

# 어분 혼합 산도 조절 바이오차 펠릿 사용에 따른 토양 무기화 패턴 및 온실가스 발생량 비교

남주희<sup>a</sup>, 김민정<sup>b</sup>, 심창기<sup>c</sup>, 박상원<sup>d</sup>, 홍승길<sup>e</sup>, 주옥정<sup>f</sup>, 안난희<sup>g</sup>, 최재이<sup>h</sup>, 윤석인<sup>i</sup>, 신중두<sup>†</sup>

## Mineralized Patterns of Plant Nutrient and Greenhouse Gas Emissions in Soil Incorporated with Acidified Biochar Pellets with Fish Powder

Joo Hee Nam<sup>a</sup>, Min Jeong Kim<sup>b</sup>, Chang Ki Shim<sup>c</sup>, SangWon Park<sup>d</sup>, Seonggil Hong<sup>e</sup>,  
OkJung Ju<sup>f</sup>, NanHee An<sup>g</sup>, JaeYee Choi<sup>h</sup>, Seok-In Yun<sup>i</sup>, Jung-Du Shin<sup>†</sup>

(Received: Aug. 19, 2024 / Revised: Oct. 04, 2024 / Accepted: Oct. 14, 2024)

**ABSTRACT:** This experiment was conducted to investigate the effects of mineralization patterns of plant major nutrients, greenhouse gas emissions, and plant growth responses in the Kimchi cabbage cultivated field incorporated with acidified biochar pellets with mixed dry fish powder. The treatments consisted of 1) Control; recommended application amounts of fertilizers (32-7.8-19.8 kg 10a<sup>-1</sup>), 2) RBFP; acidified rice hull biochar fertilizer pellet incorporated with dry fish powder, and 3) PBFP; acidified poultry biochar fertilizer pellet incorporated with dry fish powder. Mineralized cumulated NH<sub>4</sub>-N concentration in the RBFP decreased at 14.2%, but the cumulated NO<sub>3</sub>-N concentration enhanced at 52.5% compared to the control. In addition, the cumulated P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentration was not significantly different (p<0.05) between the control and RBFP. The mineralized patterns of cumulative NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N were significantly fitted well (R<sup>2</sup>>0.917) for sigmoid curves. The cumulative mineralized P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentration in the PBFP was decreased at 2.8% compared to the control. Also, the cumulative mineralized K concentration in the RBFP increased at 5.4 folder than the control. However, the mineralized patterns for the cumulative P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K concentrations were significantly fitted well (R<sup>2</sup>>0.983) for linear types. The cumulative CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O gas emissions in the RBFP mitigated by 14.4% and 54.6%, respectively, compared to the control. The highest yield was observed in the RBFP and PBFP. Therefore, it is strongly recommended that the RBFP is applied to mitigate the greenhouse gas emissions, enhancing the yield for the organic farming practice of Kimchi cabbage cultivation.

- <sup>a</sup> 경기도농업기술원 친환경미생물연구소 연구사 (Researcher, Environment-Friendly Microorganism Research Institute, Gyeonggi-Do Agricultural Research and Extension Service)  
<sup>b</sup> 국립농업과학원 유기농업과 박사후연구원 (Post-Doctor, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences)  
<sup>c</sup> 국립농업과학원 기술지원팀 연구관 (Senior Researcher, Technology Services, National Institute of Agricultural Sciences)  
<sup>d</sup> 농촌진흥청 연구개발과 연구관 (Senior Researcher, R&D Planning Division, Research Policy Bureau, Rural Development Administration)  
<sup>e</sup> 국립농업과학원 기후변화생태과 연구관 (Senior Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences)  
<sup>f</sup> 경기도농업기술원 연구사 (Researcher, Gyeonggi-Do Agricultural Research and Extension Service)  
<sup>g</sup> 국립농업과학원 유기농업과 연구관 (Senior Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences)  
<sup>h</sup> 다학바이오택 연구원 (Researcher, Bio-technology of Multidisciplinary Sciences, Co.)  
<sup>i</sup> 원광대학교 생명환경학과 교수 (Professor, Department of Life and Environmental Sciences, Wonkwang University)  
<sup>j</sup> 다학바이오택 대표 (CEO, Bio-technology of Multidisciplinary Sciences, Co.)

† Corresponding author(e-mail: jdshin61@gmail.com)

**Keywords:** Kimchi cabbage, mineralized patterns of plant nutrients, greenhouse gas emissions

**초 록:** 본 연구의 목적은 배추 재배 시 어분을 혼합한 산 처리된 계분과 왕겨 바이오차 펠릿 처리 후 토양 중의 주요 양분의 무기화 패턴, 식물 생육 반응 및 온실가스 발생량의 변화를 분석하고자 하였다. 계분 바이오차와 왕겨 바이오차를 0.4M Citric acid를 처리한 후, 어분과 4:6로 혼합하여 산도를 pH 6.0-6.5사이로 조절한 다음 펠릿화 하였다. 시험구 처리는 화학비료 처리구를 대조구(Control)로 하였으며, 어분을 혼합하여 산 처리된 계분 바이오차(PBFP) 및 왕겨 바이오차 펠릿(RBFP)처리구로 구성되어 있다. 연구 결과로서, 산도를 조절한 왕겨 바이오차 펠릿 처리구는 토양에서 RBFP 처리구의 양분 누적 무기화는 대조구에 비해  $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 14.2% 줄어든 반면,  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 52.5%가 높게 무기화가 발생되었으며,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 의 누적 농도는 대조구와 RBFP 처리구 사이에 유의차가 없었다. 또한 누적  $\text{NH}_4\text{-N}$  및  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도에 대한 무기화 패턴은 작물 생육 모형인 Sigmoid curves에 적합한( $P < 0.001$ ) 것으로 나타났다. 누적  $\text{P}_2\text{O}_5$  및 K 농도의 무기화 패턴은 Linear types으로 판단되었다. 또한 온실가스 발생량 측면에서, 대조구와 비교하여 RBFP 처리구의 누적  $\text{CH}_4$  및  $\text{N}_2\text{O}$  발생량은 각각 14.4%와 54.6% 완화된 것으로 나타났다. 본 연구결과를 바탕으로 유기농 배추 재배 시, 온실가스 발생량 저감을 위해 어분을 혼합한 산도 조절된 왕겨 바이오차 펠릿 사용이 적절한 것으로 판단된다.

**주제어:** 김치 배추, 식물 양분 용출 패턴, 온실가스 발생량

## 1. 서 언

화학비료의 사용은 사람들의 식습관 변화로 채소 소비가 증가하여 채소 생산량을 충족시키기 위해 필요하다. 그러나, 비료 생산 공정은 에너지 집약적이고, 환경문제를 유발시키며, 작물 생산에 필요한 무기질의 한계가 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법은 비료이용 효율성을 증가시키면서 화학비료 사용량을 줄이거나, 완효성 비료(bio-fertilizer)로 대체하는 것이다<sup>1)</sup>. 우리나라의 가축분뇨 발생량은 2018년에 5,231만톤으로, 이 중 우분은 약1,357만톤, 돈분 2,139만톤, 계분 901만톤, 기타 20.5만톤에 달한다<sup>2)</sup>. 가축분뇨의 경우 질소(N), 인(P) 같은 양분을 다량으로 함유하고 있어<sup>3)</sup>. 화학 비료 대체 자원으로 이용가치가 충분하다. 그러므로 최근 가축 사육두수의 증가로 인해 가축분뇨 발생량이 증가 추세에 있으므로, 이에 대한 추가적인 처리 및 활용방안이 요구되고 있다.

바이오차의 사용은 일반적으로 토양 화학 특성 증진, 탄소 격리<sup>4)</sup>, 식물 영양분 용출 조절 및 온실가스 완화<sup>5)</sup>를 포함해서 다양한 목적으로 사용되고 있다. 바이오차는 양분을 천천히 용출시킬 수 있고, 다공성 소재의 특성을 가지기 때문에 토양에서 식물 영양 및

미생물 접종을 위한 매개체(Carrier)로 사용되었다. 반면에 바이오매스의 종류에 따라 바이오차는 질소, 인과 칼륨 성분을 다량 포함하고 있지만, 바이오매스 전환 과정 중에 고온으로 인해 불용성인 것으로 발표된 바 있다<sup>6)</sup>. 산성화된 바이오차는 음이온 흡착을 높여주는 양전하 자리(Positive site)을 증가시킨다<sup>7)</sup>. 이와 반대로, 산성화된 바이오차와 어분을 혼합 물질은 토양 칼럼 실험에서 식물 필수 원소의 용출을 증가시켰다<sup>8)</sup>. 이와는 상반되게 바이오차 사용은 분진 문제를 유발시키며, 유거수에 의해 경작지 시용량의 25%가 소실되는 것으로 보고되었다<sup>8)</sup>. 따라서 돈분과 바이오차를 혼합한 바이오차 펠릿은 양분을 천천히 용출하면서 이러한 문제를 해결하였다<sup>9)</sup>. 바이오차를 혼용한 경작지에서  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , 및 K 용출을 각각 8.0-35.9%, 8.5-23.7%, 및 7.9-23.4%를 줄인다고 발표한 바 있다<sup>10)</sup>. 돈분을 혼합한 바이오차 펠릿을 이용한 양분 용출 패턴을 평가하기 위해 개량한 Hyperbola model을 적용한 바 있다<sup>9,11)</sup>.

토양에 바이오차 혼합처리하는 탄소격리와 작물 생산성을 증가시키면서, 메탄( $\text{CH}_4$ )과 아산화 질소( $\text{N}_2\text{O}$ )와 같은 온실가스 발생량 줄이는 유망한 경종 방법으로 여겨진다<sup>12)</sup>. 계분 바이오차를 사용한 토양은 높은 질소 함량 때문에 누적  $\text{N}_2\text{O}$  발생량이 대조

구에 비해 32%가 높게 발생하였다<sup>13)</sup>. 또한 닭 깃털 바이오차를 시용한 경작지에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 흡착이 증가하여 누적 아산화 질소 발생량이 대조구에 비해 4.0%가 낮았다<sup>14)</sup>. 반면에 밀짚 바이오차를 혼용한 포장에서 대조구에 비해 메탄과 아산화 질소 발생량은 각각 11.2~17.5% 및 19.5~26.3% 감소하였다<sup>15)</sup>. 추가적으로 밀짚 바이오차 혼용은 메탄과 아산화 질소 발생량을 줄이면서 밀 생산량을 증가시켰다<sup>16)</sup>.

토양중의 주요양분은 많은 환경 요인에 의해 쉽게 영향을 받으므로, 식물 생육에 따른 누적 주요 양분에 대한 예측 모델을 도입하였다. 토양중의 누적 양분에 대한 예측 모델을 확립하는 것은 작물 생육 반응을 이해하는데 도움이 된다. 그러므로, 어분을 혼합한 산도를 조절한 바이오차 펠릿 처리에 따른 토양중의 양분 함량에 대한 예측 모델은 어떻게 비료 성분이 작물 생육에 영향을 미치는지를 이해하는데 도움을 준다.

따라서, 본 연구의 목적은 어분을 혼합한 산도를 조절한 바이오차 펠릿은 토양중의 양분 무기화에 영향을 미칠 수 있다는 가설 하에, 배추 재배 시 토양중의 무기 양분에 대하여, 시그모이드 곡선(Sigmoid curves)을 적용한 양분 무기화 패턴을 평가하고, 온실가스 발생량을 산정하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시험 재료

본 시험은 국립농업과학원 시험포장에서 수행하였

으며, 시험 전 토양과 어분을 혼합한 산처리된 왕겨 및 계분 바이오차 펠릿에 대한 이화학적 성분을 Table 1, 2에 나타내었다. 왕겨 및 계분 바이오차의 경우 미생물 활동을 저하시키는 염기성이기 때문에 유기농업 자재인 0.4M Citric acid 용액을 살포함으로써 바이오차의 산도를 조절하였다. 펠릿은 어분과 산처리한 왕겨 및 계분 바이오차 혼합비를 6:4로 맞추어, 총 질소함량이 5%가 되도록 조제하였다.

### 2.2. 배추 재배

시험에 공시한 배추 품종은 “춘월”이었으며, 재식 거리 60 X 40 cm로 30일된 모종을 정식하였다. 시험구 배치는 세구 배치법 3반복으로, 처리구는 화학비료 처리구를 대조구(Control), 어분을 혼합한 산처리된 왕겨 바이오차 펠릿(RBFP)과 어분을 혼합한 산처리한 계분 바이오차 펠릿(PBFP) 처리구로 구성되어 있다. 대조구의 시비량(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)은 32-7.8-19.8 kg 10a<sup>-1</sup>로 요소를 2회에 걸쳐 분할 사용 하였으며, 계분 퇴비는 250kg 10a<sup>-1</sup>로 전량 기비로 사용하였다. 바이오차 펠릿 처리구의 비료 사용량은 노지 배추 재배 시 질소 추천 시비량인 32 kg 10a<sup>-1</sup> 기준으로 산정하였다. 또한 배추 재배는 농촌진흥청 표준 재배법에 준하여 관리하였으며, 배추의 생육조사는 초장 및 생체중을 측정하였다.

### 2.3. 토양 화학 분석

토양 시료는 주기적으로 채취하여, 음건 시킨 후 마쇄하여 2mm 체로 거른 후 화학 성분 분석을 위해 상온에 보관하였다. 토양 시료 채취는 배추 정식 후,

Table 1. Chemical properties of the soil used

	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OM (%)	TN (%)	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
					----- mg kg <sup>-1</sup> -----		
Sandy loam	7.96	0.04	1.16	0.05	39.6±4.7	25.6±3.3	206.2±8.1

Table 2. Physicochemical properties of the acidified biochar pellets incorporated with dry fish powder

	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	TN	NH <sub>4</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	K
				-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
RBFP	6.2	1.44	47.06	4.77	6.39	1.34
PBFP	6.1	3.05	53.2	4.9	4.88	2.25

6일 간격으로 시료를 채취하였고, 배추 정식 20일 이후부터는 약 12일 간격으로 채취하였다. 토양 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$  및  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량 분석을 위해 2M KCl 용액을 넣어 30분간 진탕(120 rpm)한 후 침출액은 여과지(Whatman #2)로 여과하였다. 여과한 침출액은 Bran-Lubbe Segmented Auto Analyzer (Seal Analytical Ltd., Wisconsin, USA)을 이용하여  $\text{NH}_4\text{-N}$  및  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도를 분석하였다. 토양 중의  $\text{P}_2\text{O}_5$ 와  $\text{K}_2\text{O}$  함량 측정을 위해 Melich 3 방법의 추출용액을 넣은 후, 5분간 진탕(120 rpm)하여 여과지(Whatman No. 2)에 여과한 침출액을 UV Spectrophotometer를 사용하여, 측정용 키트(ST-Ammonium, C-Mac, Korea)로  $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 Molybdovanadate 방법, 그리고 K는 Tetraohetylborate 방법으로 농도를 분석한 결과를 변환 수식을 이용하여 계산하였다.

#### 2.4. 양분 무기화 모형

양분 무기화 패턴을 분석하기 위해 SigmaPlot 12.0(Systat Software, Inc) 프로그램을 활용하였으며, 수식 1을 활용한 작물 성장 모형(Sigmoid curve) 식과 직선 회귀식 수식 2를 적용하여 평가하였다. 봄 배추 재배 기간 동안 시기별로 채취한 토양에 대한 양분 무기화 모형은 누적  $\text{NH}_4\text{-N}$ 과  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도에 대해 아래 수식 1을 이용하여, 3 parameter model을 적용한 Sigmoid curves를 도출하였다. 누적  $\text{P}_2\text{O}_5$ 와 K 농도에 대해서는 수식 2를 적용하여 Linear types 수식을 도출하였다. Sigmoid curve 및 직선회귀식은 아래 수식과 같다.

$$Y = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{t - t_0}{b}\right)} \quad (1)$$

여기서, Y는 시간 t에서의 반응 값,  $a = \text{max} - \text{min}$ , t = 시간,  $t_0$ : 최대 반응 값의 50%에 도달하는 시간

$$Y = ax + b \quad (2)$$

여기서, Y는 누적 예측 농도( $\text{mg kg}^{-1}$ ), x는 토양 샘플 시기, a는 직선 회귀 계수, b는 누적농도와 교차하는 값.

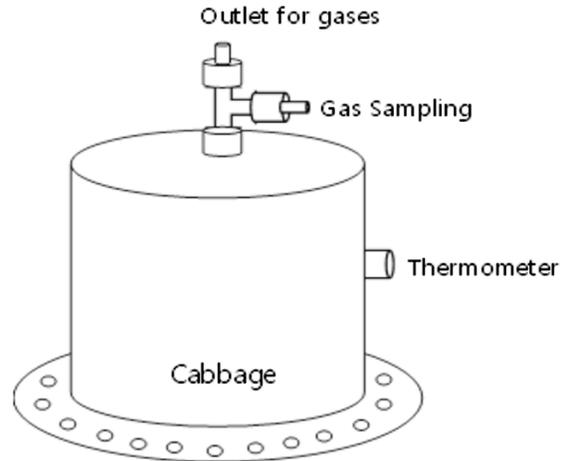


Fig. 1. Diagram of collection chamber for greenhouse gases in the upland.

#### 2.5. 온실가스 측정 및 분석

국립농업과학원 유기농업과 봄 배추 시험포장에 설치된 온실가스 포집 챔버(Fig. 1)를 통하여  $\text{CH}_4$ 와  $\text{N}_2\text{O}$  농도를 측정하기 위해 가스 포집은 일주일 간격으로 챔버를 고정시켜 1시간 동안 채류시킨 후, 50 ml 주사기를 이용하여 가스를 포집하였으며, 챔버 내의 온도는 온실가스 포집 전후로 1시간 간격으로 측정하였다<sup>17)</sup>.

채취한 가스 농도는 Gas Chromatography (Agilent 7890B, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 분석하였으며,  $\text{CH}_4$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 의 발생량 산정은 아래와 같은 수식 3을 이용하였다.

$$F = \frac{\rho \times V \times \Delta c}{\Delta t \times 273} \times \frac{273}{T + 273} \quad (3)$$

여기서, F는  $\text{CH}_4$  및  $\text{N}_2\text{O}$  농도 ( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\rho$ : 가스 밀도 ( $\text{mg L}^{-1}$ )로서  $\text{CH}_4$ 는 0.714,  $\text{N}_2\text{O}$ 는 1.967, V: 챔버 부피( $\text{m}^3$ ),  $\Delta c/\Delta t$ : 챔버 내의 단위 시간당 가스 농도 ( $\text{mg m}^{-3} \text{day}^{-1}$ ), 그리고 T는 절대온도 ( $273 + \text{챔버 내 평균 온도}$ )를 의미한다.

#### 2.6. 통계처리

배추 생육 시기별 토양중의 양분 분석 값 및 온실

가스 누적 발생량에 대한 데이터는 SigmaPlot 12.0을 적용하여 ANOVA 분석을 한 후 표준 편차를 이용하여 처리 간 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 어분을 혼합한 산처리된 바이오차 펠릿 시용에 따른 토양 중 양분 무기화 패턴

배추 재배 시 어분을 혼합한 산 처리된 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 시용에 따른 토양 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도는 Fig. 2a 및 누적 농도에 대한 예측 모델 적용은 Fig. 2b에 나타내었다. 대조구와 PBFP 처리구에서 각각 정식 후, 10일과 41일을 제외하고, 모든 처리구에서 배추 재배 기간 동안  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 지속적으로 감소하였다. 10일과 41일  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 높게 나타난 원인에 대해서는 추가적인 실험이 수반되어야 할 것으로 판단된다. 특히  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도는 정식 후 18일까지 급격히 감소한 반면, 그 이후로는 정체 상태를 유지하였다. 누적  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도 변화는 RBFP와 PBFP 처리구에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났지만, 화학비료 처리구인 대조구에 비해 정식 후, 32일까지는 RBFP 36.7%, PBFP

38.6%로 높게 나타났다. 그 이후로는 대조구의 누적  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 점차적으로 높게 나타났다. RBFP 및 PBFP 처리구의  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 누적 농도는 약  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  및  $304 \text{ mg kg}^{-1}$  이었으며, 대조구는 약  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 산처리를 함으로서 화학비료 처리구보다 각각 36.7 및 38.6% 더 많은 무기화가 발생되었다. 이러한 현상은 산도를 조절한 닭 깃털 바이오차는  $\text{NH}_3$ 의 손실을 56-60% 줄였으며,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 용출을 약간 증가시켰다<sup>18)</sup>는 보고에서 그 원인을 추론할 수 있다.

배추 재배기간 동안 누적  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도의 무기화 패턴은 Sigmoidal 수식(1)과 Liner types 수식(2)를 적용하여 평가하였으며, RBFP와 PBFP 처리구에서 작물 성장 모형인 Sigmoid curves에 적합한( $P < 0.001$ )것으로 나타났지만, 화학비료 처리구인 대조구는 Linear type을 보였다(Fig. 2b와 Table 3). RBFP 및 PBFP 처리구에서 최대 무기태  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도의 50%에 도달하는데 걸리는 시간은 약 4일로 산정되었다. 또한, 돈분을 혼합한 바이오차 펠릿에 대한 양분 용출 패턴을 평가를 위한 환원 조건의 용출 칼럼 실험에서 누적  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도의 용출 Hyperbolar에 적합하였다<sup>9)</sup>.

어분을 혼합하여 산도가 조절된 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 시용에 따른 토양중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 Fig

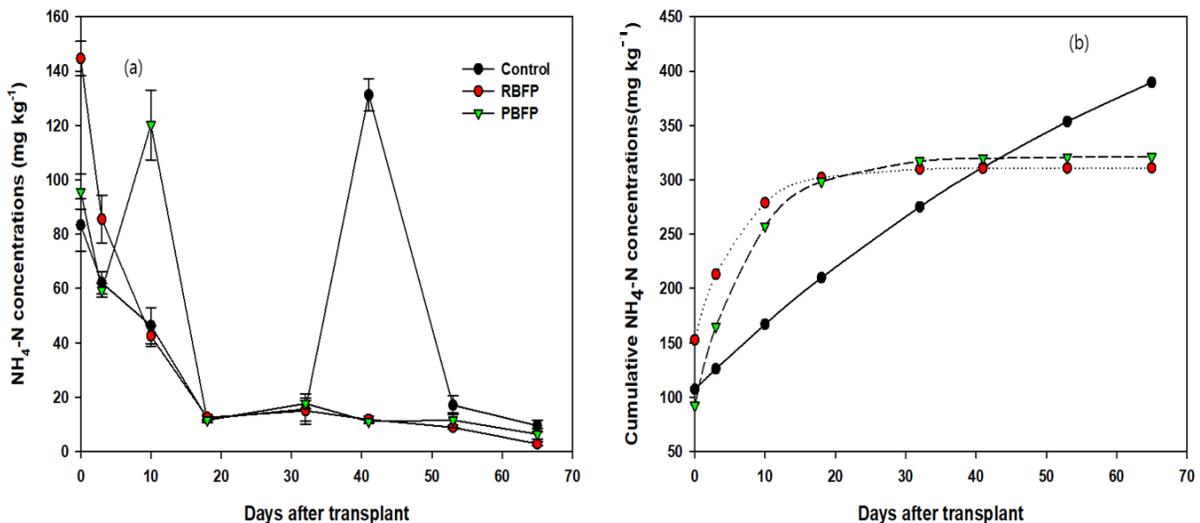


Fig. 2. Changes of  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentrations(a) and mineralized patterns of cumulative  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentrations(b) in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation. RBFP; acidified rice hull biochar fertilizer pellet incorporated with dry fish powder, and PBFP; acidified poultry biochar fertilizer pellet incorporated with dry fish powder.

Table 3. Predicted equations of cumulative mineralized  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentrations in the soil incorporated with acidified biochar pellet during Kimchi cabbage cultivation

Treatments*	Predicted equations	R <sup>2</sup>
Control	$Y = 43.6x + 46.3$	0.998
RBFP	$Y = 308.5 / (1 + \exp(-(t+0.162)) / 4.14)$	0.917
PBFP	$Y = 316.1 / (1 + \exp(-(t-3.18)) / 3.96)$	0.972

Means values indicate significant differences ( $p < 0.001$ ) among treatments (ANOVA).

\*RBFP; acidified rice hull biochar fertilizer pellet incorporated with dry fish powder, and PBFP; acidified poultry biochar fertilizer pellet incorporated with dry fish powder

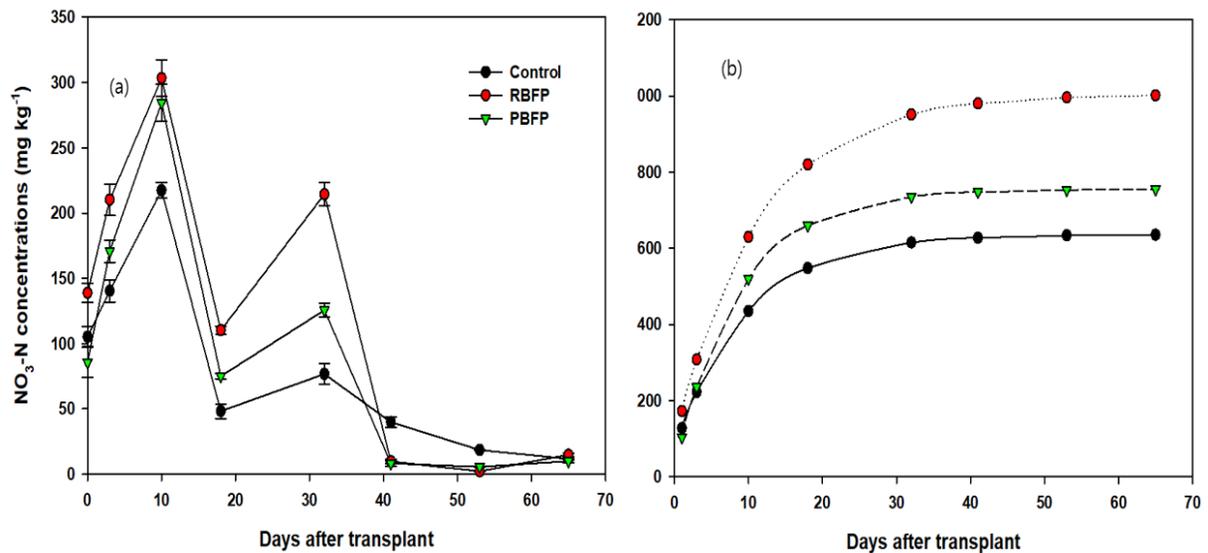


Fig. 3. Changes of  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations and mineralized patterns of cumulative  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation.

3a에, 그리고 누적 농도에 대한 예측 모델 적용은 Fig. 3b에 나타내었다. 처리 관계없이  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 정식 후, 3일까지 확연히 증가하였지만, 정식 후, 18일까지는 감소하다가 다시 32일까지 증가하는 경향을 보였지만 그 이후로는 농도가 감소하였다. 배추 정식 후, 32일에 토양중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 RBFP 처리구( $214.4 \text{ mg kg}^{-1}$ )가 대조구( $76.7 \text{ mg kg}^{-1}$ )보다 1.8배 많이 무기화가 발생하였으며, 무기화된 총 누적  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 대조구<PBFP<RBFP순으로, 각각  $658.1, 765.4, 1003.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 산정되었다. 배추 생육 기간 전반에 걸쳐 토양중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 대조구에 비해 RBFP처리구에서 가장 높게 나타났다. 계분 바이오차에는 왕겨 바이오차 보다 질소 함량이 매우 많이 내재하고 있음에도 불구하고 불용성이기 때

문에 양분 무기화에는 영향을 크게 미치지 않은 결과와 유사하게, 산도를 조절한 깃털 바이오차를 사용한 토양에서 수용성  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 및  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 용출에는 영향을 미치지 않았다<sup>18)</sup>.

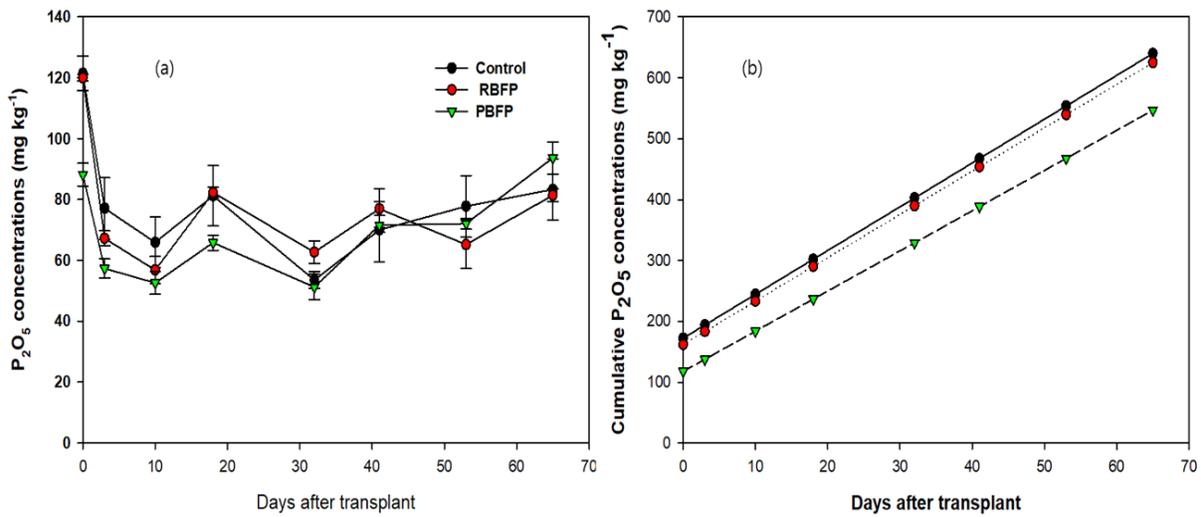
계분 바이오차에 불용성 질소 함량이 높았지만, 산도를 조절할 경우 RBFP 보다는 적지만 양분 무기화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

배추 재배 기간 동안 모든 처리구에서 토양 중의 누적  $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대한 무기화 패턴은 작물 생육 모형인 Sigmoid curves에 적합한( $P < 0.001$ ) 것으로 나타났다 (Fig. 3b와 Table 4). RBFP 및 PBFP 처리구에서 최대 누적  $\text{NO}_3\text{-N}$  무기화 농도의 50%에 도달하는데 걸리는 시간은 각각 6일과 4일로 나타났지만, 대조구에서는 약 21일이 소요되는 것으로 산정되었다. 이러한

**Table 4.** Predicted equations of cumulative mineralized NO<sub>3</sub>-N concentrations in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation

Treatments	Predicted equations	R <sup>2</sup>
Control	$Y = 623.22 / (1 + \exp(-(t - 5.96) / 20.78))$	0.889
RBFP	$Y = 985.57 / (1 + \exp(-(t - 7.59) / 5.95))$	0.969
PBFP	$Y = 741.53 / (1 + \exp(-(t - 6.54) / 4.41))$	0.968

\* Means values indicate significant differences (p < 0.001) among treatments (ANOVA).



**Fig. 4.** Changes of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentrations(a) and mineralized patterns of cumulative P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentrations(b) in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation.

원인은 유기농업 자재인 어분을 혼합한 산도를 조절 한 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 처리구(RBFP 및 PBFP)가 대조구인, 화학비료 처리구보다 질산화가 많이 발생되었기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 결과는 생분해성 수지 코팅비료를 혼합한 토양 칼럼 용출 실험에서 누적 용출 NO<sub>3</sub>-N 농도의 결과도 일치하였다<sup>19)</sup>. 부가적으로 돈분 혼합 바이오차 펠릿을 이용한 칼럼 시험에서 Hyperbolar 모델은 누적 NO<sub>3</sub>-N 용출 농도에 적합(p<0.001)하였다<sup>10)</sup>.

인산은 작물 생산성과 토양 비옥도에 영향을 미치며, 작물 재배를 위한 필수 원소들 중에 하나이다. 칼슘 인산염(Ca-phosphates)이 가장 일반적인 인산 형태이므로 Lime이나 점토 입자와 결합하기 때문에 바이오차의 인산 용해도는 매우 낮다<sup>20)</sup>. 어분을 혼합한 산도 조절한 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 시용에 따른 배추 생육기간 동안 토양중의 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 농도는 Fig. 4a에, 그리고 누적 무기화 농도 변화는 Fig. 4b에 나타내었다. 배추 생육기간 동안 토양중의 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 무기

화 패턴은 정식 후, 20일을 제외하고 모든 처리구에서 정식 후 32일 까지는 농도가 감소하였지만, 그 이후로는 대조구와 PBFP 처리구에서 증가하는 것으로 나타났다.

배추 재배 기간 동안 모든 처리구에서 토양 중의 누적 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 농도에 대한 무기화 패턴은 Linear types에 적합한(P<0.001)것으로 나타났다(Table 5). 누적 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 농도에 대한 무기화 모형은 Linear type(R<sup>2</sup>> 0.83)으로 대조구와 RBFP 처리구 사이에는 유의차가 인정되지 않았지만, PBFP처리구에서 누적 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 무기화 농도는 배추 생육 기간에 걸쳐 가장 낮게 나타났다.

어분을 혼합한 산도를 조절된 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 시용에 따른 배추 생육기간 동안 토양 중의 K 농도는 Fig. 5a에, 그리고 무기화된 누적 농도 변화는 Fig. 5b에 나타내었다. 배추 생육기간 동안 토양 중의 K의 무기화 패턴은 대조군에서 전 생육기간에 걸쳐 낮은 범위(0.72-2.34 mg kg<sup>-1</sup>)에서 일정하게 무

Table 5. Predicted equations of cumulative mineralized P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> concentrations in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation

Treatments	Predicted equations	R <sup>2</sup>
Control	Y = 7.19x+172.41	0.984
RBFP	Y = 7.13x+161.81	0.983
PBFP	Y = 6.60x+117.83	0.988

Table 6. Predicted equations of cumulative mineralized K concentrations in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation

Treatments	Predicted equations	R <sup>2</sup>
Control	0.50x+0.62	0.999
RBFP	0.75x+0.31	1.00
PBFP	0.75x+0.31	1.00

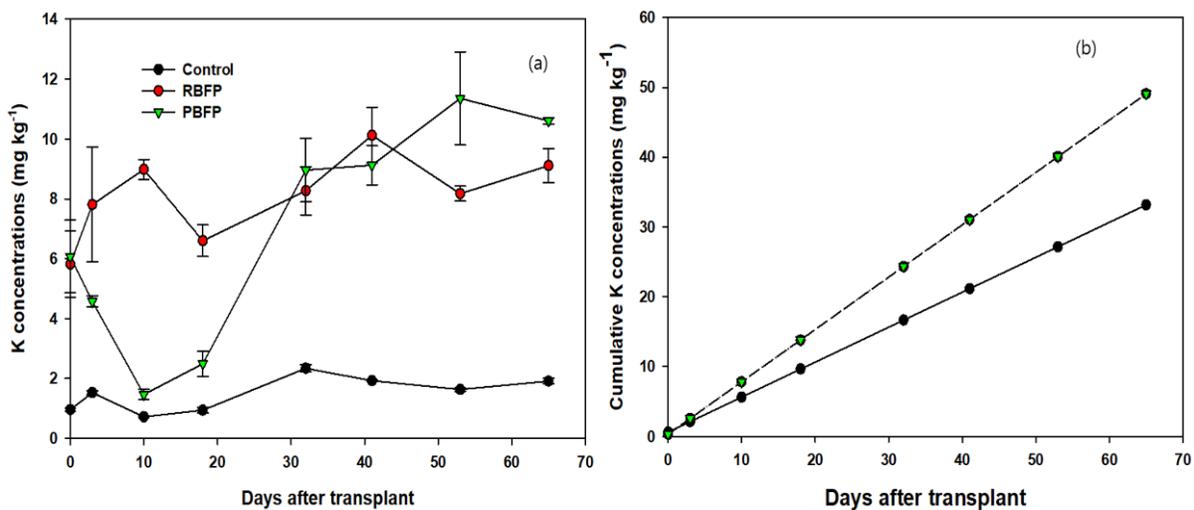


Fig. 5. Changes of K concentrations and mineralized patterns of cumulative K concentrations in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation.

기화가 발생되었지만, PBFP처리구에서 정식 후, 18 일 이후부터는 급격하게 증가하였으며, 그 이후부터는 완만하게 증가하였다.

칼륨(K)은 채소 생산에 필수 원소 중의 하나로서, 바이오차 시용을 함으로서 K 이용성을 증진시키며, 용출을 줄여 준다<sup>21)</sup>. 또한 바이오차 분획으로부터 칼륨 첨가는 토양에서 수용성 K를 증가시키며, 용출로 인한 손실을 줄여준다<sup>22)</sup>.

배추 재배 기간 동안 모든 처리구에서 토양 중의 누적 K 무기화 패턴은 Linear types에 적합한 (P<0.001)것으로 나타났다(Table 6). 누적 K 농도에

대한 무기화 모형은 Linear type(R<sup>2</sup>≤1.00)으로 RBFP와 PBFP처리구 사이에는 유의차가 인정되지 않았지만, 대조구에서 누적 K 무기화 농도는 배추 생육 기간에 걸쳐 가장 낮게 나타났다.

### 3.2. 어분을 혼합한 산처리된 왕겨 및 계분 바이오차 펠릿 처리에 따른 온실 가스 발생량 산정

배추 재배기간 동안 어분을 혼합한 산도를 조절된 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 시용에 대한 누적 CH<sub>4</sub>

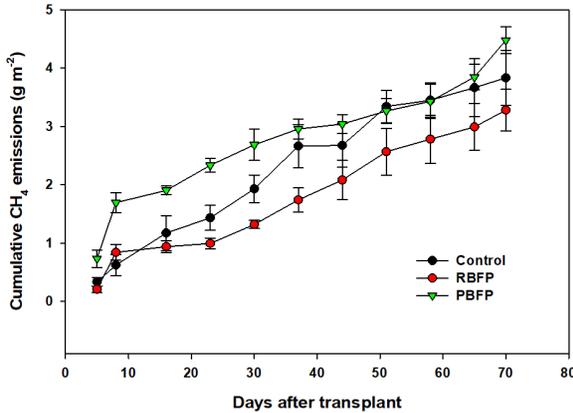


Fig. 6. Estimation of cumulative CH<sub>4</sub> emissions in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation.

발생량은 수식 3을 이용하여 산정하였으며, Fig. 6에 나타내었다. 배추 재배 기간 동안 모든 처리구에서 누적 CH<sub>4</sub> 발생량은 완만하게 증가하였고, 대조구 (3.83 g m<sup>-2</sup>)와 비교하여 PBFP 처리구에서 13.9%로 가장 많이 발생하였다. 이는 산처리한 계분 바이오차가 양분 무기화에 영향을 미치지 않았지만, 유기탄소가 메탄으로 전환되는데 관여되었다고 생각된다. RBFP 처리구에서 누적 CH<sub>4</sub> 발생량은 가장 적었으며, 14.4% 저감되는 것으로 나타났다. 어분을 혼합한 산처리한 왕겨 바이오차 펠릿 (RBFP)을 사용하여 배추를 재배할 경우 화학비료를 사용한 것보다 누적 메탄 발생량을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

CH<sub>4</sub>는 토양미생물 활동으로 혐기 조건에서 발생하므로, 산소(O<sub>2</sub>) 함량을 증가시키면, CH<sub>4</sub> 발생량을 줄일 수 있다<sup>23)</sup>. 또한 논에 바이오차를 시용함으로써 CH<sub>4</sub> 발생량이 19% 증가되었지만<sup>24)</sup>, 벼와 밀 윤작지에 바이오차를 20kg ha<sup>-1</sup> 시용하였을 때 13.7%의 감소 효과를 가져왔다<sup>25)</sup>는 결과와 비교할 때 논과 밭의 차이는 있지만 저감 효과가 유사하게 나타났다.

배추 생육기간 동안 어분을 혼합하여 산도를 조절한 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 시용에 대한 누적 N<sub>2</sub>O 발생량 수식 3을 이용하여 산정하였으며, Fig. 7에 나타내었다. 대조구에서는 누적 N<sub>2</sub>O 발생량은 정식 후, 43일까지는 완만하게 증가하였지만, 그 이후로는 급격하게 증가하였다. 또한 RBFP와 PBFP 처리구에서는 배추 정식 후, 23일까지는 완만하게 증가하였지만, 그 이후에는 정체 상태를 유지하였다.

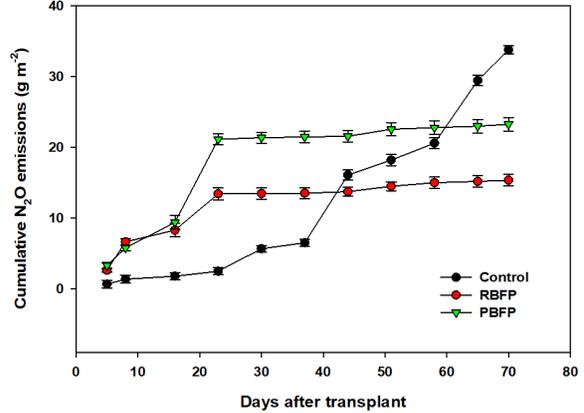


Fig. 7. Estimation of cumulative N<sub>2</sub>O emissions in the soil incorporated with acidified biochar pellet with dry fish powder during Kimchi cabbage cultivation.

가장 많은 누적 N<sub>2</sub>O 발생량은 대조구로서 33.75 g m<sup>-2</sup>이었으며, 대조구와 비교하여 RBFP 처리구에서 54.6% 저감되는 것으로 산정되었다.

동아시아 토양에 바이오차를 혼용하면 잠재 N<sub>2</sub>O 발생량을 21.1%로 완화시켰으며<sup>26)</sup>, 바이오차 혼용 (1-2%)함으로써 N<sub>2</sub>O 발생량을 27% 줄이는 반면 10% 이상 바이오차를 시용하게 되면 N<sub>2</sub>O 발생량을 87% 줄일 수 있다고 보고<sup>27)</sup>한 결과에 비해 저감되는 발생량은 상대적으로 적지만, 유사한 경향을 보여주었다.

### 3.3. 어분을 혼합한 산처리한 바이오차 펠릿 처리에 따른 배추 생육 반응

유기농업 자재인 어분을 혼합한 산처리한 계분 및 왕겨 바이오차 펠릿 처리 시 배추의 생육 반응은 Table 7에 나타내었다. 대조구와 비교하여 RBFP와 PBFP 처리구에서 배추의 초장은 각각 31.5%, 18.7% 큰 것으로 나타났다. RBFP 처리구에서 28.6 cm로 가장 초장이 컸으며, 생체중은 1.3kg이었다. 생체중은 RBFP와 PBFP 처리구 사이에 유의차가 없었으며, 대조구에 비해 30.8% 증가하였다.

토양에 바이오차를 시용함으로써 작물 생산량을 10% 증가시켰으며<sup>28)</sup>, 산처리한 바이오차를 시용함으로써 대조구와 비교하여 옥수수 지상부 바이오매스를 1.4-3.5배 증가한다고 발표하였다<sup>29)</sup>. 바이오차 과다 시용(30 tonne ha<sup>-1</sup>)은 오히려 밀 수량 및 질소 이용 효율성을 감소시킨다고 보고하였다<sup>30)</sup>.

Table 7. Growth responses of Korean cabbage in the soil incorporated with acidified biochar pellet incorporated with dry fish powder

Treatments	Plant height (cm plant <sup>-1</sup> )	Fresh weight (kg plant <sup>-1</sup> )
Control	19.6c	0.9b
RBFP	28.6a	1.3a
PBFP	24.1b	1.3a

#### 4. 결론

본 연구의 목적은 봄 배추 재배 시 어분을 혼합한 산도를 조절한 계분 및 왕겨 바이오차 펠렛 처리에 따른 토양 중의 양분 무기화 패턴 및 온실가스 발생에 미치는 영향을 구명하고자 하였다. 연구 결과로서, 봄 배추 재배 시, RBFP 처리구의 누적 무기화는 대조구에 비해 NH<sub>4</sub>-N는 14.2% 줄어든 반면, NO<sub>3</sub>-N 농도는 52.5%가 높게 무기화가 발생되었으며, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 누적 농도는 대조구와 RBFP 처리구 사이에 유의차가 없었다. K는 대조구에 비교하여 RBFP 및 PBFP 처리구에서 무기화가 높게 발생되었다. RBFP와 PBFP 처리구에서 토양 중의 누적 무기화 NH<sub>4</sub>-N 무기화 패턴은 작물 생육 모형인 Sigmoid curves에 적합한(P<0.001)것으로 나타났지만, 대조구에서는 linear type을 보였다. 또한 모든 처리구에서 누적 NO<sub>3</sub>-N농도의 무기화 패턴은 작물 생육 모형인 Sigmoid curves에 적합한(P<0.001)것으로 나타났지만, 누적 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 K의 농도에 대해서는 Linear types으로 판단되었다. 온실가스 발생량 측면에서, 대조구와 비교하여 RBFP 처리구에서 누적 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 발생량은 각각 14.4%와 54.6% 저감되는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 바탕으로 어분을 혼합한 산도를 조절한 왕겨 바이오차 펠렛을 유기농 배추 재배에 사용 시 배추 생육 증진과 온실가스 저감 효과가 있을 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구과제 (Project NO. PJ01711401)로 수행되었음을 감사하게 생각합니다.

#### References

1. Arden-Clarke C, Hodges R., The environmental effects of conventional and organic/biological farming systems. II. Soil ecology, soil fertility and nutrient cycles. *Biol Agric Hortic* 5, 223-287. (1988).
2. MAFRA., Medium- and long-term countermeasures for recycling of livestock manure. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea. (2018).
3. Cao X, Harris W., Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresour Technol* 101, 5222-5228. (2010).
4. Li S., Tasnady D., Biochar for soil carbon sequestration: Current knowledge, mechanisms, and future perspectives. *J. of Carbon Research* 9(33), 67. (2023).
5. Shin J, Park D, Hong S, Jeong C, Kim H., Influence of activated biochar pellet fertilizer application on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in rice (*Oryza sativa* L.) production. *Environ Pollut* 285:117457. (2021).
6. Choi, J., Lee D., Kim M., Nam J., Shim C., Hong S., Shin, J., Major plant nutrient-releasing patterns in the leachates from the soil incorporated rice hull biochar adjusted pH with dry fish power. *J. of Korean Organic Resources Recycling Association* 3, pp55-64. (2023).
7. Bashir, S., Bakhsh Gulshan, A., Iqbal, J., Husain, A., Alwahibi, M.S., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y., Bakhsh, A., Ahmed, N., Jamal Khan, M., Ibrahim, M., Diao, Z.-H., Comparative role of animal manure and vegetable waste induced compost for polluted soil restoration and maize growth. *Saudi J. Biol. Sci.*

- 28 (4), 2534-2539. (2021).
8. Lehmann J, Joseph S., Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation, 2nd ed. Routledge, London. (2015).
  9. Shin J, Park W, Lee S., Optimum method of uploaded nutrient solution for blended biochar pellet with application of nutrient releasing model as slow-release fertilizer. *Appl Sci* 9, 1899. (2019).
  10. Yuan H, Lu T, Wang Y, Chen Y, Lei T., Sewage sludge biochar: nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. *Geoderma* 26, 17-23. (2016).
  11. Shin J., Lee D., Shim C., Nam J., Park S., Hong S., Song J., Jeong C., Nutrient release pattern and mitigation of N<sub>2</sub>O emissions under the application of activated poultry manure compost biochar with organic resources. *Environmental Pollution* 356, 124250. (2024).
  12. Shakoor, A., Arif S.M., Shahzad S.M., Farooq T. H., Ashraf F., Altaf M. M., Ahmed W., Tufail M. A., Ashraf M., Does biochar accelerate the mitigation of greenhouse gaseous emissions from agricultural soil? A global meta-analysis. *Environmental Research* 202, 111789. (2021).
  13. Singh BP, Hatton BJ, Singh B, Cowie AL, Kathuria A., Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *J Environ Qual* 39, 1224-1235. (2010).
  14. van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Downie A, Berger E, Rust J, Scheer C., Influence of biochars on flux of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from Ferrosol. *Soil Res* 48:555-568. (2010).
  15. Wu D, Feng Y, Xue L, Liu M, Yang B, Hu F, Yang L., Biochar combined with vermicompost increases crop production while reducing ammonia and nitrous oxide emissions from a paddy soil. *Pedosphere* 29:82-94. (2019).
  16. Wang JW, Pan XP, Liu YL, Xiong ZQ., Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant Soil* 360, 287-298. (2012).
  17. Chadwick D. R., Cardenas L., Misselbrook T.H., Smith K.A., Rees R.M., Watson C.J., McGeough K.L., Williams J.R., Cloy J.M., Thprman R.E., Dhanoa M.S., Optimizing chamber methods for measuring nitrous oxide emissions from plot-based agricultural experiments. *European Journal of Soil Science*. 65: 295-307. (2014).
  18. Sarah, A. D., Miguel L. C., Keshav, C. D., Julia, W. G., Leticia, S. S., William, P. M., Release of Nitrogen and Phosphorus from Poultry Litter Amended with Acidified Biochar. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 8, 1491-1502. (2011).
  19. Choi, J., Shin, J., Cho, H., Chung, W., Lee, S. B., & Yun, S. I., Effects of biodegradable polymer coating urea to nitrogen release in the soil column. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 32(1), 49-59. (2024).
  20. Khan, M.I., Afzal, M. J., Bashir, S., Naveed, M., Anum, S., Cheema, S.A., Wakeel, A.S.M., Ali, M.H., Chen, Z., Improving Nutrient Uptake, Growth, Yield and Protein Content in Chickpea by the Co-Addition of Phosphorus Fertilizers, Organic Manures, and *Bacillus* sp. MN-54. *Agronomy* 11(3), 436. (2021).
  21. Biliias, F., Kalderis, D., Richardson, C., Barbayiannis, N., Gasparatos, D., Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. *Science of The Total Environment* 858(1), 159782. (2023).
  22. Qayyum, M. F., Haider, G., Raza, M. A., Mohamed, A. K. S. H., Rizwan, M., El-Sheikh, M. A., Straw-based biochar mediated potassium availability and increased growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L). *J. Saudi Chem. Soc.* 24, 963-973. (2020).
  23. Yang, X., Liu, D., Fu, Q., Li, T., Hou, R., Li, Q., Li, M., & Meng, F., Characteristics of greenhouse gas emissions from farmland soils based on a structural equation model: Regulation mechanism of biochar. *Environmental Research*, 206, Article 112303. (2022).
  24. Song, X., Pan, G., Zhang, C., Zhang, L., Wang, H.,

- Effects of biochar application on fluxes of three biogenic greenhouse gases: a meta-analysis. *Ecosyst. Health Sustainability* 2 (2), e01202. (2016).
25. Wu, Z., Dong, Y., Zhang, X., Xu, X., Xiong, Z., Biochar single application and reapplication decreased soil greenhouse gas and nitrogen oxide emissions from rice-wheat rotation: A three-year field observation. *Geoderma* 435, 116498. (2023).
26. Lee, SI., Park, HJ., Jeong, YJ., Seo, BS., Kwak, JH., Yang, HI., Xu, X., Tang, S., Cheng, W., Lim, SS., Choi, WJ., Biochar-induced reduction of N<sub>2</sub>O emission from east Asian soils under aerobic conditions: review and data analysis. *Environ Pollut* 291, 118154. (2021).
27. Cayuela, M., Jeffery, S., van Zwieten, L., The molar H: C ratio of biochar is a key factor in mitigating N<sub>2</sub>O emissions from soil. *Agric Ecosyst Environ* 202, 135-138. (2015).
28. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C., A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 175-187. (2011).
29. Kopp, C., Sica, P., Lu, C., Tobler, D., Jensen, L.S., Müller-Stover, D., Increasing phosphorus plant availability from P-rich ashes and biochars by acidification with sulfuric acid. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11(6), 111489. (2023).
30. Sun, H., Shi, WQ., Zhou, M., Ma, X., Zhang, H., Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil. *Plant, soil and Environment* 65, 83-89. (2017).