

과제구분	기관고유	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제명		연구분야	수행기간	연구실	책임자
농경지 탄소저장 연구 및 농업환경 영향 평가		농업환경	'99~	환경농업연구과	안희정
우분 바이오차의 작물별 최적 활용기술 개발		농업환경	'23~'25	환경농업연구과	안희정
색인용어	우분 바이오차, 상추, 옥수수, 배추				

## ABSTRACT

This study was conducted from 2023 to 2025 to determine the optimal application rate of cattle manure biochar (CMB) for lettuce in a greenhouse and corn and Chinese cabbage in an upland field. CMB was applied at 0, 100, 200, and 300 kg 10a<sup>-1</sup> (with an additional 500 kg 10a<sup>-1</sup> for upland field crops) along with rice hull biochar (RHB) at 200 kg 10a<sup>-1</sup>. Soil pH, organic matter, total carbon, and exchangeable potassium tended to increase with increasing application rate, and heavy metal contents remained below permissible limits in all treatments. The CMB 200 treatment showed the most stable yield increase in greenhouse lettuce and upland field corn, while all biochar treatments in Chinese cabbage showed equivalent or superior yield to the control. Soil carbon sequestration showed a very high positive correlation with application rate in both greenhouse (R<sup>2</sup>=0.9905) and upland field (R<sup>2</sup>=0.9824) conditions. Cumulative N<sub>2</sub>O emissions in the CMB 200 treatment decreased by 13% and 24% in spring and autumn lettuce cultivation, respectively. Based on these results, a cattle manure biochar application rate of 200 kg 10a<sup>-1</sup> is considered optimal for greenhouse lettuce and upland field corn in terms of yield improvement, soil carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation.

**Keywords:** Cattle manure biochar, Lettuce, Corn, Chinese cabbage

## 1. 연구목표

최근 국제적인 신기후체제 출범으로 온실가스 감축 논의가 가속화됨에 따라 우리나라는 2050 탄소중립을 선언하고 2030 NDC(국가 온실가스 감축 목표) 상향안 수립을 통해 부문별 온실가스 감축 목표 달성을 위해 노력하고 있다. 농축수산 부문의 온실가스 감축은 2050년까지 2018년 배출량(2,470만 톤 CO<sub>2</sub>eq.) 대비 약 37.7%를 감축하여 1,540만 톤 CO<sub>2</sub>eq. 배출을 목표로 하고 있으나, 가축 사육 두수의 증가로 인한 농경지 분뇨 투입량 증대 등으로 농업 분야(비에너지) 온실가스 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 전망되고 있다(농축산식품부, 2021).

특히, 경기도 농경지 면적은 도시화의 영향으로 2022년 150,188 ha에서 2023년 147,503 ha로 감소하였으나 2022년 가축 사육두수는 4,178만 두로 전국에서 두 번째로 많고, 그 중에서 가축분뇨 배출 원단위가 높은 젖소는 전국 사육 두수의 38.9%가 경기도에 집중되어 있다(기후에너지환경부, 2022). 이와 같이 과잉생산된 가축분뇨가 농경지에 살포되면서 온실가스 배출뿐만 아니라 토양 내 양분 과잉과 환경오염의 원인이 됨에 따라 가축분뇨의 새로운 처리 방안이 요구되고 있으며, 최근 가축분을 바이오차로 활용한 기술이 대두되고 있다(이동준, 2023).

바이오차(Biochar)는 바이오매스를 산소가 제한된 조건에서 열분해하여 생성된 다공성 및 난분해성 물질로 토양 물리성, 미생물상 개선 및 온실가스 배출 저감 등의 효과가 있다고 알려져 있으며, 2019년 IPCC(기후 변화에 관한 정부 간 협의체)에서 탄소 격리 효과를 공식 인정함에 따라 이산화탄소 감축 수단으로 주목받고 있다(장 등, 2023; 이 등, 2018). 이에 따라 농림축산식품부는 2050년까지 바이오차 약 46만 톤을 활용하여 온실가스를 감축하는 로드맵을 수립하고 농촌진흥청이 농림부산물 및 가축분 바이오차의 비료공정규격을 개정함으로써 생산·유통의 제도적 기반을 마련하여 바이오차를 활성화하고자 하고 있으나 농업 현장에서 활용하기 위한 작물별 시용량 및 구체적인 활용 기준에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 경기도에서 발생량이 많은 우분을 바이오차 소재로 활용하여 과잉 가축분의 자원화와 탄소저감 효과에 기여하고자 우분 바이오차 시용에 따른 작물 및 농경지 유형별 토양환경 변화와 생육 효과를 구명하고 이를 바탕으로 최적 시용량을 제시하고자 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구는 우분 바이오차 시용량에 따른 효과를 구명하기 위해 2023년부터 2025년까지 3년간 경기도농업기술원 시험포장에서 수행하였다. 농경지 유형에 따른 시용효과를 확인하고자 재배지를 시설하우스와 노지로 구분하여 시험을 진행하였다. 각각의 시험 전 토양 화학성은 표 1과 같이 시설하우스와 밭 토양 모두 양토였고 유기물(OM) 함량이 각각 13, 11 g kg<sup>-1</sup> 으로 유기물이 낮은 토양이었다.



표 1. 시험 전 토양 화학성

구 분	pH (1:5)	EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	OM ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Ex.cation( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )			T-C (%)	토 성
					K	Ca	Mg		
시설하우스	6.9	3.41	13	832	0.21	8.6	2.1	0.83	Loam
노지	7.3	0.29	11	341	0.61	6.6	2.3	0.67	Loam

바이오차의 장기 시용에 따른 연용 효과를 분석하기 위해 작기별로 바이오차를 1회씩 시용하며 작물을 재배하는 방식으로 3년간 동일한 시험포장에서 시험을 실시하였다(표 2). 시설하우스에서는 바이오차를 총 6회 시용하고 상추를 6회 재배하였으며, 노지 밭에서는 바이오차를 총 5회 시용하고 옥수수 2회, 배추 3회를 재배하였다.

표 2. 2023~2025년 바이오차 시용 및 작물 재배

구 분	횟 수	2023년		2024년		2025년	
		봄	가을	봄	가을	봄	가을
시설 하우스	바이오차 시용	6	○	○	○	○	○
	상추 재배	6	○	○	○	○	○
노지	바이오차 시용	5	-	○	○	○	○
	옥수수 재배	2	-	-	○	-	○
	배추 재배	3	-	○	-	○	-

바이오차는 작물 정식 2주 전에 시용량별로 토양에 처리 및 혼화하였으며, 이후 작물을 재배하였고 퇴비 및 화학비료는 농촌진흥청의 작물별 표준시비량에 준하여 시비하였다. 시험구는 바이오차 무시용구, 우분 바이오차 100, 200, 300  $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ , 왕겨 바이오차 200  $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$  총 5처리를 기본으로 처리하였고 노지 밭에는 우분 바이오차 다량 시용 효과 확인을 위해 500  $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$  처리를 추가하여 총 6처리하였다. 모든 시험구는 난괴법 3반복으로 배치하였으며, 작기별 토양 화학성 및 물리성, 작물 생육 및 수량 등을 조사하였다. 생육 및 수량 조사는 농촌진흥청의 농업과학기술 연구조사 분석기준에 준하여 실시하였다. 통계 분석은 우분 바이오차 처리구를 대상으로 실시하였으며, 왕겨 바이오차는 원료가 상이한 우분 바이오차와의 단순 비교 하고자 처리하였다. 시험에 사용한 우분 바이오차는 우분을 450~500℃에서 간접탄화방법으로 열분해하여 제조하였고, 왕겨 바이오차는 시판 중인 제품을 구입하여 사용하였으며, 사용한 바이오차의 특성은 표 3, 표 4와 같다. 바이오차는 H/C 비율 0.7 이하, O/C 비율 0.4 이하일 때 미생물 분해에 대한 안정성을 인정받고 있으며(EBC, 2025), H/C 비율 0.7 이하인 경우 100년 이상 토양 내 탄소 격리 효과가 있는 것으로 평가되고 있다(IBM, 2015). 본 시험에 사용한 우분 바이오차의 H/C 비율은 0.3, 탄소(C) 함량은 44%로 안정성 및 장기 탄소 격리 효과가 기대되는 수준이었으나 NaCl 함량이 6.1%로 비료공정규격



기준(2.0% 이하)을 초과한 것으로 나타났다. 염분 함량은 가축사육과정과 밀접한 관계가 있고 소금 섭취량이 많은 소의 특성상 분뇨를 통해 다량의 염분이 배출되는 것으로 보고되었다(남 등, 2010). 바이오차의 중금속 함량은 허용 기준 이하였고 우분 바이오차의 중금속 함량은 왕겨 바이오차에 비해 높았다. 이는 Lim 등(2015)이 보고한 바와 같이 바이오차를 제조하는 과정에서 열분해에 의해 원료의 무기 성분이 농축되어 우분 바이오차의 중금속 함량이 높게 나타났다. 소재가 다른 두 바이오차의 입자 크기를 조사한 결과, 왕겨 바이오차는 0.5~2.0 mm범위의 입자가 79.6%였고 반면, 우분 바이오차는 모든 입경 범위에 걸쳐 고르게 분포하였으며, 0.15 mm 미만의 입자가 20.5%로 가장 많았다(표 5).

토양 화학성 분석은 토양 및 식물체 분석법에 따라 음건 후 2 mm 체(sieve)를 통과시킨 시료를 사용하였으며, pH와 EC는 증류수와 5:1 희석하여 전극법으로 측정하고, 유기물은 원소분석기 측정법, 유효인산은 Lancaster법, 교환성 양이온은 ICP-OES(유도 플라즈마 분광분석법)로 분석하였다. 토양 중금속은 토양오염공정시험기준에 따라 토양 시료를 음건 후 0.15 mm 체(sieve)를 통과시켜 염산:질산=3:1로 분해한 후 ICP로 분석하였다. 바이오차의 주요 원소 N, C, Hydrogen(H)은 Vario MACRO cube로 분석하였다.

표 3. 바이오차 화학성

구 분	T-C (%)	T-N (%)	T-H (%)	H:C ratio	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	NaCl (%)	회분 (%)	수분 (%)
우분 바이오차 (CMB)	44.0	1.3	1.2	0.3	2.1	3.3	3.1	1.3	3.3	6.1	46.0	5.3
왕겨 바이오차 (RHB)	54.4	1.0	1.3	0.3	0.1	0.7	0.3	0.1	0.7	1.4	33.7	1.4
허용 기준	≥30	-	-	<0.7	-	-	-	-	-	≤2.0	-	≤30

※ CMB(Cattle Manure Biochar), RHB(Rice Hull Biochar)

표 4. 바이오차 중금속 함량

(단위: mg kg<sup>-1</sup>)

구 분	As	Cd	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
CMB	0.18	0.20	2.17	17.76	76.95	7.61	413.58
RHB	0.03	0.05	0.60	2.75	1.32	1.65	17.61
허용 기준	≤45	≤5	≤130	≤200	≤360	≤45	≤900

표 5. 바이오차 입경 비율

(단위: %)

구 분	≥ 2 mm	1.0~2.0 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.5 mm	0.15~0.25 mm	<0.15 mm
CMB	18.8	14.3	18.2	14.7	13.5	20.5
RHB	3.3	34.8	44.8	10.9	2.7	3.5

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 시설상추 재배시 우분 바이오차 시용효과 검증

우분 바이오차 시용량에 따른 시설하우스 토양 화학성 변화는 표 6과 같다.

표 6. 재배시기별 바이오차 시용량에 따른 시설하우스 토양 화학성 변화

재배 시기	처리내용	pH (1:5)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Ex.cation(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )				T-C (%)	
						K	Ca	Mg	Na		
2023년	봄	CMB 0	6.6	2.58	13	950	0.23	8.7	2.2	0.83	0.86
		CMB 100	6.8	2.77	15	995	0.32	8.8	2.4	1.35	0.99
		CMB 200	7.0	2.56	15	1,020	0.38	8.5	2.3	0.96	1.09
		CMB 300	7.1	2.88	21	1,092	0.62	8.9	2.5	1.13	1.31
		RHB 200	6.7	2.59	18	985	0.29	8.7	2.2	0.79	1.06
	가을	CMB 0	6.8	1.85	15	786	0.42	8.6	2.1	0.53	0.95
		CMB 100	7.3	1.36	17	761	0.54	8.3	2.2	0.50	1.05
		CMB 200	7.4	1.33	20	813	0.69	8.6	2.3	0.54	1.24
		CMB 300	7.6	1.24	23	884	1.01	8.7	2.5	0.58	1.45
		RHB 200	7.1	1.34	20	721	0.43	7.9	2.0	0.48	1.30
2024년	봄	CMB 0	6.8	2.91	14	1,052	0.26	8.7	2.4	1.15	0.82
		CMB 100	7.0	2.04	14	1,088	0.28	8.5	2.2	0.83	0.97
		CMB 200	7.2	2.98	15	1,087	0.39	9.1	2.6	1.41	1.00
		CMB 300	7.2	2.80	15	1,112	0.48	9.0	2.5	1.22	1.06
		RHB 200	7.0	2.64	15	1,064	0.25	8.8	2.3	1.04	1.11
	가을	CMB 0	6.6	3.80	14	969	0.36	7.7	2.0	0.80	1.02
		CMB 100	6.7	3.95	14	963	0.36	7.4	2.1	0.99	0.99
		CMB 200	6.8	3.00	15	962	0.40	6.8	1.8	0.85	1.08
		CMB 300	6.9	3.56	17	975	0.57	7.0	2.0	0.89	1.22
		RHB 200	6.8	2.38	19	972	0.27	6.8	1.7	0.53	1.38
2025년	봄	CMB 0	6.7	1.44	13	937	0.25	7.3	1.9	0.64	0.96
		CMB 100	6.8	1.34	15	935	0.29	7.3	1.9	0.64	0.99
		CMB 200	6.9	1.18	15	943	0.37	7.2	2.0	0.64	1.10
		CMB 300	7.0	1.91	16	952	0.52	7.6	2.2	0.85	1.11
		RHB 200	6.9	1.25	16	913	0.24	7.2	1.8	0.49	1.18
	가을	CMB 0	6.8	2.10	14	942	0.32	7.5	1.9	0.61	0.97
		CMB 100	6.9	2.19	15	960	0.36	7.7	2.0	0.61	1.08
		CMB 200	7.0	2.27	17	961	0.54	7.9	2.3	0.74	1.19
		CMB 300	7.0	2.44	19	967	0.82	8.5	2.4	0.83	1.35
		RHB 200	7.1	1.60	18	951	0.33	7.6	1.9	0.56	1.31
적정범위		6.0-7.0	<2.0	25~35	300~550	0.5~0.8	5.0-6.0	1.5-2.5	-	-	



재배 시기별로 바이오차를 시용한 결과, 우분 바이오차 시용구는 무시용구 대비 토양 pH, 유기물(OM), 칼륨(K), 총탄소(T-C) 함량이 높았으며, 바이오차 시용량이 증가할수록 성분 함량이 증가하는 경향을 보였다. 한편, 우분 바이오차는 염분 함량이 높아 연용 시 토양 내 나트륨(Na) 축적이 우려되어 이를 확인하기 위해 연차별 토양 Na 함량을 조사한 결과, 우분 바이오차 200 kg, 300 kg 10<sup>-1</sup> 시용시 Na 함량은 무시용구 보다 높았으나, 연차별로 뚜렷한 증가세는 관찰되지 않아 우분 바이오차를 6회 연속 시용하였음에도 토양 내 나트륨(Na) 축적은 나타나지 않았다.

바이오차 시용량에 따른 시설하우스 토양 중금속 함량을 분석한 결과는 표 7과 같다. As, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn 함량은 3년 동안 모든 처리구에서 토양오염 우려기준 이하로 나타났다. Zn 함량은 우분 바이오차 시용량이 증가할수록 높아지는 경향을 보였으나 우분 바이오차 300 kg 10a<sup>-1</sup>을 6회 연용한 토양에서 Zn 함량은 177.8 mg kg<sup>-1</sup>으로 토양 오염 우려기준의 60% 미만 수준이었으며 현재 시용 범위 내에서 토양 중금속 오염 위험성은 낮은 것으로 나타났다.

표 7. 연도별 바이오차 시용량에 따른 시설하우스 토양 중금속 함량 (단위: mg kg<sup>-1</sup>)

연도	처리내용	As	Cd	Pb	Cr <sup>↓</sup>	Cu	Ni	Zn
2023	CMB 0	0.78	0.0901	22.6	34.3	26.7	11.1	181.8
	CMB 100	0.64	0.0717	20.2	35.2	24.8	10.9	178.2
	CMB 200	0.63	0.0619	20.3	35.1	26.4	11.3	185.0
	CMB 300	0.57	0.0694	20.4	35.6	28.4	16.3	193.4
	RHB 200	0.51	0.0556	20.5	35.3	24.8	11.2	177.6
2024	CMB 0	0.21	0.1758	22.2	54.4	28.3	15.6	176.7
	CMB 100	0.27	0.2035	21.0	54.5	29.5	14.8	181.8
	CMB 200	0.21	0.1661	20.9	56.2	29.8	15.7	186.3
	CMB 300	0.19	0.1749	21.6	56.0	30.8	15.4	187.5
	RHB 200	0.21	0.1879	21.5	59.1	30.6	24.8	183.8
2025	CMB 0	0.19	0.1324	18.4	34.3	26.8	10.7	170.9
	CMB 100	0.17	0.1157	17.6	33.3	24.8	10.1	172.8
	CMB 200	0.18	0.1248	17.4	32.5	27.2	10.4	173.1
	CMB 300	0.18	0.1334	17.5	31.5	27.6	10.0	177.8
	RHB 200	0.18	0.1284	18.4	35.6	26.2	11.7	172.5
오염 우려기준		≤25	≤4	≤200	-	≤150	≤100	≤300

<sup>↓</sup> Cr: Total Cr



바이오차 시용량에 따른 시설하우스 토양 물리성 분석 결과는 표 8과 같다. 바이오차를 연용한 결과 무시용 대비 용적밀도는 0.7~3.3% 낮고 공극률이 0.5~4.2% 높았지만 처리간 유의한 차이가 인정되지 않았다. 선행 연구에서는 왕겨(Kim et al. 2022), 목재(김 등, 2024), 농업 부산물(장 등, 2016; 장 등, 2023) 유래 바이오차 시용에 의한 토양 물리성 개선 효과가 보고된 바 있다. 그러나 우분 바이오차는 회분 함량이 높고 0.15 mm 미만의 작은 입자 비율이 20.5%로 높아 토양 공극률 개선에 미치는 영향이 상대적으로 제한적이었던 것으로 판단된다. 따라서 우분 바이오차의 토양물리성 개선 효과를 보다 명확히 구명하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

표 8. 연도별 바이오차 시용량에 따른 시설하우스 토양 물리성

연도	처리내용	용적밀도 (Mg m <sup>-3</sup> )	공극률 (%)	토양3상(%)		
				고상	액상	기상
2023	CMB 0	1.53 <sup>ns</sup>	42.2 <sup>ns</sup>	57.8 <sup>ns</sup>	22.8 <sup>ns</sup>	19.4 <sup>ns</sup>
	CMB 100	1.50	43.4	56.6	27.0	16.4
	CMB 200	1.54	41.7	58.3	28.0	13.7
	CMB 300	1.50	43.3	56.7	27.1	16.2
	RHB 200	1.47	44.4	55.6	26.8	17.6
2024	CMB 0	1.58 <sup>ns</sup>	40.5 <sup>ns</sup>	59.5 <sup>ns</sup>	28.0 <sup>ns</sup>	12.5 <sup>ns</sup>
	CMB 100	1.58	40.3	59.7	29.4	10.9
	CMB 200	1.56	41.2	58.8	27.8	13.4
	CMB 300	1.63	38.4	61.6	33.8	4.6
	RHB 200	1.63	38.4	61.6	28.6	9.7
2025	CMB 0	1.52 <sup>ns</sup>	42.7 <sup>ns</sup>	57.3 <sup>ns</sup>	20.8 <sup>ns</sup>	21.9 <sup>ns</sup>
	CMB 100	1.51	43.0	57.0	21.7	21.4
	CMB 200	1.51	42.9	57.1	23.2	19.7
	CMB 300	1.47	44.5	55.5	19.6	24.9
	RHB 200	1.53	42.2	57.8	21.8	20.4

※ 우분 바이오차 처리구 대상 통계분석

바이오차 시용량에 따른 시설상추 봄 재배시 생육특성 및 수량을 분석한 결과는 표 9와 같다. 봄 상추 평균 생육은 엽장이 23.5~24.1 cm, 엽폭이 15.7~16.1 cm, 엽수가 22.2~22.7매로 처리간 유의한 차이가 없었다. 수량의 경우, 우분 바이오차 200, 300 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구가 각각 2,124, 2,136 kg 10a<sup>-1</sup>으로 무시용 대비 각각6% 높게 나타났다.



표 9. 연도별 바이오차 시용량에 따른 시설상추 생육특성(봄 재배)

연도	처리내용	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (매)	생체중 (g 주 <sup>-1</sup> )	수량 (kg 10a <sup>-1</sup> )
2023	CMB 0	25.0	14.8	14.2	185.0	2,056 <sup>b</sup>
	CMB 100	25.1	14.9	14.2	188.0	2,090 <sup>b</sup>
	CMB 200	24.7	15.2	14.7	197.0	2,183 <sup>a</sup>
	CMB 300	24.0	14.7	14.0	183.0	2,037 <sup>b</sup>
	RHB 200	25.6	15.1	13.9	198.0	2,198
2024	CMB 0	22.4	14.5	35.7	181.2	2,014 <sup>b</sup>
	CMB 100	24.0	15.7	34.5	196.2	2,180 <sup>ab</sup>
	CMB 200	23.5	15.2	33.8	193.8	2,153 <sup>ab</sup>
	CMB 300	24.5	15.3	34.7	211.9	2,354 <sup>a</sup>
	RHB 200	23.2	14.9	35.2	192.7	2,142
2025	CMB 0	23.0	18.0	18.3	175.4	1,949 <sup>ns</sup>
	CMB 100	22.8	17.0	18.4	180.6	2,007
	CMB 200	23.4	18.0	18.3	183.2	2,036
	CMB 300	22.3	17.0	18.0	181.4	2,016
	RHB 200	23.6	17.8	18.7	189.2	2,102
평 균	CMB 0	23.5	15.8	22.7	180.5	2,006
	CMB 100	24.0	15.9	22.4	188.3	2,092
	CMB 200	23.9	16.1	22.3	191.3	2,124
	CMB 300	23.6	15.7	22.2	192.1	2,136
	RHB 200	24.1	15.9	22.6	193.3	2,147

※ 우분 바이오차 처리구 대상 통계분석

가을 재배시 생육특성 및 수량을 분석한 결과는 표 10과 같다. 가을 재배 상추의 평균 생육은 엽장이 21.4~22.2 cm, 엽폭이 14.9~15.2 cm, 엽수가 23.9~25.3매 수준으로 나타났다. 수량은 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구가 2,553 kg 10a<sup>-1</sup>으로 무시용 2,470 kg 10a<sup>-1</sup> 대비 4% 높게 나타났다. Jeffery et al.(2011)은 바이오차 시용이 작물 생산성에 미치는 영향을 메타분석한 결과, 평균 약 10%(-28%에서 +39%)의 생산성 증가 효과가 있음을 보고하였으며, 본 연구의 수량 증대 결과도 이와 유사한 경향이였다.

봄·가을 재배 결과를 종합하면, 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구가 두 재배시기 모두에서 수량 증대 효과가 안정적으로 나타났다. 따라서 수량을 기준으로 할 때, 시설 상추 재배 시 우분 바이오차의 적정 시용량은 200 kg 10a<sup>-1</sup>으로 판단된다.

표 10. 연도별 바이오차 시용량에 따른 시설상추 생육특성(가을 재배)

연도	처리내용	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽수 (매)	생체중 (g 주 <sup>-1</sup> )	수량 (kg 10a <sup>-1</sup> )
2023	CMB 0	22.6	17.5	36.1	327.0	3,629 <sup>b</sup>
	CMB 100	24.9	17.1	35.5	327.0	3,631 <sup>b</sup>
	CMB 200	24.5	16.9	38.0	343.0	3,810 <sup>a</sup>
	CMB 300	22.9	16.3	38.1	324.0	3,595 <sup>b</sup>
	RHB 200	24.7	17.0	38.4	366.0	4,066
2024	CMB 0	22.1	15.5	26.3	182.5	2,028 <sup>ab</sup>
	CMB 100	21.0	15.4	26.2	182.5	2,028 <sup>ab</sup>
	CMB 200	22.4	16.2	27.1	189.2	2,102 <sup>a</sup>
	CMB 300	22.1	15.4	24.2	184.1	2,045 <sup>b</sup>
	RHB 200	24.3	16.9	26.6	184.2	2,046
2025	CMB 0	19.8	12.6	9.8	157.8	1,753 <sup>ns</sup>
	CMB 100	19.5	12.7	9.9	147.6	1,639
	CMB 200	19.6	14.0	10.7	157.2	1,747
	CMB 300	19.1	13.0	10.0	154.2	1,713
	RHB 200	19.5	12.4	10.0	152.5	1,695
평균	CMB 0	21.5	15.2	24.1	222.4	2,470(100)
	CMB 100	21.8	15.1	23.9	219.0	2,433(99)
	CMB 200	22.2	15.7	25.3	229.8	2,553(104)
	CMB 300	21.4	14.9	24.1	220.8	2,451(99)
	RHB 200	22.8	15.4	25.0	234.2	2,602(105)

바이오차 6회 연용 후 시험 전후 토양 총탄소(T-C) 함량으로 산정한 바이오차 시용량에 따른 토양 탄소 격리량 및 상관관계는 표 11, 그림 1과 같다. 우분 바이오차를 100, 200, 300 kg 10a<sup>-1</sup>을 6회 연용하였을 때 각각 143, 286, 494 kg C 10a<sup>-1</sup>으로 바이오차 시용량이 증가할수록 토양 탄소 격리량이 증가하였고 우분 바이오차 시용량과 토양 탄소 격리량 간 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.9905로, 매우 높은 정의 상관관계를 보였다. 이는 장등(2023)의 2년 연용시 바이오차 시용량과 탄소 격리량간 결과(R<sup>2</sup>=0.988)와 유사하였고 우분 바이오차가 농경지 토양 탄소 격리 수단으로 활용 가능한 것으로 판단된다.



표 11. 바이오차 시용량에 따른 토양 탄소 격리량

처리내용	T-C(g kg <sup>-1</sup> )		탄소 격리량 (kg C 10a <sup>-1</sup> )
	시험 전	시험 후(6회 연용)	
CMB 0	8.3	9.7	-
CMB 100	8.3	10.8	143
CMB 200	8.3	11.9	286
CMB 300	8.3	13.5	494

※ 토양 탄소 격리량(kg 10a<sup>-1</sup>) =  $SS_{TC} = (T_{\tau d} - NT_{\tau d}) \times SW$

T: 처리구, NT: 대조구,  $\tau$ : 토양 탄소 함량(g kg<sup>-1</sup>)

i: 수확 후 토양 시료채취일

SW: 토양 비중을 고려한 작토층 10cm의 토양 무게(kg 10a<sup>-1</sup>) 130,000 kg 10a<sup>-1</sup>

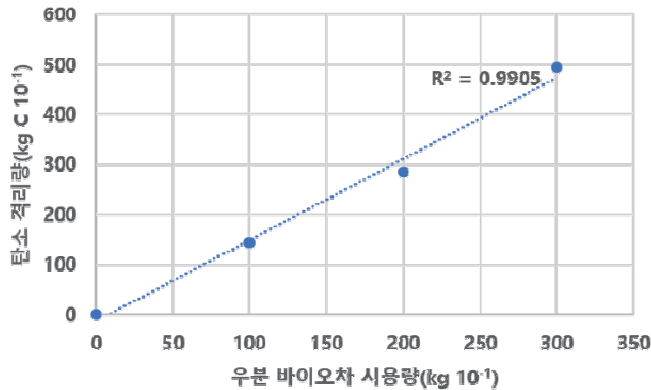


그림 1. 시설상추 재배시 우분 바이오차 시용량과 토양 탄소 격리량의 상관관계

바이오차 시용량에 따른 시설상추 재배시기별 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 평균 배출량을 측정 결과는 표 12와 같다. 봄 재배 시 아산화질소 누적 배출량은 1,815~2,310 g ha<sup>-1</sup> 범위였으며, 가을 재배 시 아산화질소 누적 배출량은 7,854~11,222 g ha<sup>-1</sup>으로, 봄 재배 대비 약 4~5배 높게 나타났다. 이는 가을철의 상대적으로 높은 지온과 토양 수분 조건이 탈질 작용을 촉진하였기 때문인 것으로 판단된다(양 등 2012). 처리별로 살펴보면, 우분 바이오차 시용량에 따라 아산화질소 평균 배출량이 일정한 경향을 보이지 않았으나, 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구의 아산화질소 누적 배출량이 봄 재배 시 1,815 g ha<sup>-1</sup>, 가을 재배 시 7,854 g ha<sup>-1</sup>으로 무시용구 대비 각각 13%, 24% 낮아 두 재배시기 모두에서 가장 뚜렷한 저감 효과를 나타냈다.

표 12. 바이오차 시용량에 따른 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 평균 배출량(2023~2025년)

처리내용	봄		가을	
	일평균 배출량 (g ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )	누적 배출량 (g ha <sup>-1</sup> )	일평균 배출량 (g ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )	누적 배출량 (g ha <sup>-1</sup> )
CMB 0	31.4	2,089(100)	196.0	10,269(100)
CMB 100	34.0	2,310(111)	207.2	11,222(109)
CMB 200	27.7	1,815(87)	152.4	7,854(76)
CMB 300	30.3	2,099(100)	204.1	9,768(95)
RHB 200	27.5	1,847(88)	165.8	8,319(81)

※ 아산화질소 배출량(g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)=  $\rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T$

$\rho$ : 가스 밀도(kg m<sup>-3</sup>), V= 챔버 내 공기체적(m<sup>3</sup>), A= 챔버의 바닥 면적(m<sup>2</sup>),

$\Delta c/\Delta t$ : 챔버 내 가스농도의 평균 증가속도(10<sup>-9</sup> h<sup>-1</sup>), T= 챔버 내 평균 절대온도

#### 나. 노지 작물(옥수수, 배추) 재배시 우분 바이오차 시용효과 검증

우분 바이오차 시용량에 따른 노지 밭 토양 화학성 변화는 표 13과 같다. 재배시기별 바이오차를 시용한 결과, 우분 바이오차 시용구가 무시용구 대비 토양 pH, OM, K, T-C 함량이 높았으며, 바이오차 시용량이 증가할수록 성분 함량이 증가하는 경향을 보였다. 특히 유기물 함량은 우분 바이오차 100 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구에서 무시용구와 유사한 수준이었으나, 200 kg 10a<sup>-1</sup> 이상 시용구에서는 무시용구 대비 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 우분 바이오차는 염분 함량이 높아 연용 시 토양 내 Na 축적이 우려되어 이를 확인하기 위해 연차별 토양 Na 함량을 조사한 결과, 우분 바이오차 200 및 300 kg 10a<sup>-1</sup> 시용 시 무시용구보다 Na 함량이 높았으나, 연차별로 뚜렷한 증가세는 관찰되지 않아 연용에 따른 Na 축적은 나타나지 않았다.

바이오차 시용량에 따른 노지 밭 토양 중금속 함량을 분석한 결과는 표 14와 같다. 우분 바이오차는 원료 특성상 중금속을 함유할 가능성이 있어 연차별 토양 중금속 함량 변화를 조사하였다. As, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn 함량은 3년 동안 모든 처리구에서 토양오염 우려기준 이하였고 시설하우스보다 낮은 수준이었으며, 현재 시용 범위 내에서 토양 중금속 오염 위험성은 낮은 것으로 판단된다.



표 13. 재배시기별 바이오차 시용량에 따른 노지 토양 화학성 변화

재배 시기	처리내용	pH (1:5)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	AvP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Ex.cation(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )				T-C (%)	
						K	Ca	Mg	Na		
2023 년	가을	CMB 0	7.6	0.29	14	373	0.63	6.8	2.3	0.07	0.88
		CMB 100	7.6	0.36	14	360	0.62	6.5	2.4	0.18	0.89
		CMB 200	7.7	0.38	15	403	0.78	6.7	2.4	0.14	0.95
		CMB 300	7.4	0.64	15	372	0.82	6.9	2.4	0.15	0.95
		CMB 500	7.6	0.72	17	375	0.83	6.4	2.5	0.30	1.06
		RHB 200	7.5	0.32	17	331	0.50	6.4	2.3	0.08	1.06
2024 년	봄	CMB 0	7.2	0.31	12	435	0.50	6.2	1.9	0.03	0.79
		CMB 100	7.3	0.31	12	429	0.50	6.3	2.1	0.07	0.76
		CMB 200	7.4	0.35	14	458	0.67	6.4	2.1	0.07	0.92
		CMB 300	7.5	0.38	14	446	0.65	6.5	2.2	0.11	0.91
		CMB 500	7.7	0.42	16	475	0.87	6.3	2.2	0.15	1.01
		RHB 200	7.4	0.32	14	422	0.57	6.5	2.1	0.04	0.90
2024 년	가을	CMB 0	6.8	1.22	12	505	0.42	5.7	1.9	0.07	0.87
		CMB 100	6.9	1.93	12	475	0.49	5.7	2.0	0.13	0.88
		CMB 200	6.9	1.74	13	571	0.56	5.9	2.1	0.19	0.96
		CMB 300	7.1	1.02	16	538	0.65	5.5	2.0	0.18	1.11
		CMB 500	7.4	1.93	18	599	0.84	5.8	2.3	0.43	1.27
		RHB 200	6.9	0.96	15	469	0.46	5.2	1.8	0.07	1.06
2025 년	봄	CMB 0	6.6	0.73	11	538	0.86	7.0	2.1	0.01	0.91
		CMB 100	6.5	0.75	12	495	0.82	6.9	2.1	0.01	0.81
		CMB 200	6.6	0.78	15	610	0.96	7.2	2.2	0.04	1.06
		CMB 300	6.7	0.88	15	595	1.11	7.1	2.3	0.08	1.07
		CMB 500	7.0	1.03	18	625	1.17	7.5	2.4	0.15	1.31
		RHB 200	6.1	0.98	17	499	1.66	6.9	2.3	0.18	1.23
2025 년	가을	CMB 0	6.4	1.61	13	534	0.93	8.4	2.8	0.09	0.90
		CMB 100	6.8	1.37	13	543	0.52	7.1	2.5	0.09	0.94
		CMB 200	6.8	1.53	14	591	0.95	7.5	2.7	0.13	1.03
		CMB 300	7.3	1.83	16	623	0.93	7.3	2.7	0.20	1.15
		CMB 500	7.4	2.62	18	666	1.34	7.5	3.0	0.33	1.28
		RHB 200	6.7	1.69	18	478	0.51	7.1	2.4	0.04	1.30
적정범위		6.0-7.0	<2.0	20~30	350~550	0.5~0.8	5.0-6.0	1.5-2.0	-	-	

표 14. 연도별 바이오차 시용량에 따른 노지 토양 중금속 함량 (단위: mg kg<sup>-1</sup>)

연도	처리내용	As	Cd	Pb	Cr <sup>↓</sup>	Cu	Ni	Zn
2023년	CMB 0	1.17	0.0160	18.4	32.3	20.1	12.1	126.8
	CMB 100	1.14	0.0147	17.1	30.0	18.0	10.9	110.9
	CMB 200	1.14	0.0280	16.9	30.7	20.1	11.5	118.0
	CMB 300	1.13	0.0248	16.1	30.3	18.7	14.6	113.8
	CMB 500	1.19	0.0144	16.0	30.0	17.4	11.1	112.3
	RHB 200	1.12	0.0162	16.9	31.1	18.4	13.7	113.8
2024년	CMB 0	3.23	0.0316	17.3	20.0	21.8	12.5	126.5
	CMB 100	4.16	0.0096	16.2	19.2	18.7	12.8	104.1
	CMB 200	4.07	0.0152	17.2	21.5	21.9	14.7	116.7
	CMB 300	4.48	0.0593	18.1	20.3	20.7	13.2	110.7
	CMB 500	4.52	0.0644	16.6	18.7	20.6	12.7	107.5
	RHB 200	4.14	0.0601	17.2	19.6	17.7	12.6	99.7
2025년	CMB 0	0.11	0.0528	15.2	29.3	19.0	11.0	115.1
	CMB 100	0.10	0.0408	16.3	39.5	18.8	15.6	115.5
	CMB 200	0.11	0.0520	15.2	30.3	20.5	11.7	115.6
	CMB 300	0.11	0.0509	16.1	32.5	21.4	12.2	125.6
	CMB 500	0.10	0.0456	16.4	34.3	22.3	26.6	126.8
	RHB 200	0.10	0.0433	15.3	39.0	17.6	16.0	106.3
오염 우려기준		≤25	≤4	≤200	-	≤150	≤100	≤300

↓ Cr: Total Cr

바이오차 시용량에 따른 노지 발 토양 물리성 분석 결과는 표 15와 같다. 바이오차를 3년간 연용한 결과 무처리 대비 용적밀도는 0.8~6.0% 감소하고 공극률이 0.3~2.8% 증가하였으나 처리간 유의한 차이가 인정되지 않는 것으로 나타나 시설하우스 토양의 물리성 결과와 유사한 경향이였다.



표 15. 연도별 바이오차 시용량에 따른 노지 토양 물리성

연도	처리내용	용적밀도 (Mg m <sup>-3</sup> )	공극률 (%)	토양3상(%)		
				고상	액상	기상
2023	CMB 0	1.49 <sup>NS</sup>	43.6 <sup>NS</sup>	56.4 <sup>NS</sup>	20.8 <sup>NS</sup>	22.9 <sup>NS</sup>
	CMB 100	1.45	45.4	54.6	18.9	26.5
	CMB 200	1.49	43.6	56.4	20.7	22.9
	CMB 300	1.51	43.2	56.8	20.7	22.4
	CMB 500	1.50	43.3	56.7	20.8	22.5
	RHB 200	1.48	44.1	55.9	20.3	23.8
2024	CMB 0	1.54 <sup>NS</sup>	41.9 <sup>NS</sup>	58.1 <sup>NS</sup>	21.7 <sup>NS</sup>	20.2 <sup>NS</sup>
	CMB 100	1.51	43.1	56.9	21.0	22.1
	CMB 200	1.42	46.5	53.5	19.8	26.7
	CMB 300	1.43	46.2	53.8	20.6	25.6
	CMB 500	1.41	46.8	53.2	19.5	27.2
	RHB 200	1.44	54.4	17.4	28.2	45.6
2025	CMB 0	1.33 <sup>NS</sup>	49.8 <sup>NS</sup>	50.2 <sup>NS</sup>	18.2 <sup>NS</sup>	31.6 <sup>NS</sup>
	CMB 100	1.32	50.2	49.8	18.5	31.6
	CMB 200	1.32	50.2	49.8	19.6	30.6
	CMB 300	1.25	52.7	47.3	18.9	33.8
	CMB 500	1.30	50.9	50.4	21.7	27.9
	RHB 200	1.26	52.4	47.6	19.8	32.6

※ 우분 바이오차 처리구 대상 통계분석

바이오차 시용량에 따른 옥수수 생육특성 및 수량을 분석한 결과는 표 16과 같다. 옥수수의 평균 간장, 이삭장, 이삭중은 우분 바이오차 시용구가 무시용구보다 높은 수준이었고 옥수수 수량은 우분 바이오차 시용구가 무시용구(693.6 kg 10a<sup>-1</sup>) 대비 1~5% 증가하였고 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구의 수량이 728.4 kg 10a<sup>-1</sup>으로 가장 높았다. 수량을 기준으로 노지 옥수수 재배 시 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup>를 사용하는 것이 적정할 것으로 판단된다.



표 16. 연도별 바이오차 시용량에 따른 옥수수 생육특성

연도	처리내용	간 장 (cm)	이삭장 (cm)	이삭폭 (mm)	이삭열수 (개)	이삭중 (g 개 <sup>-1</sup> )	수 량 (kg 10a <sup>-1</sup> )
2024	CMB 0	135.5	19.8	40.1	14.4	144.5	606.9 <sup>cd</sup>
	CMB 100	141.6	20.1	39.7	14.4	143.9	604.4 <sup>d</sup>
	CMB 200	139.8	21.1	40.3	14.4	156.0	655.2 <sup>a</sup>
	CMB 300	139.3	20.5	39.3	14.4	148.7	624.5 <sup>bc</sup>
	CMB 500	138.3	20.8	40.1	14.1	152.5	640.5 <sup>b</sup>
	RHB 200	142.4	20.5	40.5	14.3	150.6	632.5
2025	CMB 0	167.2	22.3	41.4	14.1	185.8	780.2 <sup>ns</sup>
	CMB 100	169.6	23.0	41.2	14.5	190.7	801.0
	CMB 200	170.0	22.8	41.7	14.5	190.9	801.6
	CMB 300	170.8	22.9	41.3	14.3	190.1	798.5
	CMB 500	171.3	23.1	41.0	14.7	190.5	800.1
	RHB 200	171.4	23.1	41.3	14.9	193.4	812.3
평 균	CMB 0	151.4	21.1	40.8	14.3	165.2	693.6
	CMB 100	155.6	21.6	40.5	14.5	167.3	702.7
	CMB 200	154.9	22.0	41.0	14.5	173.5	728.4
	CMB 300	155.1	21.7	40.3	14.4	169.4	711.5
	CMB 500	154.8	22.0	40.6	14.4	171.5	720.3
	RHB 200	156.9	21.8	40.9	14.6	172.0	722.4

※ 우분 바이오차 처리구 대상 통계분석

바이오차 시용량에 따른 가을배추 생육특성 및 수량을 분석한 결과는 표 17과 같다. 배추의 평균 초장, 엽장, 엽폭, 생체중, 수량은 우분 바이오차 시용구에서 무시용구와 대등하거나 이를 상회하는 수준을 보여 바이오차 시용이 작물 생육에 부정적인 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 연도별 처리간 수량 차이는 통계적으로 유의하지 않았으나, 우분 바이오차 시용구가 무시용구(6,247 kg 10a<sup>-1</sup>) 대비 4~6% 높은 수준이었고 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구의 수량이 6,620 kg 10a<sup>-1</sup>으로 가장 높은 것으로 나타났다.



표 17. 연도별 바이오차 시용량에 따른 가을배추 생육특성

연도	처리내용	초 장 (cm)	엽 장 (cm)	엽 폭 (cm)	엽 수 (매 주 <sup>-1</sup> )	생체중 (kg 주 <sup>-1</sup> )	수량 (kg 10a <sup>-1</sup> )
2023	CMB 0	49.2	45.9	31.5	81.4	4.14	6,834 <sup>ns</sup>
	CMB 100	50.9	47.4	32.1	81.0	4.16	6,865
	CMB 200	49.7	46.4	31.1	82.3	4.39	7,248
	CMB 300	48.6	45.8	30.6	81.2	4.17	6,884
	CMB 500	49.6	46.9	32.0	83.2	4.21	6,945
	RHB 200	48.4	46.7	31.7	80.0	4.18	6,903
2024	CMB 0	43.7	46.1	30.8	80.8	3.62	5,980 <sup>ns</sup>
	CMB 100	45.1	47.7	32.2	78.4	3.75	6,194
	CMB 200	45.9	48.9	33.1	80.5	4.03	6,653
	CMB 300	46.4	48.7	32.7	78.9	4.01	6,620
	CMB 500	45.7	48.9	32.5	79.0	4.14	6,823
	RHB 200	44.3	47.0	31.2	74.9	3.65	6,029
2025	CMB 0	47.6	49.3	34.6	69.0	3.59	5,928 <sup>ns</sup>
	CMB 100	47.7	48.3	34.0	70.8	3.49	5,763
	CMB 200	46.3	49.1	33.4	70.7	3.61	5,958
	CMB 300	47.8	50.6	35.1	71.0	3.65	6,027
	CMB 500	48.1	49.8	35.2	69.6	3.62	5,978
	RHB 200	47.1	49.1	34.2	70.9	3.55	5,854
평 균	CMB 0	46.8	47.1	32.3	77.1	3.78	6,247
	CMB 100	47.9	47.8	32.8	76.7	3.80	6,274
	CMB 200	47.3	48.1	32.5	77.8	4.01	6,620
	CMB 300	47.6	48.4	32.8	77.0	3.94	6,510
	CMB 500	47.8	48.5	33.2	77.3	3.99	6,582
	RHB 200	46.6	47.6	32.4	75.3	3.79	6,262

※ 우분 바이오차 처리구 대상 통계분석



CMB 0    CMB 100    CMB 200    CMB 300    CMB 500    RHB 200

옥수수



CMB 0    CMB 100    CMB 200    CMB 300    CMB 500    RHB 200

배추

그림 2. 우분 바이오차 시용량에 따른 옥수수 및 배추 생육



바이오차 5회 연용 후 시험 전후 토양 총탄소(T-C) 함량으로 산정한 토양 탄소 격리량 및 상관관계는 표 18, 그림 3과 같다. 우분 바이오차 100, 200, 300, 500 kg 10<sup>-1</sup>을 5회 연용하였을 때 토양 탄소격리량은 각각 52, 169, 325, 494 kg C 10a<sup>-1</sup>로 바이오차 사용량이 많을수록 토양 탄소 격리량이 증가하였다. 우분 바이오차 사용량과 토양 탄소 격리량 간 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.9824로 높은 정의 상관관계를 보여 노지 밭에서도 우분 바이오차가 탄소 격리 효과가 확인되었다. 한편, 바이오차를 같은 양을 사용할 경우, 노지에서의 탄소 격리량이 시설하우스에서 보다 낮은 수준이었고 이는 노지 재배 시 강우, 표면 유출, 바람 등 외부 환경의 영향으로 바이오차 일부가 유실되었을 가능성을 시사한다.

표 18. 바이오차 사용량에 따른 토양 탄소 격리량

처리내용	T-C(g kg <sup>-1</sup> )		탄소 격리량 (kg C 10a <sup>-1</sup> )
	시험 전	시험 후(5회 연용)	
CMB 0	6.7	9.0	-
CMB 100	6.7	9.4	52
CMB 200	6.7	10.3	169
CMB 300	6.7	11.5	325
CMB 500	6.7	12.8	494

※ 토양 탄소 격리량(kg 10a<sup>-1</sup>) =  $SS_{TC} = (T_{Td} - NT_{Td}) \times SW$

T: 처리구, NT: 대조구,  $T_C$ : 토양 탄소 함량(g kg<sup>-1</sup>)

i: 수확 후 토양 시료채취일

SW: 토양 비중을 고려한 작토층 10cm의 토양 무게(kg 10a<sup>-1</sup>) 130,000 kg 10a<sup>-1</sup>

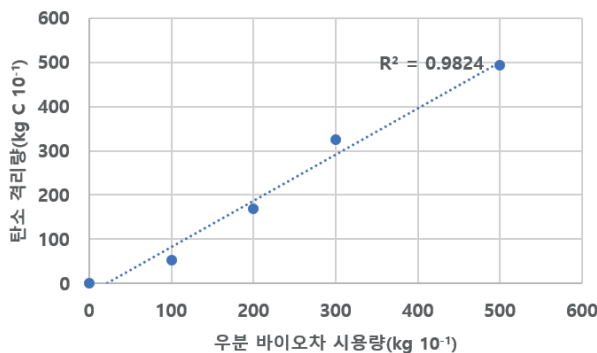


그림 3. 노지 우분 바이오차 사용량과 토양 탄소 격리량의 상관관계



노지 작물 재배시기별 바이오차 시용량에 따른 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 평균 누적 배출량은 표 19와 같다. 봄 재배에서 우분 바이오차 200 kg 10<sup>-1</sup> 시용구의 누적 배출량은 1,725 g ha<sup>-1</sup>으로 무시용구(2,907 g ha<sup>-1</sup>) 대비 41% 감소하였으며, 우분 바이오차 100, 300 kg 10<sup>-1</sup> 시용구도 각각 무시용구 대비 30%, 22% 감소하여 봄 재배에서는 바이오차 시용구 전반에서 아산화질소 배출 저감 효과가 확인되었다. 반면 가을 재배에서는 우분 바이오차 300 kg 10<sup>-1</sup> 시용구가 1,931 g ha<sup>-1</sup>으로 무시용구(2,257 g ha<sup>-1</sup>) 대비 14% 감소하였으나, 이를 제외한 우분 바이오차 시용구에서는 무시용구 대비 증가하는 경향을 보여, 봄 재배와는 상반된 결과를 보였다.

표 19. 바이오차 시용량에 따른 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 배출량

처리내용	봄		가을	
	일평균 배출량 (g ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )	누적 배출량 (g ha <sup>-1</sup> )	일평균 배출량 (g ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )	누적 배출량 (g ha <sup>-1</sup> )
CMB 0	45.5	2,907(100)	44.3	2,257(100)
CMB 100	32.0	2,046(70)	56.4	3,049(135)
CMB 200	27.6	1,725(59)	57.9	3,515(156)
CMB 300	37.5	2,258(78)	37.2	1,931(86)
CMB 500	45.7	2,812(97)	53.2	2,732(121)
RHB 200	45.2	2,799(96)	34.5	1,920(85)

※ 봄(2024~2025년 평균), 가을(2023~2025년 평균)

※ 아산화질소 배출량(g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)= ρ x V/A x Δc/Δt x 273/T

ρ: 가스 밀도(kg m<sup>-3</sup>), V= 챔버 내 공기체적(m<sup>3</sup>), A= 챔버의 바닥 면적(m<sup>2</sup>),

Δc/Δt: 챔버 내 가스농도의 평균 증가속도(10<sup>-9</sup> h<sup>-1</sup>), T= 챔버 내 평균 절대온도

#### 4. 적 요

본 연구는 경기도에서 발생량이 많은 우분을 바이오차 소재로 활용하여, 2023년부터 2025년까지 우분 바이오차 시용에 따른 작물 및 농경지 유형별 효과를 구명하고, 이를 바탕으로 적정 시용량을 제시하고자 수행한 결과는 다음과 같다.

- 가. 시설상추 재배에서 우분 바이오차 시용시 토양 pH, 유기물(OM), 칼륨(K), 총탄소(T-C) 함량이 높았으며, 시용량이 많을수록 증가하는 경향을 보였고 연용에 따른 토양 내 나트륨 축적은 나타나지 않았다.
- 나. 토양 중금속 함량도 모든 처리구에서 토양오염 우려기준 이하로 유지되어 시용 범위 내 안전성이 확인되었고 토양 물리성은 용적밀도 감소와 공극률 증가 경향을 보였으나, 처리 간 유의한 차이는 나타나지 않았다.

- 다. 시설상추의 생육 및 수량은 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구에서 봄·가을 재배 모두 안정적인 증수 효과가 나타났다.
- 라. 토양 탄소 격리량은 바이오차 시용량이 많을수록 증가하였으며, 우분 바이오차 시용량과 토양 탄소 격리량 간 결정계수(R<sup>2</sup>)는 시설재배에서 0.9905로 매우 높은 정의 상관관계를 보였다.
- 마. 아산화질소 평균 누적 배출량은 우분 바이오차 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구에서 봄·가을 재배 시 각각 13%, 24% 감소하여 저감 효과가 가장 뚜렷하게 나타났다.
- 바. 노지작물(옥수수, 배추) 재배에서도 우분 바이오차 시용시 토양 pH, 유기물, 칼륨, 총탄소 함량이 높았고, 시용량 증가에 따라 성분 함량이 증가하는 경향을 보였다. 연용에 따른 토양 내 나트륨 축적은 나타나지 않았다.
- 사. 토양 중금속 함량 역시 모든 처리구에서 토양오염 우려기준 이하로 유지되어 시용 범위 내 안전성이 확인되었고 토양 물리성은 용적밀도 감소와 공극률 증가 경향을 보였으나, 처리 간 유의한 차이는 나타나지 않았다.
- 아. 옥수수 수량이 우분 바이오차 시용구에서 1~5% 증가하였고, 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용구에서 가장 높은 수량을 보였다. 가을배추의 경우에도 바이오차 시용은 작물 생육에 부정적인 영향을 미치지 않았으며, 무시용구와 동등하거나 그 이상의 수량 수준을 나타냈다.
- 자. 노지 밭에서도 토양 탄소 격리량은 바이오차 시용량이 많을수록 증가하였고, 우분 바이오차 시용량과 토양 탄소 격리량 간 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.9824로 높은 정의 상관관계를 보였다.
- 차. 아산화질소 평균 누적 배출량은 봄 재배에서 바이오차 시용구 전반에 걸쳐 22~41% 저감이 뚜렷하였으나, 가을 재배에서는 처리별 반응 차이가 나타나 계절적 환경 요인의 영향을 받는 것으로 판단되었다.
- 카. 우분 바이오차는 200 kg 10a<sup>-1</sup> 시용시 시설 및 노지 조건에서 안정적인 증수와 온실가스 저감 효과가 나타나 우분 바이오차의 작물별 시용 기준 설정 및 농업 현장 적용을 위한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 인용문헌

- 김은혜, 윤건식, 정금재, 이규희, 전유민, 윤철구, 김주형, 이상민. 2024. 바이오차 시용이 시설 재배멜론의 토양 환경 및 생육에 미치는 영향. 한국유기농업학회지. 32(1) : 75-90.
- 기후에너지환경부. 2022. 가축분뇨 발생 및 처리량(사전정보공표).
- 농림축산식품부. 2021. 2050 농식품 탄소중립 추진전략.
- 농촌진흥청 농업과학기술원. 2000. 토양 및 식물체 분석법.
- 농촌진흥청. 2012. 농업과학기술 연구조사분석 기준.
- 남이, 용석호, 송경규. 2010. 우리나라 퇴비의 축종별 성분함량 실태 평가. 한국토양 비료학회지. 43(5) : 644-649.
- 양상호, 강호준, 이신찬, 오한준, 김건엽. 2012. 콩 재배 화산회토양에서 질소시비 수준 및 강우, 온도 환경 변화에 따른 아산화질소 배출 특성. 한국토양비료학회. 45(3) : 451-458.
- 이동준. 2023. 축분 바이오차 생산 및 이용성 연구방향. 한국농공학회. 65(1) : 25-30.
- 이선일, 김건엽, 최은정, 이종식, 정현철. 2018. 밭 토양에서 다양한 바이오차 시용에 따른 이산화탄소 및 아산화질소 감축효과. 유기물자원학회. 26(2) : 11-18.
- 장재은, 박중수, 노안성, 박영수, 강창성. 2016. 경기도농업기술원 연구보고서. 399-412.
- 장재은, 원대진, 임성희, 신민우, 문지영, 남주희, 정구현, 임갑준. 2023. 느타리 수확 후부산물 유기자원화 연구. 경기도농업기술원 연구보고서. 707-743.
- 한경화, 장용선, 정강호, 조희래, 손연규. 2014. 왕겨 바이오차 및 음식물쓰레기 바이오차가 밭 사양토에서 상추밭아 및 수용성 유기탄소 용출에 미치는 영향평가. 농업과학연구지. 41(4) : 369-377.
- European Biochar Certificate(EBC). 2025. Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.
- International Biochar Initiative(IBC). 2015. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil.
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., and Bastos, A. C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144, 175-187.
- Kim Y. S., Kim K. Y., Han J. W., Jeong T. G., Kim M. J., Kim I. J. 2022. Effect of rice hull-derived biochar application on watermelon growth, and soil physico-chemical properties under greenhouse. Korean J. Soil Sci. 55(3) : 175-184.
- Lim J. E., Lee S. S., Ok Y. S. 2015. Efficiency of poultry manure biochar for stabilization of metal in contaminated soil. J Appl Biol Chem. 58(1) : 39-50.

## 6. 연구결과 활용제목

- 시설상추 재배시 우분 바이오차 특성 및 시용효과(영농활용, 2025년)
- 옥수수·배추 밭 재배시 우분 바이오차 특성 및 시용효과(영농활용, 2025년)

## 7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도		
						'23	'24	'25
우분 바이오차의 작물별 최적활용기술 개발	책임자	환경농업연구과	농업연구사	안희정	세부과제총괄	○	○	○
	공동연구자	환경농업연구과	농업연구사	이정혜	세부총괄(23-24)	○	○	-
	〃	〃	〃	정재원	토양분석	○	○	-
	〃	〃	〃	주옥정	온실가스분석	○	○	○
	〃	〃	〃	서재순	자료분석	-	-	○
	〃	〃	〃	장재은	자료분석	-	-	○
	〃	〃	농업연구관	소호섭	성적검토	○	○	○
	〃	〃	박중수	연구자문	○	○	○	