 4와 같다. 메탄 발생량 분석 기간 중 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서의 일일 최대 1256.8 mg/m²/days, 최소 135.5 mg/m²/days, 평균 548.9 mg/m²/days의 CH₄ 배출량이 발생하였다. 관행 처리구에서는 최대 2039.3 mg/m²/days, 최소 155.7 mg/m²/days, 평균 917.9 mg/m²/days의 CH₄ 배출량이 발생하였다. 관행 처리구의 경우 이앙 후 7일, 35일, 70일에 급격히 배출량이 증가하였다.

벼 생육과 메탄 배출량 간 밀접한 관계가 있는 것으로 보고된 바 있다[34]. 최대 누적 CH₄ 발생량은 관행 처리구에서 142.25 kg/10a로 가장 많이 발생하였으며, 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서 91.25 kg/10a로 관행구와 비교하여 35.9%의 완화 효과를 보였다. 관행 처리구와 생분해성 수지 완효성비료 처리구 간의 누적 메탄 발생량 차이는 이앙 후 7일부터 차이가 나기 시작하여 이앙 후 14일, 이앙 후 60일에 차이가 더욱 뚜렷했다. 관행 처리구와 생분해성 수지 완효성비료 처리구의 시비 간 CH₄ 발생 차이는 미생물 활성 변화로 유기물 분해 차이가 나서 나타난 것으로 판단된다.

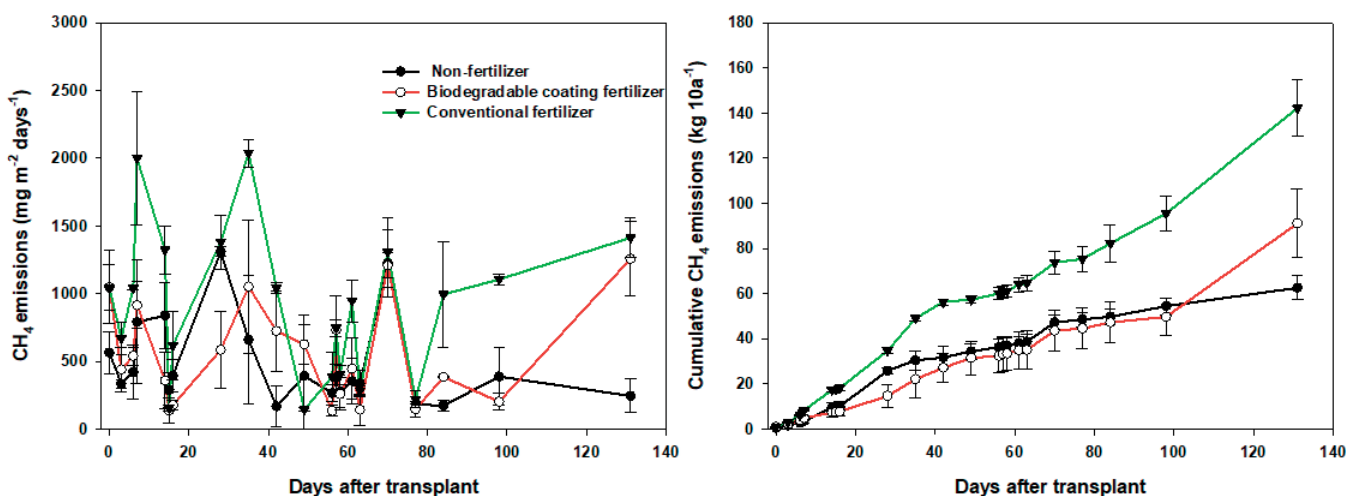


Fig. 4. Effects of CH₄ emissions to application of biodegradable coating fertilizer during rice cultivation.

생분해성 코팅 비료 시용에 따른 아산화질소(N_2O) 배출량 변화

생분해성 수지 완효성 비료 처리구와 관행 처리구의 N_2O 배출량 변화는 Fig. 5와 같다. N_2O 분석 기간 중 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서의 일일 최대 $3.17 \text{ mg/m}^2/\text{days}$ 최소 $0.51 \text{ mg/m}^2/\text{days}$ 평균 $1.18 \text{ mg/m}^2/\text{days}$ 의 N_2O 배출량이 발생하였다. 관행 처리구에서는 최대 $3.93 \text{ mg/m}^2/\text{days}$ 최소 $0.72 \text{ mg/m}^2/\text{days}$ 평균 $1.87 \text{ mg/m}^2/\text{days}$ 의 N_2O 가 발생하였다. 관행 처리구의 경우 이앙 후 7일, 14일, 60일에 급격히 배출량이 증가하였으며 이는 밀거름, 분얼비, 이삭거름 시비 후 작물이 성장 단계에서 질소를 더 이상 필요로 하지 않을 때, 추가적인 질소 시비 및 거름을 시비하는 등 이로 인해 질소가 토양에 남게 되고 남은 질소는 산화와 휘산 과정을 거쳐 아산화질소를 많이 발생시킨 요인으로 판단된다. 최대 누적 N_2O 발생량은 관행 처리구에서 326.97 g/10a 로 가장 많이 발생하였으며, 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서 150.80 g/10a 로 관행 처리구와 비교하여 53.9%의 완화 효과를 보였다. 이앙 후 15일부터 누적 N_2O 발생량 차이가 나타났으며, 이앙 후 60일에 관행 처리구와 생분해성 수지 완효성비료 처리구 사이에 N_2O 발생량 차이가 뚜렷이 나타났으며 이후 비슷한 경향이었다. 일반적으로, 토양에서 N_2O 는 산화조건에서 탈질 과정과 질산화 과정을 통해 배출되는 것으로 알려져 있으며 미생물 활동의 부산물 분해가 일어나므로 N_2O 배출량에 있어서 토양 온도 및 수분함량은 중요한 영향을 주는 것으로 알려져 있다[35]. 완효성비료는 질소 용출을 통제함으로써 무기화 및 질산화 과정을 느리게 함으로써 아산화질소 발생을 줄여줌으로써 친환경적인 비료로 활용할 수 있음을 보여준다.

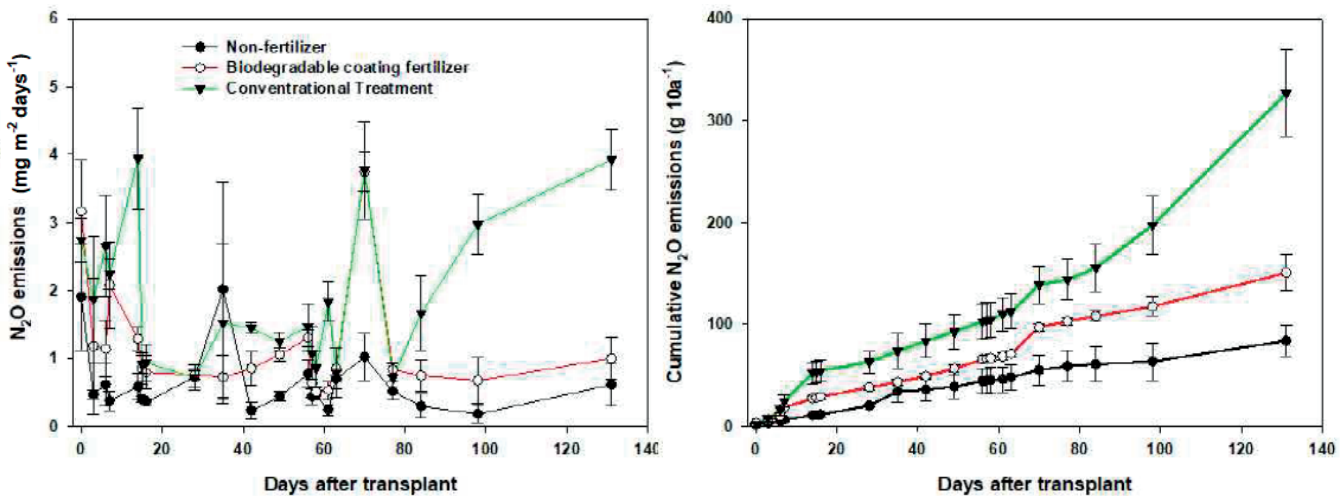


Fig. 5. Effects of N_2O emissions to application of biodegradable coating fertilizer during rice cultivation.

생분해성 코팅 비료 시용에 따른 온실가스 발생량 비교

총 온실가스 발생량($CO_2\text{-equiv.}$)은 관행 처리구에서 3.96 t/10a 로 생분해성 코팅 비료 처리구와 비교하여 36.4% 저감된 2.52 t/10a 가 발생되었다. 더 나아가서 벼 재배에 따른 비료 시용에 따른 온실가스 총 발생량은 관행구와 생분해성 코팅 비료 처리구에서 각각 2.2 와 0.7 t/10a 가 발생하는 것으로 산정되었다(Table 4). 이는 관행에서 사용했던 속효성인 요소 비료는 논 토양에 사용한 직후 대부분 식물이 흡수하지 못하고 미생물이 이용하거나 아산화질소 배출을 증가시켜 온실가스 배출량을 높인다[36,37]. 반면 완효성비료는 비료 용출 기간이 상대적으로 길고 질소 성분의 유실과 휘산을 경감시켜 토양 외부 환경으로 유실되어 나타나는

Table 4. Estimation of greenhouse gas emissions ($CO_2\text{-equiv.}$) to application of biodegradable coating fertilizer during rice cultivation

Treatments	Cumulative CH_4 emissions (kg/10a)	Cumulative N_2O emissions (g/10a)	$CO_2\text{-equiv.}$ (t/10a)
Non-fertilizer	62.60	83.89	1.73
Biodegradable coating fertilizer	91.25	150.80	2.52
Conventional treatment	142.25	326.97	3.96

부작용을 줄일 수 있다[37-39]. 또한 벼 뿌리가 발달되어 뿌리를 통한 산소공급으로 질소 산화량이 증가함에 따라 작기 중 총 메탄 배출량이 감소하는 등 온실가스 배출을 저감하는 효과가 있다고 보고되나[40-43], 이와 관련된 실험은 아직 미미하므로 전 세계적으로 추가적인 실험이 요구되는 실정이다.

결론

본 연구의 목적은 생분해성 수지 완효성비료를 벼에 시용하였을 때 벼 생육 및 온실가스 발생량의 변화를 알아보기 위해 수행되었다. 생분해성 수지로 코팅된 수도용 완효성비료 처리에 따른 초장, 엽색도, 분얼수는 관행구와 비교하여 차이는 없는 것으로 조사되었다. 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서 수량구성요소인 간장, 주당 이삭수, 천립중은 각각 85.4 cm, 16.9개, 27.4 g으로 관행구와 비교하여 유의차가 인정되지 않았으나, 등숙율이 85.6%로 관행 대비 높았다. 생분해성 완효성 처리구의 조곡 수량은 10a당 842.3 kg로 관행구의 839.2 kg 대비 차이가 없었다.

최대 누적 CH_4 발생량은 관행 처리구에서 142.25 kg/10a로 가장 많이 발생하였으며, 생분해성 수지 완효성비료 처리구에서 91.25 kg/10a로 관행구와 비교하여 35.9%의 완화 효과가 나타났다. 최대 누적 N_2O 발생량은 관행구에서 326.97 g/10a로 가장 많이 발생하였으며, 생분해성 코팅 비료 처리구에서 150.80 g/10a로 관행구와 비교하여 53.9%의 완화 효과가 나타났다. 종합적으로 생분해성 코팅 요소 처리구의 온실가스 발생량($\text{CO}_2\text{-equiv.}$)은 관행구에 비해 36.4%의 완화 효과를 보였다. 따라서 본 연구를 통해 생분해성 수지로 코팅된 수도용 완효성비료가 관행 처리구와 비교하여 벼 생육 및 수량은 유사하지만, 비료 시용량을 25% 줄이고 온실가스 발생량을 36.4% 완화시켜 친환경 비료로 사용할 수 있다고 판단된다. 현재 환경농업 분야의 온실가스 배출량과 생분해성 수지로 코팅된 완효성 비료에 대한 복합 연구는 미미하다. 따라서 수도작뿐만 아니라 다양한 작물에 적용하여 온실가스와의 상관관계를 파악하는 추가적인 실험이 필요하다고 생각된다.

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

Author Contributions: S.H.L, J.Y.C and J.D.S wrote the manuscript, O.Y.K, H.J.C and J.D.S oversaw the project, J.W.L, J.H.C and J.H.L collected data.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of “Development of eco-friendly biodegradable controlled release fertilizer(Project No. PJ017114)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.16>

Correspondence and requests for materials should be addressed to JoungDu Shin.

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. Joshi SK, Gauraha AK (2022) Global biofertilizer market: Emerging trends and opportunities. Trends of Applied Microbiology for Sustainable Economy, 689-697. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91595-3.00024-0>.
2. Falcon WP, Rosamond L, Naylor, Nikhil D, Shankar ND (2022) Rethinking global food demand for 2050. Wiley Online Library, 48(4), 921-957. <https://doi.org/10.1111/padr.12508>.

3. Lim JY, Bhuiyan MS, Lee SB, Lee JG, Kim PJ (2021) Agricultural nitrogen and phosphorus balances of Korea and Japan: Highest nutrient surplus among OECD member. *Environmental Pollution*, 286, 117353. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117353>.
4. Mirbolook A, Sadaghiani MR, Keshavarz P, Alikhani M (2023) New slow-release urea fertilizer fortified with zinc for improving zinc availability and nitrogen use efficiency in maize. *ACS Omega*, 8(48), 45715-45728. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06013>.
5. Versino F, Urriza M, García MA (2019) Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134, 302-307. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.037>.
6. Gil-Ortiz R, Naranjo MÁ, Ruiz-Navarro A, Atores S, García C, Zotarelli L, Bautista AS, Vicente O (2020) Enhanced agronomic efficiency using a new controlled-released, polymeric-coated nitrogen fertilizer in rice. *Plants*, 9(9), 1183. <https://doi.org/10.3390/plants9091183>.
7. Messiga AJ, Dyck K, Ronda K, van Baar K, Haak D, Yu S, Dorais M (2020) Nutrients leaching in response to long-term fertigation and broadcast nitrogen in blueberry production. *Plants*, 9(11), 1530. <https://doi.org/10.3390/plants9111530>.
8. Gulmali PB, Aslan HS (2024) Influence mechanism urea on water structure. *Scientific Collection InterConf*, 203, 321-322.
9. Firmanda A, Fahma F, Syamsu K, Mahardika M, Suryanegara L, Munif A, Gozan M, Wood K, Hidayat R, et al. (2024) Biopolymer-based slow/controlled-release fertilizer (SRF/CRF): Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112177. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112177>.
10. Li X, Li Z (2024) Global trends and current advances in slow/controlled-release fertilizers: A bibliometric analysis from 1990 to 2023. *Agriculture*, 14(9), 1502. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091502>.
11. Govil S, Long NVD, Escriba-Gelonch M, Hessel V (2024) Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Industrial Crops and Products*, 219, 119160. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119160>.
12. Mendonca Cidreira AC, Wei L, Aldekhail A, Islam Rubel R (2025) Controlled-release nitrogen fertilizers: A review on bio-based and smart coating materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 142.3, e56390. <https://doi.org/10.1002/app.56390>.
13. Kassem I, Ablouh E, El Bouchtaoui F, Jaouahar M, El Achaby M (2024) Polymer coated slow/controlled release granular fertilizers: Fundamentals and research trends. *Progress in Materials Science*, 144, 101269. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101269>.
14. Oh DY (2022) Trends in biodegradable bioplastic materials and applications. *The monthly packaging world*, 356, 48-63.
15. Nizamuddin S, Baloch AJ, Chen C, Arif M, Mubarak NM (2024) Bio-based plastics, biodegradable plastics, and compostable plastics: Biodegradation mechanism, biodegradability standards and environmental stratagem. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 195, 105887. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105887>.
16. Rasheed T, Vattathuralappil SH, Shaikat MM, Theravalappil R, Ali U, Ummer AC, Bin Saleem MT, Jaseer EA, Imran M (2024) Recent updates on biodegradability and recyclability of bioplastics-towards a new era in sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, 41, e01051. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01051>.
17. Moon TI, Lee JH, Ku HH (2024) Characteristics of slow-and controlled-release fertilizers and their agronomic and environmental effects: A short review. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, 57(4), 440-454. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2024.57.4.440>.
18. Choi JY, Shin JD, Cho HJ, Chung WJ, Lee SB, Yun SI (2024) Effects of biodegradable polymer coating urea to nitrogen release in the soil column. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 2(1), 49-59. <https://doi.org/10.17137/korrae.2024.32.1.49>.
19. Liu HJ, Guo Z, Zhang LP, Zhu XL, Sun GF, Chen LG, Zheng JC (2014) Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH₄ and N₂O emissions in paddy season. *Environmental Science & Ecotechnology*, 25, 808-814.
20. Costa C, Wironen M, Racette K, Wollenberg EK (2021) Global warming potential*(GWP*): Understanding the implications for mitigating methane emissions in agriculture. *Agriculture and Food Security (CCAFS) Info notes*.
21. Akiyama H (2024) Methane and nitrous oxide emissions from agricultural fields in japan and mitigation options: A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(2), 79-87. <https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2298782>.
22. Grohs M, Giacomini SJ, da Rosa CA, Neu GRF, Dorneles AB, Lüdtkke FL, Mc Mannis GS (2024) Seasonal and annual methane and nitrous oxide emissions affected by tillage and cover crops in flood-irrigated rice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 359, 108747. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108747>.
23. Kaur M, Dheri GS, Brar AS, Kalia A (2024) Methane and nitrous oxide emissions in rice fields influenced with duration of cultivars and irrigation regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 365, 108923. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108923>.
24. Deng N, Wang H, Hu S, Jiao J (2019) Effects of afforestation restoration on soil potential N₂O emission and denitrifying bacteria after farmland abandonment in the Chinese Loess Plateau. *Frontiers in microbiology*, 10, 262. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00262>.
25. Yan Y, Ryu Y, Li B, Dechant B, Zaheer SA, Kang M (2024) A multi-objective optimization approach to simultaneously halve water consumption, CH₄, and N₂O emissions while maintaining rice yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 344, 109785. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109785>.
26. Hermansen EA, Lahn B, Sundqvist G, Øye E (2021) Post-Paris policy relevance: lessons from the IPCC SR15 process. *Climatic Change*, 169, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03210-0>.
27. Qiu H, Yang S, Jiang Z, Xu Y, Jiao X (2022) Effect of irrigation and fertilizer management on rice yield and nitrogen loss: A meta-analysis. *Plants*, 11(13), 1690. <https://doi.org/10.3390/plants11131690>.
28. Huang J, Peng S (2004) Comparison and standardization among chlorophyll meters in their readings on rice leaves. *Plant Production*

- Science, 7(1), 97-100. <https://doi.org/10.1626/ppp.7.97>.
29. Kim YS, Lee CE, Lee GJ (2021) Nitrogen efficiency and shoot growth of creeping bentgrass after application of slow release nitrogen fertilizer. *Weed & Turfgrass Science*, 10(2), 155-162. <https://doi.org/10.5660/WTS.2021.10.2.155>.
 30. Lee JY, Kang YG, Kim JH, Oh TK, Yun YU (2023) Effects of nutrient-coated biochar amendments on the growth and elemental composition of leafy vegetables. *Korean Journal of Agricultural Science*. 50(4), 967-976. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500430>.
 31. Kim TH, Kim SM (2023) Effects of nitrogen application levels on grain yield and yield-related traits of rice genetic resources. *Korean Journal of Crop Science*, 68(4), 276-284. <https://doi.org/10.7740/kjcs.2023.68.4.276>.
 32. Hwang WH, Lee HS, Yang SY, Lee CG (2023) Change in yield characteristics by transplanting density in major cultivated rice. *Korean Journal of Crop Science*, 68(1), 1-7. <https://doi.org/10.7740/kjcs.2023.68.1.001>.
 33. Ma S, Wang G, Su S, Lu J, Ren T, Cong R, Lu Z, Zhang Y, Liao S, et al. (2023) Effects of optimized nitrogen fertilizer management on the yield, nitrogen uptake, and ammonia volatilization of direct-seeded rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103.9, 4553-4561. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12530>.
 34. Qian H, Zhu X, Huang S, Linquist B, Kuzyakov Y, Wassmann R, Minamikawa K, Martinez-Eixarch M, XiYan X, et al. (2023) Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(10), 716-732. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00482-1>.
 35. Ariani M, Setyanto P, Wihardjaka A (2021) Water filled-pore space and soil temperature related to N₂O fluxes from shallot cultivated in rainy and dry season. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 648(1), 012109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012109>.
 36. Heredia-Velásquez AM, Sarkar S, Thomas FW, Baza AC, Garcia-Pichel F (2025) Urea-based mutualistic transfer of nitrogen in biological soil crusts. *The ISME Journal*, 19(1), wrac246. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae246>.
 37. Lu J, Cheng M, Zhao C, Li B, Peng H, Zhang Y, Shao Q, Hassan M (2022) Application of lignin in preparation of slow-release fertilizer: Current status and future perspectives. *Industrial Crops and Products*, 176, 114267. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114267>.
 38. Sentek V, Velescu A, Wilcke W, Henke C, Peters N, Welp G, Amelung W (2023) Nitrogen release from different polymer-coated urea fertilizers in soil is affected by soil properties. *Soil Use and Management*, 39(4), 1477-1490. <https://doi.org/10.1111/sum.12905>.
 39. Yang M, Zhu X, Bai Y, Sun D, Zou H, Fang Y, Zhang Y (2021) Coated controlled-release urea creates a win-win scenario for producing more staple grains and resolving N loss dilemma worldwide. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125660>.
 40. Li G, Fu P, Cheng G, Lu W, Lu D (2022) Delaying application time of slow-release fertilizer increases soil rhizosphere nitrogen content, root activity, and grain yield of spring maize. *The Crop Journal*, 10(6), 1798-1806. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.04.014>.
 41. Ding Z, Li J, Hu R, Xiao D, Huang F, Peng S, Huang J, Li C, Hou J, et al. (2022) Root-zone fertilization of controlled-release urea reduces nitrous oxide emissions and ammonia volatilization under two irrigation practices in a ratoon rice field. *Field Crops Research*, 287, 108673. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108673>.
 42. Kang Z, Xu F, Lu H, Zhong Z, Zhang L, Li S (2025) Effects of slow-release nitrogen fertilizer reduction substitution on rice yield and greenhouse gas emissions in paddy field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 33(9), 1-11. <https://doi.org/10.12357/cjea.20240802>.
 43. Gwon HS, Choi EJ, Lee SI, Lee HS, Park HR, Lee JM, Jin JH (2022) Greenhouse gases emission from rice paddy under different tillage intensity during fallow season. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 55(4), 464-475. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.4.464>.