

발간등록번호

11-1543000-002359-01

바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술 개발 및 경제성 · 환경성 평가

최종보고서

2018. 11. 15.

주관연구기관 / (주)포이엔
협동연구기관 / 충남대학교
(주)참그로
(사)대기환경모델링센터

농림축산식품부

<제출문>

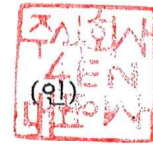
제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술 개발 및 경제성·환경성 평가” (개발기간 : 2015. 8. 15. ~ 2018. 8. 14.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 11. 15.

주관연구기관명 : (주)포이엔 (이호철)



협동연구기관명 : (주)참그로 (윤환헌)



협동연구기관명 : 충남대학교 (오택근)



협동연구기관명 : 대기환경모델링센터 (주승진)



주관연구책임자 : 이호철

협동연구책임자 : 윤환헌, 오택근, 주승진

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라
보고서 열람에 동의합니다.

<본문목차>

< 목 차 >

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 목적	1
제 2 절 연구개발의 필요성	4
제 3 절 연구개발 범위	15
제 2 장 연구수행 내용 및 결과	16
제 1 절 연구수행 내용	16
제 2 절 연구수행 방법	17
제 3 절 연구개발 추진일정 및 체계	38
제 4 절 연구수행 결과	42
제 3 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	250
제 1 절 연구개발 목표	250
제 2 절 목표 달성여부	250
제 3 절 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책	251
제 4 장 연구결과의 활용 계획 등	252
제 1 절 연구결과 활용 계획	252
붙임. 참고 문헌	254

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

- 본 연구는 기후변화 대응기술로 주목받고 있는 바이오숯(biochar)를 활용하여 농작물 6종의 저탄소 작물재배기술을 개발하고 전과정평가, 현장실증을 통한 기술의 경제성 및 환경성 평가를 목표로 함.
- 본 연구는 상기 목표를 달성하기 위해 ①농업부산물 활용 바이오숯 제조기술, ②바이오숯 기반 미생물 담체화 기술, ③바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술, ④Carbon Flux Chamber 활용 탄소흡수 평가기술을 개발하고, 상기 기술개발을 통해 바이오숯 기반 유기질 비료(3종), 작물별 저탄소 작물재배 매뉴얼(1식), Carbon Flux Chamber(1종), 탄소흡수 방법론(1식)의 성과물을 도출하고자 함.
- 바이오숯을 활용한 저탄소 농업기술 개발을 위해 바이오숯 활용시 토양환경에 미치는 영향을 구명하기 위하여 토양 내 질소, 인 등의 양분수지와 생물학적 변화를 모니터링하고, 중금속 오염 토양에서 바이오숯에 의한 중금속 저감 효과를 평가함.
- 또한 기후변화 대응 요구도가 높은 농작물 6종을 선별하고 관행 대비 바이오숯 적용 농법시 농작물의 생산성 증대, 품질 향상 방안을 개발함.



그림 1. 연구개발의 최종목표

- 바이오숯 활용 저탄소 농업기술의 현장 실증을 위해 계약재배 농가들을 대상으로 바이오숯을 현장 적용하여 작업 편의성, 요구사항 등의 정보를 수집하고 작물재배시 관행 대비 농법의 농작물의 생산성, 품질 등을 검증함.
- Carbon Flux Chamber System을 개발하여 현장 실증시 설치, 운용하여 관행 대비 저탄소 농법의 탄소수지를 도출하고 시계열의 탄소 저감량을 검증함.
- 일련의 작물 재배과정 및 결과물에 대한 전과정평가(LCA)를 실시하여 농작물 6종에 적용된 저탄소 농업기술의 경제성 및 환경성을 평가함. 관행 대비 저탄소 농법의 탄소수지, 전과정평가를 통해 농업 분야 탄소오프셋 방법론을 개발함.

가. 세부목표 1. 바이오숯 및 바이오숯 기반 유기질비료 개발

- 농업부산물을 열분해하여 바이오숯으로 재활용하고 이를 원료로 한 유기질 비료를 개발하여 토양 내 탄소 저감, 중금속 저감, 작물 생산성 향상 등 기능성을 부여
- 이를 위해 재배기술별 바이오숯의 적정 입도, 성장(분말/펠릿/비드), 배합비를 도출하고 열분해 기술, 고부가 비료화 기술 개발을 통해 저탄소 농법에 최적화된 바이오숯 및 바이오숯 기반 유기질 비료 3종(범용/기능성)을 개발

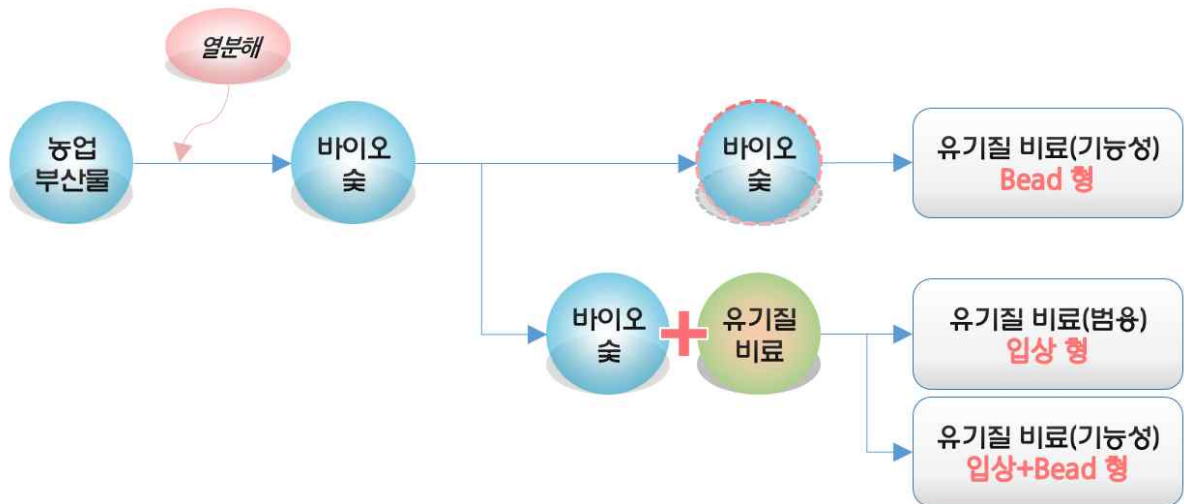


그림 2. 바이오숯 및 바이오숯 기반 유기질 비료 개발

나. 세부목표 2. 저탄소 작물 재배기술 개발

- 바이오숯의 시비형태, 시비량에 따른 토양 내 탄소, 질소, 인 등 영양성분의 변화와 토양 미생물의 변화를 구명하고 토양 내 중금속 저감 효과를 평가함
- 온실재배 기반을 구축하고 관행 대비 바이오숯 처리에 의한 농작물 생육환경(대기/수질/토양)의 변화를 측정, 평가하여 바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술을 개발함
- 기후변화 대응 요구도가 큰 농작물 6종을 선별하고 관행 대비 바이오숯 및 바이오

숯 기반 유기질비료를 적용한 온실 재배에 의한 농작물의 생산성 증대, 품질 향상 등을 평가함



그림 3. 바이오숯 기반 저탄소 농법 개발

다. 세부목표 3. 저탄소 농업기술 LCA 및 탄소흡수 방법론 개발

- 바이오숯 농법의 현장 실증을 위해 농작물 6종의 포장실험으로 농작물의 생산성 증대 및 탄소 저감 효과를 평가함
- CO₂ Flux Chamber System을 개발, 운용하여 토양 호흡량, 작물의 광합성량, 호흡량 등을 연속 측정하며 농생태계(대기-농작물-토양)의 정량적 탄소수지(흡수/배출량)와 농작물 6종의 탄소흡수 방법론을 개발함
- 전과정평가를 통해 관행 농업기술 대비 저탄소 농업기술의 경제성, 환경성을 평가함

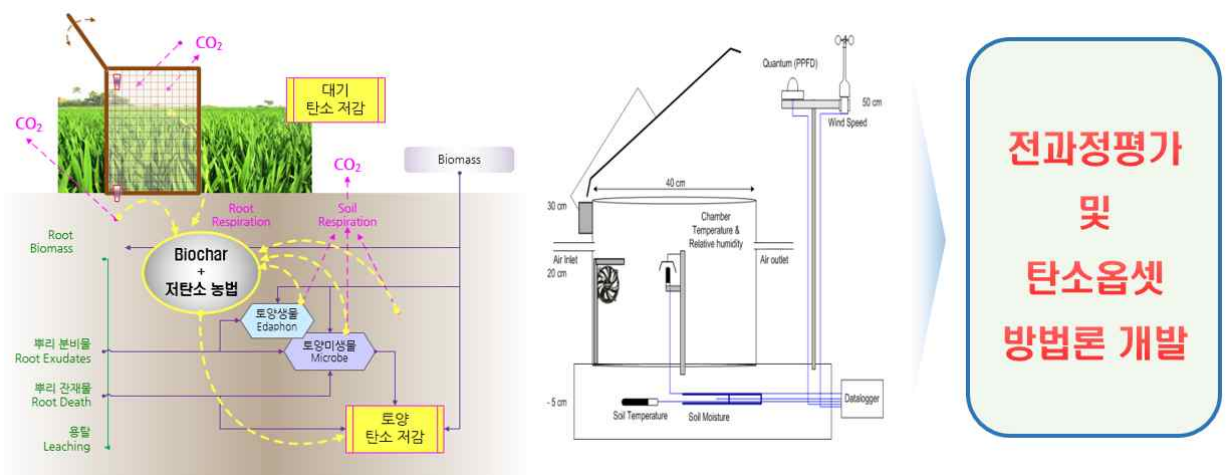


그림 4. CO₂ 챔버 활용 탄소흡수 방법론 개발

제 2 절. 연구개발의 필요성

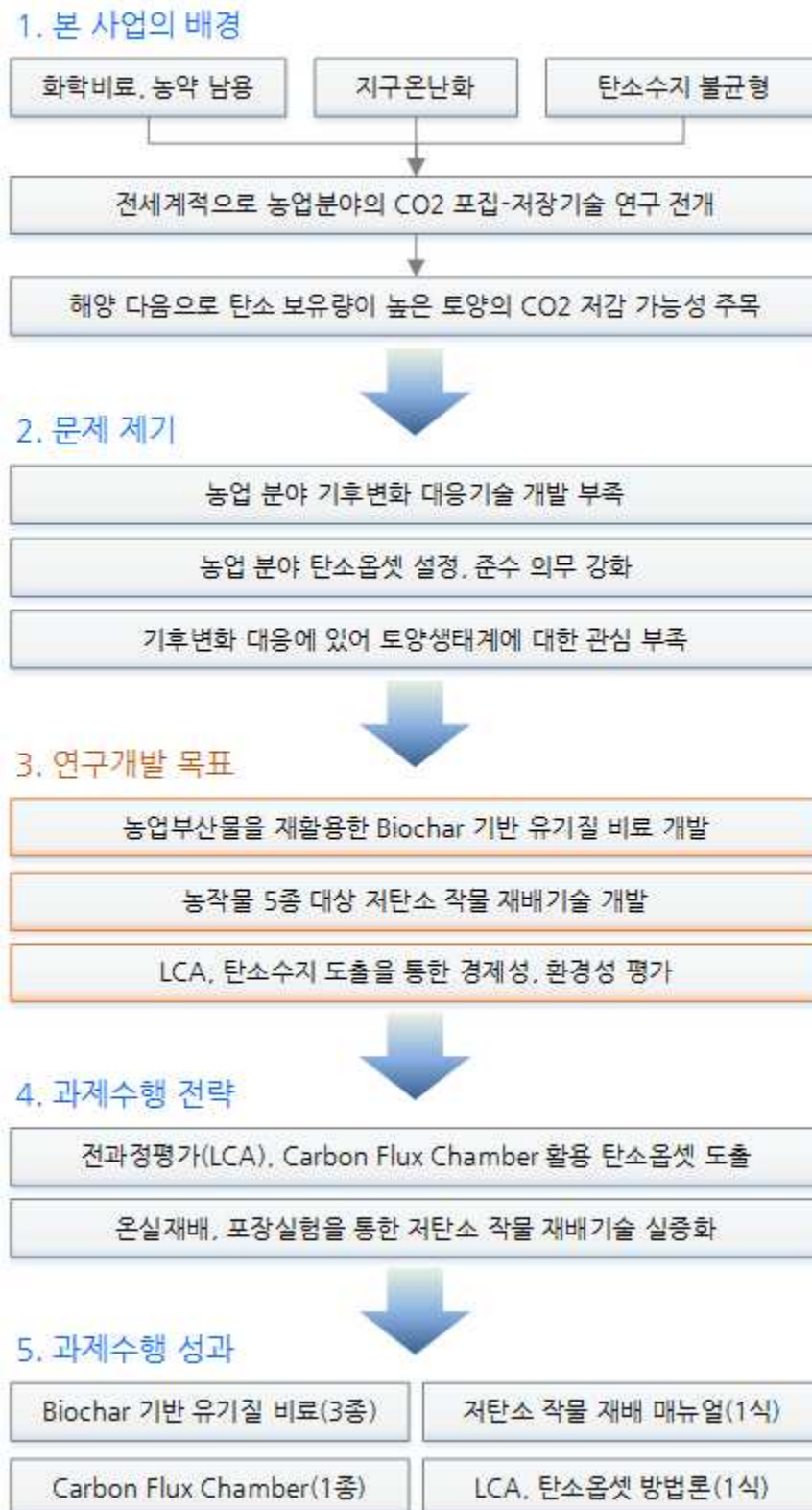


그림 5. 연구개발의 배경 및 필요성

- 대기 중의 CO₂ 상승은 전 세계적인 이슈인 온난화 현상을 초래하였고 이로 인해 지난 100년 동안 약 0.74℃가 상승하여 세기말에는 최대 1.4~5.8℃가 상승할 것으로 예측됨. 지구 온난화로 인한 온도 상승은 태풍, 홍수, 가뭄과 같은 자연재해를 유발하여 식량생산능력 저하는 물론 인명피해, 건물붕괴 등 사회 구조의 붕괴 및 지구생태계까지 붕괴시킬 것으로 예상됨.
- 온실가스로 인한 지구온난화의 심각성이 인식되고부터 이에 대응하기 위한 연구는 물론 국제협약인 기후변화협약으로 시행된 교토의정서 등으로 국제사회에서도 적극적으로 대응하기 시작하는 중이며, 이에 따라 각국 정부에서도 온실가스 감축 목표를 설정하여 기후변화에 대응하고 있음.
- 우리나라는 80년대 이후 급격한 산업화 발전으로 산림지역의 면적이 크게 감소하였음. 감소된 산림지역의 면적은 전체 산림면적의 약 4.7%에 해당하는 4,7043km²로 대부분 공장, 도로, 대지 등 단일 최대 이산화탄소 방출원으로 알려진 도시지역으로 되어 탄소 배출량이 급격하게 증가되었음.
- 이에 우리나라 정부는 1998년부터 기후변화협약대책 위원회를 구성하였고 2008년 기후변화대응 종합기본계획을 수립하여 Low Carbon, Green Growth를 목표로 각 부처에서 기후변화 대응 대책을 추진하였음. 올해부터 시행되는 온실가스 배출권거래제(ETS)로 인하여 공공기관, 지자체 및 기업 등의 CO₂ 감축(BAU 대비 30%) 관련 제품 및 기술개발이 진행되었으며 현재까지도 CO₂ 감축에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음.
- 탄소 순환에 있어 해양의 CO₂ 저장 용량이 가장 크고 그 다음으로 토양의 탄소 저장 용량이 큰 것으로 최근 연구결과로 밝혀져 기후변화에 대응을 위한 토양의 중요성이 인지되고 있음. 토양의 탄소저장 공간 중 특히 산림지, 농경지, 목초지 등과 같이 식생을 포함한 공간이 중요한 탄소 저장원(Carbon Sink)으로 밝혀지며 근래 전 세계적으로 토양과 식생의 탄소수지(Carbon Flux)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음.
- 하지만 생태계 복원을 위한 정부, 기업, 지자체들의 상당한 노력이 있었음에도 해양 복원, 산림복원, 생물 보호 등에 대한 연구개발에 비하여 토양 및 토양생태계에 대한 관심과 연구개발은 상당히 부족한 실정임.
- 토양을 이용한 탄소 저장 방법에 관한 연구는 농작물 생산 방법을 조정하여 탄소 배출량을 저감하거나 바이오숯 같은 난분해성 고탄소 물질을 투입하는 방법 등이 진행되고 있지만 아직까지 실용화되지 않음.
- 농업 분야에서 기후변화 대응 방법은 주로 물 관리나 경운관리를 통한 에너지 저감을 목적으로 시행되어 왔지만 이러한 방법들은 농작물의 생산성을 떨어뜨리거나 농민들이 번거로워하기 때문에 실용화가 어려운 것이 현실임.
- 한편 기후변화로 인한 탄소 발생량 저감 문제뿐만 아니라 2012년 런던협약 시행으로 인한 폐기물의 해양투기가 금지됨에 따라 농업부산물, 음식물쓰레기, 환경폐기물, 폐목재 등 유기성폐자원의 재활용 요구도 급증한 상황임.

가. 저탄소 농법 개발의 필요성

1. 농업 분야 저탄소 기술개발 요구

- 산업혁명 이후 대규모 산업 활동으로 인해 이산화탄소(CO₂)를 비롯한 온실가스의 대기 중 농도가 급격히 증가하여 지구온난화 및 기후변화 문제를 야기함
- 기존의 온실가스 저감방안은 주로 에너지 및 플랜트형 산업공정에서 발생하는 대량의 CO₂, VOCs 배출량 감소에 초점을 두고 있어 농업, 임업, 조경 등과 같은 분야에 적용하기 어려움.
- 우리나라 산업분야별 온실가스 발생량 중 농업축산 분야가 차지하는 비율은 2.5% 정도지만 다른 산업분야와 다르게 온실가스 배출량 감소를 위해 소요되는 비용이 적기 때문에 온실가스 저감효과가 클 것으로 기대되고 있음.
- 현재까지 온실가스 감축을 위해 농업분야에서 노력해왔던 부분은 관수량의 축소, 수확 후 볏짚제거 등과 같은 농법의 개량을 통한 감축이 대부분이었지만 농법의 간소화를 통한 온실가스 감축은 농작물의 생산성 감소의 문제를 야기하기 때문에 농작물의 생산량을 중시하는 농민들은 이와 같은 방법을 선호하지 않음.



그림 6. 벼 재배 방법별 온실가스 감축 효과(출처: 미래환경 웹사이트)

- 따라서 농민이 만족할 수준으로 농작물을 생산함과 동시에 온실가스 방출량을 감소할 수 있는 농법의 개발이 필요함.
- 바이오숯을 토양에 투여하는 것만으로도 탄소 저감효과를 가져다줄 뿐만 아니라, 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성을 개량하여 토양의 기능성을 높여 농작물의 생산량을 증대시키는 효과가 있어 저탄소 농법에 적합함.
- 하지만 국내에서 바이오숯을 활용한 농작물의 재배는 실험실규모의 연구결과가 대부분이며, 이를 경작지에 직접 활용한 연구결과는 아직까지 미비함. 또한 전과정평

가를 통한 바이오숯 활용 농작물 재배의 탄소저감 효과의 구명도 미비한 실정임.

2. 기후변화 대응기술로서 바이오숯의 역할

- 바이오숯¹⁾(biochar)는 바이오매스, 폐자원 등을 열분해(pyrolysis)하여 만든 탄소결정체로서 탄소를 포집, 저장하고 있는 상태로 존재함. 원료로서 투입된 바이오매스 또는 폐자원은 열분해과정을 통해 넓은 표면적과 다공성 물질로 변하게 되고, 이 과정에서 pH의 변화, 비표면적 상승, CEC 향상, C/N률 안정화 등의 변화를 나타냄.
- 바이오숯을 토양에 처리할 경우 1차적으로 장기간 탄소격리 및 온실가스 배출 저감효과가 있고, 2차적으로는 토양의 특성 개량 및 기능 증진 효과를 나타냄. 토양 개량의 경우, 바이오숯의 pH가 높기 때문에 산성토양에 처리하면 pH를 상승시킬 수 있으며, 양분보유능력이 뛰어나 토양 중 함유되어 있는 양분의 유실을 막을 수 있음.
- 많은 토양공학자들은 다양한 특성을 지니고 있는 바이오숯을 다시 토양으로 환원하여 탄소를 격리하면서, 토양 개량 효과를 나타낼 수 있다고 보고하고 있음. 바이오숯은 토양개량 및 식물생육 증진 효과뿐만 아니라 기후변화 대응효과도 볼 수 있는 중요한 물질로서 연구되고 있음.
- 미국의 농림부 과학기술 연구재단의 연구 결과에 따르면, 기후변화 대응 온실가스 저감을 위해 10년에 한번 농경지에 바이오숯을 처리할 경우 CO₂는 43kg/ha/yr 저감되고, N₂O의 발생량은 약 50-80% 저감된다고 보고하였음.

1) 바이오숯: biomass를 포함한 환경에 유해하지 않는 유기성 폐자원을 무산소 또는 최소한의 산소공급 하에서 열분해한 char를 말한다. 산소가 공급되지 않는 열분해 과정 동안 유기성폐자원은 소각과는 달리 이산화탄소(CO₂)가 발생하지 않으며 열분해가 끝난 char에는 고정탄소가 풍부해진다. 이를 토양에 처리하여 탄소격리의 효과를 얻을 수 있다. 또한 열분해 과정동안 생성되는 bio-gas 및 bio-oil을 재사용함으로써 carbon-zero의 상태를 유지할 수 있는 효과를 볼 수 있다.

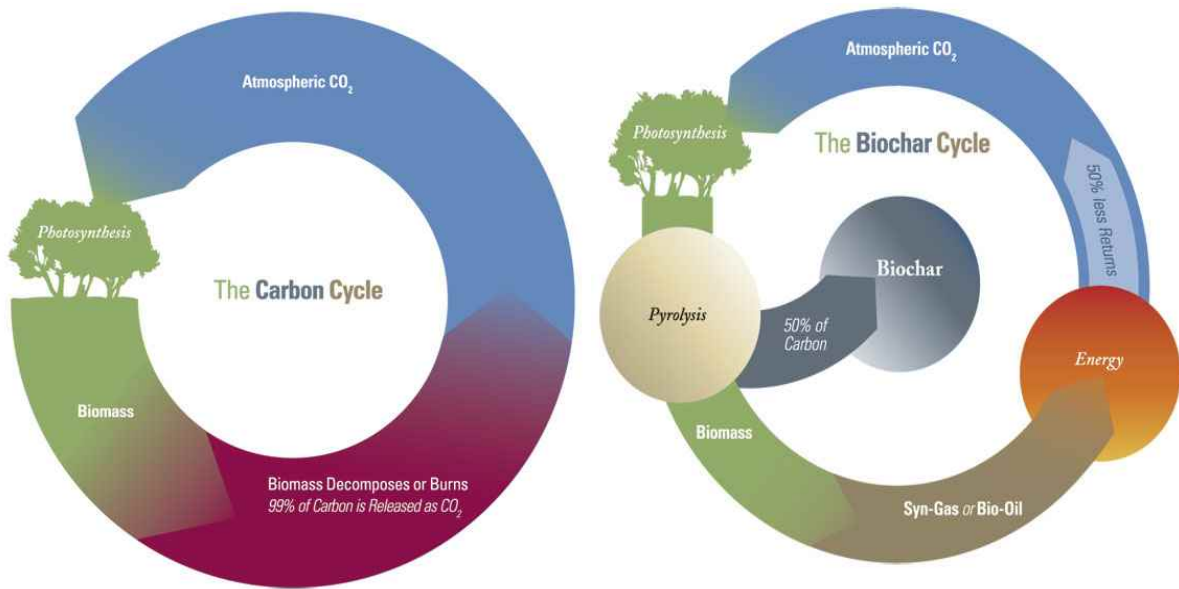


그림 7. 일반 탄소순환(좌)과 바이오숯 적용시 탄소순환(우) 모식도(출처: Environchar 웹사이트)

- 또한 바이오숯의 높은 표면적과 다공성으로 CEC가 높아 질소, 인 및 중금속의 고정능력이 뛰어나 골프장, 매립지 등 특수한 조경지역에서 발생할 수 있는 토양 및 수질오염 문제를 최소화 할 수 있음.
- 현재 바이오숯 관련 산업은 미국, 중국, 일본을 중심으로 조경용 토양개량제 산업, 원예용 상토 산업 등으로 발전하는 중이고, 탄소 격리 및 온실가스 배출 저감 산업까지 그 영역을 확대할 수 있음.
- 현재까지 알려진 바에 따르면 바이오숯은 원재료와 열분해 처리 온도에 따라 물질의 구성 및 특성이 달라지므로, 원료별 적정처리 온도에 대한 연구와 이를 검증하기 위하여 생산된 바이오숯을 이용한 토양처리 실험 및 작물 생육실험이 필요하고 농작물 생산을 위한 바이오숯의 활용이 실제 탄소 배출량 저감에 효과가 있는지 검증 또한 수행되어야함.
- 바이오숯의 토양 특성 개량, 오염물질 흡착 및 안정화, 농작물의 생산량 증대 등 다양한 효과가 연구 결과를 통해 입증되었지만 바이오숯 원료의 수급 및 경제성 평가가 제대로 이루어지지 않아 아직 실용화 및 보편화 단계까지 도달하지 못함.

3. 탄소저장원으로서 토양의 역할

- 온실가스는 주로 점발생원(point source)인 에너지 및 산업공정에서 발생하고 있어 국내외적 대부분의 연구, 기술도 대규모 에너지 및 산업공정을 대상으로 함. 국내에서 수행되고 있는 탄소저감 기술들도 조선, 화학, 물류 관련업체, 관공서와 같이 규모가 큰 산업을 중심으로 기존 산업 공정을 전환 및 수정하여 CO₂ 발생을 저감하는 것에 초점을 맞추고 있음.
- 현재까지 연구 개발된 기술 중 탄소저감에 가장 기여도가 높은 기술인 CO₂ 포집

및 저장기술(Carbon dioxide Capture & Storage, CCS)은 석탄, 석유 등의 화석연료의 연소시 발생하는 CO₂를 포집·회수하여 이를 지하 또는 해양에 저장하는 기술임. IPCC 보고서에 따르면 CCS 기술은 향후 2100년까지 전 세계 CO₂양을 최소 15%에서 최대 55%까지 저감시킬 수 있다고 하여 탄소저감에 대한 기대치가 상당히 높은 기술임.

- CCS 기술의 시장 규모는 20년 후 세계적으로 550조원으로 성장할 것으로 예상되고 있으며 미국, 유럽, 일본 등의 선진국들은 90년대부터 이미 CCS에 대한 연구개발을 진행하여 곧 실용화될 것으로 전망하고 있음(출처: 국가 CCS 종합 추진계획, 2010, 녹색성장위원회).
- 하지만 CCS기술의 목표는 조선, 화학 등의 대규모 산업단지를 대상으로 하기 때문에 비점발생원(non-point source)인 농업, 조경 및 가정에 적용하기 어렵고 또한 설비 구축과 기술적 어려움은 CCS기술의 단점임.
- 대기 중의 CO₂ 상승의 주범은 화석연료의 연소로 연간 5.5Gt가 대기 중으로 방출되고 있음. 현재 토양에서 발생하는 탄소의 양은 약 78Gt으로 화석연료의 연소로 발생하는 CO₂의 양의 10배 이상임. 따라서 토양에서 배출되는 CO₂의 양을 10%만 줄이면 화석연료에 의한 CO₂ 배출량을 상쇄할 수 있음.

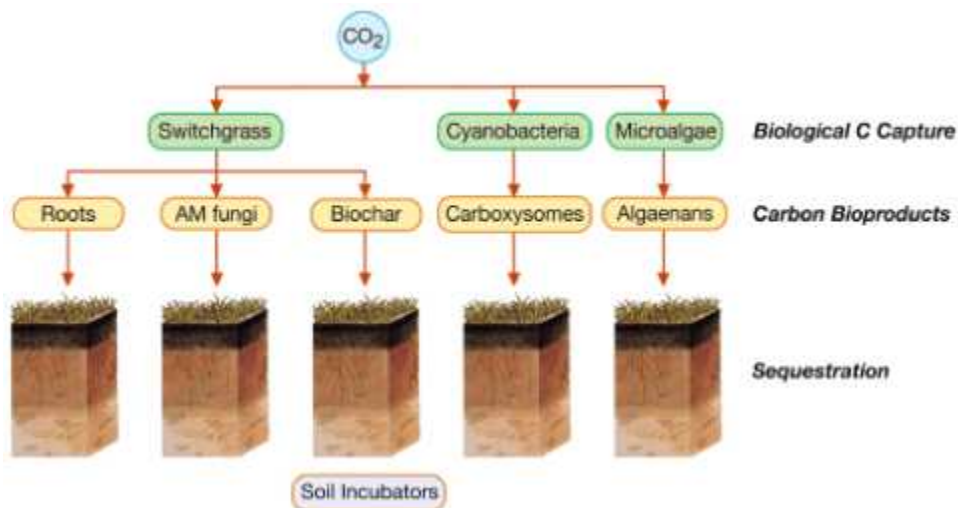


그림 8. CO₂ 흡수원으로서 토양생태계(출처: Earth sciences division 웹사이트)

4. 바이오매스, 폐자원 재활용

- 2013년도 기준 총 폐기물 발생량(지정폐기물 제외)은 1일 382,081톤으로 2010년도 부터 증가하는 추세임. 이 중 생활폐기물과 사업장 폐기물은 각각 48,728, 149,815톤으로 1일 총 발생량 중 52%를 차지하고 있음.



그림 8. 연도별 폐기물 발생량 변화추이(출처: 한국폐기물협회 웹사이트)

- 또한 런던협약의 시행으로 지난 2012년부터 「육상폐기물 해양배출 제로화 추진계획」의 수립으로 폐기물의 자원화에 대한 중요성이 부각되고 있어 폐기물의 재활용과 관련된 연구개발에 대한 정부의 적극적인 지원이 진행 중에 있음.
- 농촌진흥청 조사에 따르면 볏짚, 왕겨, 작물의 줄기 등과 같은 농업부문의 바이오매스 발생량은 연간 1,100만 톤 이상이고, 국내에서는 이러한 농산 바이오매스를 바이오에너지로 활용하기 위한 연구가 진행 중임.
- 바이오에너지는 폐기물을 변환시켜 연료 및 에너지를 생산하는 기술로 이와 관련된 국내의 시장규모는 2002년 기준 에너지절약분야(1,000억원/년)와 대체에너지분야(4,600억원/년)등을 포함하여 연간 약 6,000억 원 이상일 것으로 추정됨(KISTI, 2013).
- 또한 정부는 2009년 ‘폐자원 및 바이오매스 에너지대책 실행계획’을 발표하며 계획수행을 위해 2020년까지 신재생에너지 연구개발에 10조4천억 원을 투자할 계획임.
- 현재 국내 연구기관, 관련 업체에서 연구개발 중인 유기성 폐기물자원은 농어업부산물, 음식물쓰레기, 하수슬러지 등으로 폐자원을 에너지화하거나 재활용하는 사업들이 진행 중임. 또 이러한 폐기물 자원을 재활용하는 기술들이 정부지원에 의해 다수 R&D 진행 중에 있음.
- 하지만 유기성 폐기물자원 재활용 관련 사업들은 ‘온실가스 저감’이라는 전제를 고려하지 않고 진행되고 있음. 이러한 사업들은 주로 폐기물 수거, 분류, 소각, 일부 재사용(re-use)하여 폐기물의 순환을 도모하는 수준이며 재활용 과정 중의 전과정평가(LCA)나 최종 산물의 CO₂ 저감량 도출에 관한 결과들이 없는 경우가 많음.
- 현재 국내의 폐자원 및 바이오매스 재활용 기술들은 대부분 R&D 진행 중이거나

실용화 단계에 있지만 국내 여건과 맞지 않아 실용화에 어려움이 있고 적용대상이 한정적이기 때문에 다양한 분야에 적용이 가능하고 보편성과 활용성을 위한 기술 개발이 필요한 실정임.

- 농업부산물의 재활용은 발효, 배합 처리를 통해 퇴비화하거나 혐기소화하여 메탄가스 혹은 바이오디젤을 추출하는 기술이 개발되고 있으나 현재 개발단계에서는 품질, 상품성이 떨어지고, 산업화가 어려워 국내 실정과는 맞지 않다는 의견이 다수임.
- 폐자원을 재활용하는 기술 중 바이오숯(biochar)은 폐자원을 산소가 없는 조건에서 열분해하여 탄화된 산물인 반영구적인 고탄소 물질임. 최근 폐자원의 활용, 기후변화 대응, 에너지 생산, 토양개량 등의 목적으로 연구 및 활용되고 있음.
- 바이오숯에 대한 연구는 대체에너지라는 측면보다 생태복원 및 작물생산량 증대를 위한 토양재료로서 미국, 유럽 등 선진국은 물론 일본, 중국 등에서도 활발하게 진행되고 있음. 특히 농업, 조경, 건설 분야에서 바이오숯의 활용 가능성이 높을 것으로 판단됨.

가. 전과정평가 및 탄소흡수 도출의 필요성

1. 탄소수지 도출

- 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인에서는 농업, 산림 및 기타 토지이용 부문에서 온실가스 인벤토리 준비를 위한 지침이 명시되어 있으며, 주거지로 분류된 토지에서의 탄소축적변화, 바이오매스, 고사유기물, 그리고 토양탄소 변화와 관련된 온실가스 배출 및 흡수를 평가하는 방법을 다루고 있음(IPCC, 2006)
- 주거지에서의 탄소 저장원은 지상부 및 지하부 바이오매스, 고사유기물, 그리고 토양으로 구분할 수 있으며, 이산화탄소 배출 및 흡수 기작은 목본류 및 다년생 초본류를 포함한 바이오매스, 고사유기물, 토양의 탄소축적량 변화로 평가됨(IPCC, 2006)
- 주거지 관리가 토양탄소에 미치는 영향에 대한 평가는 도시가 차지하는 비율이 크거나 확대속도가 큰 국가에서 특히 중요하며 무기토양의 경우 주거지의 토지이용과 관리가 토양탄소 축적에 미치는 영향은 대조군 지역과 주거지 관리 수준에 따른 축적의 차이로 평가됨(IPCC, 2006)
- 미국 애틀란타, 볼티모어, 보스턴, 시카고, 오클랜드, 시라큐스 등 주요 6개 도시에서의 지상부 바이오매스, 토지이용, 토양유기탄소를 도시별로 평가한 사례가 있으며 일본의 경우 동경시 9개소의 도시공원을 대상으로 3개의 수종별 토양탄소함량을 초지/잔디밭, 식생 관리(잡초 및 낙엽 제거)를 적용한 수목 식재 지역, 식생 관

리를 적용하지 않은 잡목 또는 수목 식재 지역, 황폐지(나지) 등의 4가지 유형으로 분류하여 측정한 사례가 있음.

- 국내에서는 식생과 토양이 연계된 지상부 및 지하부 탄소 흡수능 평가에 관한 연구가 빈약한 실정임. 주로 도시 인근 및 산림 내 천연림과 인공조림지에서의 지상부 및 지하부 탄소 저장량 추정에 관한 연구가 대부분이며, 탄소순환 및 탄소수지에 관한 연구에서 순1차생산량(NPP, net primary production) 및 토양호흡에 관한 단기측정 연구가 중심을 이루고 있음.
- 또한, 우리나라의 경우는 CO₂ flux의 모니터링뿐만 아니라, 생태계 탄소수지 평가 자료를 종합적으로 해석하고 거기에서 얻은 결과를 토대로 기능적인 생태계복원모델 등에 적용시킨 예가 거의 없음.
- 식생과 토양을 중심으로 한 녹지 유형별 지상부 및 지하부 탄소 저장량 평가체계를 구축하기 위한 기초자료 확보가 필요한 실정임.
- 이와 더불어 탄소 및 오염저감을 통한 생태계 기능 증진을 위한 식생기반 조성모델의 계획·설계를 위해서는 식생 및 토양에서의 탄소흡수량, 탄소수지 도출 등의 연구가 필요함

2. 탄소, 오염저감 및 토양생태복원 평가

- 육상생태계는 지구규모의 탄소순환 모델에 있어서 중요한 구성분이고 지구의 기후 시스템에 아주 중요한 역할을 함
- 대기 중의 이산화탄소 약 10%에 이르는 많은 양의 이산화탄소가 토양으로부터 발생되며, 화석연료 소비에 따른 이산화탄소의 방출보다 약 10배 이상임
- 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인에서는 농업, 산림 및 기타 토지이용 부문에서 온실가스 인벤토리 준비를 위한 지침이 명시되어 있으며, 주거지로 분류된 토지에서의 탄소축적변화, 바이오매스, 고사유기물, 그리고 토양 탄소 변화와 관련된 온실가스 배출 및 흡수를 평가하는 방법을 다루고 있음(IPCC, 2006)
- 주거지에서의 탄소 저장원은 지상부 및 지하부 바이오매스, 고사유기물, 그리고 토양으로 구분할 수 있으며, 이산화탄소 배출 및 흡수 기작은 목본류 및 다년생 초본류를 포함한 바이오매스, 고사유기물, 토양의 탄소축적량 변화로 평가됨(IPCC, 2006)
- 주거지 관리가 토양탄소에 미치는 영향에 대한 평가는 도시가 차지하는 비율이 크거나 확대속도가 큰 국가에서 특히 중요하며 무기토양의 경우 주거지의 토지이용과 관리가 토양탄소 축적에 미치는 영향은 대조군 지역과 주거지 관리 수준에 따른 축적의 차이로 평가됨(IPCC, 2006)
- IPCC 가이드라인 상의 토양 부분에 해당하는 Soil carbon(mineral soils/organic

soils), 목본 및 초본의 Dead organic matter(DOM; dead wood/litter), 의 현존량 추정에 관한 선행연구가 부족한 실정임

- 토양생태계 복원에 있어서 대상지 특성별 토양층 조성과 이를 기반으로 한 종합적인 식재모델 및 계획·설계 기법 개발을 위해서는 생태계의 기능 평가가 필요함
- 탄소를 저감시키는 생태복원을 이루기 위해서는 생태계의 탄소순환 체계를 바탕으로 도시생태계의 탄소수지를 정량화하는 것이 필요함

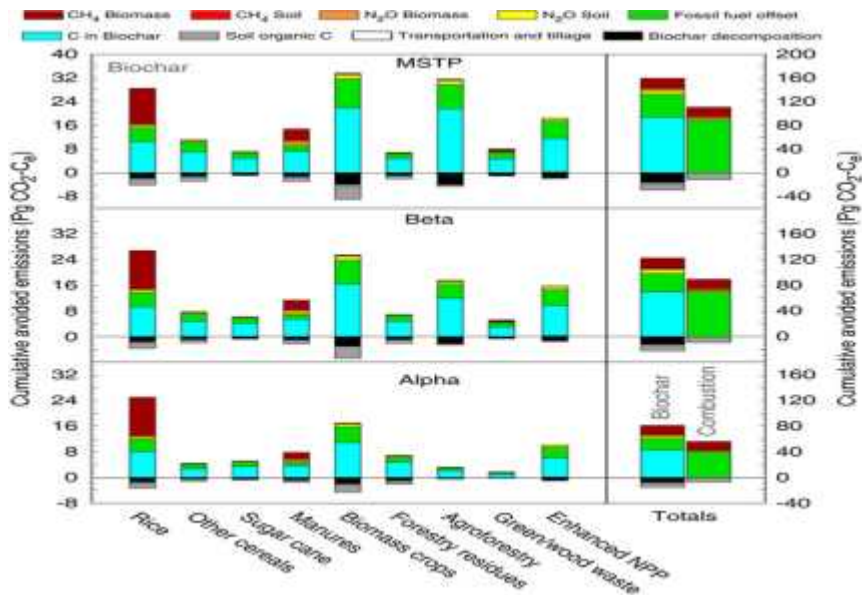


그림 9. 바이오숯의 온실가스 저감 연구결과(출처: Woolf et al., 2010)

3. 전과정평가 및 환경정책 제시

- 농업 분야에서도 다양한 특허, 녹색기술, 환경신기술 개발에 애써왔지만 현재까지 개발된 기술들은 실제 농가에 적용하거나, 사업화하는데 어려움이 따름. 특히, 기후변화 대응 기술개발을 위한 정부의 지원이 있었음에도 불구하고 대부분의 사업들은 시제품 제작단계에서 그쳐 상업화 및 사업화 단계까지 진행되지 않음(윤무섭, 2009).
- 우리나라 기후변화 대응 기술들이 실용화 되지 못하는 이유는 기술개발 업체들의 시장진입을 위한 초기 투자비용에 대한 부담감이나, 개발된 기술에 대한 불완전한 평가 등으로 인하여 초기 시장 진입에 난항을 겪고 있기 때문임.
- 따라서 저탄소 농법의 실용화 및 보편화를 위하여 철저한 시장조사는 물론 국내 실정에 적합한 방향으로 기술 개발이 진행되어야하기 때문에 기술에 대한 객관적인 평가가 저탄소 농법의 실용화에 가장 필수적인 요소라 판단됨.
- 농민들의 기대치에 부합할 만한 농작물의 생산량 증대뿐만 아니라 환경 관련 법·제도 및 정책 체계상에서 기후변화 대응 기술의 현실 적용 가능성 여부에 대한 검토가 필요함. 또한 해당 사업 및 정책이 활성화되기 위한 개선방안을 마련하여 보

다 효율적인 사업화를 위한 정책방안을 제공하여야 함.

- 우리나라 전과정평가 기술들은 대부분 공업, 산업 분야에서 이뤄지고 있고 아직 농업 기술에 대한 전과정평가가 보편적이지 않음. 하지만 기후변화 대응 기술의 경우 전과정평가는 개발된 기술에 대한 환경성 평가와 친환경 인증을 위해 필수적임.
- 본 연구에서 수행될 저탄소 농작물의 생산, 생육환경 변화 연구, 탄소 저감 등을 위해서는 현장 적용시 비용/효과 등을 종합적으로 고려해야만하고 일부 지역에 국한된 결과뿐만 아닌 기술이 전국적으로 적용되었을 때의 경제적, 환경적 평가가 필요함.
- 본 연구 개발된 기술이 국내 실정에 적합하고 경제적, 환경적 측면에서도 긍정적인 효과가 있다면 보편화를 위해 제품화 및 사업화뿐만 아니라 환경정책과 같은 정부의 지원이 필요함.
- 현재 농민들은 경제적인 이득을 우선시하고 농업분야에서 기후변화 대응 기술의 필요성을 인식하지 못하고 있으므로 본 연구에서 개발된 기술이 경제적인 이득을 극대화하지 못하거나, 기존 제품들과 큰 차이를 보이지 못한다면, 기술의 보편화 및 사업화에 어려움이 따를 것임.
- 본 연구에서 개발된 기술이 보편화 및 사업화되기 위해서는 정책제안을 통하여 농민들에게 기후변화 대응의 필요성과 이를 통한 경제적인 이득 창출 방법 등을 제시해야함.

제 3 절 연구개발 범위

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
바이오차 특성 분석	농촌진흥청 분석방법을 기준으로 분석(실험적)	- 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석방법(2000)을 참고하여 바이오차의 pH, EC, 유기물, 유효인산, 교환성 양이온, 중금속 등을 분석함
바이오차 표면 특성	국내·외에서 주로 사용되는 장비 및 프로그램으로 분석(실험적)	- 바이오차 표면은 SEM/EDX를 이용하여 바이오차의 표면을 관찰하고, 표면의 원소 분포 등을 분석함.
바이오차 입단화	바이오차 분말을 bead 및 pellet 형태로 제작(실험적)	- 분말형태의 바이오차를 사용하기 쉽게 bead, pellet 형태로 제작함. - 해조류 추출물을 이용한 bead 제작에는 다양한 배합비 및 원료로 bead를 제작하고, pH, EC, 건조특성 및 직경 등을 조사함. - 바이오차는 리그닌 성분이 부족하여 단일로는 펠릿 강도가 약하여, 이를 보완하기 위하여 바인더를 첨가하여 pellet을 제작함.
바이오차 기반 유기질 비료 개발	바이오차를 중심 원료로 유기질 비료 배합(실험적)	- 바이오차에 피트모스, 황토 등을 다양한 배합비로 배합하여 유기질비료의 시편을 제작하여 pH, EC, 유기물, 유효인산 등 특성 조사를 진행함.
국내외 저탄소 농업 관련 문헌조사 및 기술 분류	국내 학술지 및 보고서 등을 분류(이론적)	- 2015년까지 국내에 발표된 총 1,865편의 학술지, 보고서, 학위논문 결과를 농업기술실용화재단(2012)에서 분류한 저탄소농업 기술 분류 방법을 참고하여 분석
현장평가 농가 수배	작물 재배에 적합한 환경의 농가 조사(이론적)	- 바이오차를 처리하고 농작물을 원활하게 관리할 수 있는 농가를 조사함. - 일부 농가는 제품화되지 않은 바이오차를 토양에 처리하는 것에 부정적으로 반응함.
CO ₂ flux 챔버 개발 및 성능 테스트	자동 CO ₂ flux 관측 챔버 시스템 개발 및 제작(실험적).	- 농작물 및 토양에서 발생하는 CO ₂ 측정에 적합한 조건(크기, 센서, 주기 등)을 만족하는 CO ₂ flux 관측 챔버 구상 및 제작.
자동 CO ₂ 챔버 운용, 모니터링	야외 현장 실험 사이트에 안정적인 CO ₂ flux 자동 측정용 챔버 시스템 개발 적용과 환경인자 모니터링 관측 (실험적).	- 야외 실험사이트에서 시계열에 따른 자동 CO ₂ flux 챔버 시스템과 환경인자(광량, 기온, 습도, 지온, 토양수분)의 연속적인 모니터링 관측수행의 안정성과 원활한 운영.
챔버 및 환경인자의 시계열 측정자료 분석 및 탄소수지 평가	자동 관측 기기로부터 시계열 자료의 저장 및 측정 자료 분석 결과를 통한 정량적 CO ₂ flux 도출(실험적).	- 바이오차 적용 및 비적용(대조구)에 따른 농생태계(대기-농작물-토양)의 CO ₂ 교환 프로세스와 탄소순환을 정량적으로 관측하고, 측정 자료 수집 및 정량적 분석과 평가.

제 2 장 연구수행 내용 및 결과

제 1 절 연구수행 내용



그림 10. 연구개발 내용(전체) 모식도

제 2 절 연구수행 방법

가. 1세부: 바이오숯 개발

- 농업부산물을 열분해하여 바이오숯으로 재활용하고 이를 원료로 한 유기질 비료를 개발하여 토양 내 탄소 저감, 중금속 저감, 작물 생산성 향상 등 기능성을 부여
- 이를 위해 재배기술별 바이오숯의 적정 입도, 성상(분말/펠릿/비드), 배합비를 도출하고 열분해 기술, 미생물 담체화 기술 개발을 통해 저탄소 농법에 최적화된 바이오숯 및 바이오숯 기반 유기질 비료 3종(범용/기능성)을 개발

1. 농업부산물(원료) 선별 및 열분해 조건 탐색

- 원료의 선별조건 및 방법

- 1) 기존 연구결과들을 사전 조사하여 원료 수급가능 여부(발생량, 발생 시기, 발생특성 등), 바이오숯의 수율, 농작물 생산의 적합성 등의 원료 선정 조건을 확립하고 선별된 원료들은 특성 분석을 통해 바이오숯 제작의 적합성 여부를 판단함.
- 2) 무기탄소와 함께 유기탄소도 저장되는 바이오숯 특성을 감안하여 바이오숯의 사용목적(탄소저감, 작물생육, 토질개선 등)에 맞는 원료를 선정하고 열분해 적정 조건 탐색이 가능해야 함
ex) 왕겨를 열분해한 바이오숯의 경우 치환성 K, Si가 풍부하게 함유되어 있음
- 3) 열분해 진행시 발생하는 신재생에너지(bio-gas, -oil, -char) 가운데 바이오숯의 생산수율이 높도록 비교적 낮은 온도에서 반응하는 원료를 탐색
- 4) 원료의 단가가 저렴하고 물량 공급이 원활할 것
- 5) 농·원에 분야에서 유기질 비료로서 사용편의성, 활용성과 작물 재배 적용범위가 넓어야 함

- 국내에서 발생하는 농산부산물들 중 바이오숯으로 이용가능하고 대량으로 수급 가능한 농산부산물을 선별함.
- 무기탄소와 함께 유기탄소도 저장되는 바이오숯의 특성을 감안하여 바이오숯의 사용 목적(탄소저감, 작물생육, 토질개선 등)에 맞는 원료를 선정함.
- 열분해 진행시 발생하는 신재생에너지 가운데 바이오숯의 생산수율이 높도록 비교적 낮은 온도에서 반응하는 원료를 탐색함.

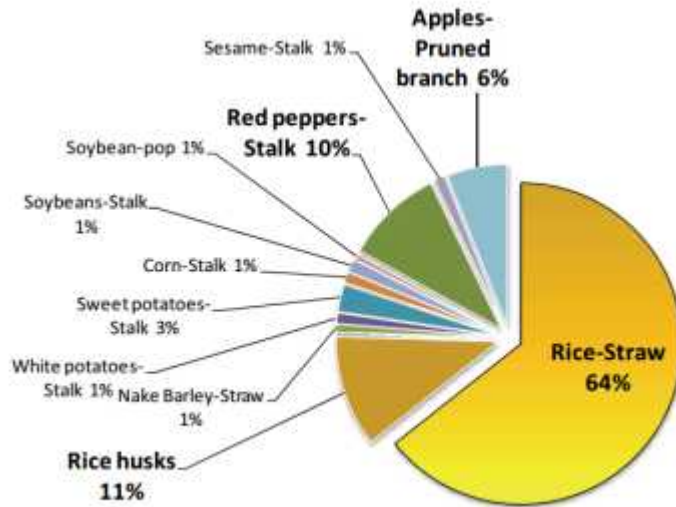


그림 11. 농업부산물과 과수부산물의 발생량별 비율(출처: 박 등, 2011)

• 농업부산물

- 1) 현재 바이오숯 연구에 가장 많은 연구가 되어 있는 원료는 농산부산물 및 가축 분뇨로 국내 뿐만 아니라 해외에서도 농산 및 축산 폐기물 처리가 시급한 실정임.
- 2) 농촌에서 바이오숯 사용을 보편화하기 위해서는 원료수급을 자체적으로 하는 방법이 경제적이고, 지역 농산부산물의 처리도 용이할 것임.



• 목질계 바이오매스²⁾

- 1) 목본식물과 같이 셀룰로오스(cellulose) 및 리그닌(lignin)의 비율이 높은 목질계 자원으로 폐목재, 전정가지, 커피찌꺼기 등이 있음.
- 2) 농산부산물과 다르게 사료로서 사용하기 어려운 목질계 바이오매스는 원료의 수급이 안정적이고 농촌이 아닌 도시에서도 수급이 가능함.

2) 재생에너지로 쓰일 수 있는 모든 유기물 가운데 셀룰로오스(cellulose) 및 리그닌(lignin)으로 구성된 목질계 자원으로 주로 목본식물과 초본식물을 의미하며 그 파생품을 지칭함(에너지관리공단, 2008)

- 3) 목질계 바이오매스 대부분은 식량으로서 활용가치가 없어 원료 수급이 안정적이고 도시에서 발생하는 폐목재의 경우, 건설폐목재, 생활폐목재 등이 원료로서 검토 가능하며 그 외 커피찌꺼기, 견과류껍질 등도 후보군으로 적합함.
- 4) 본 연구팀의 선행연구에서 폐목재 열분해시 식물 생육에 유리한 유기탄소가 다수 함유되었지만 이와 같은 결과를 도출하기 위해 난분해성인 목질 내 리그닌을 연소 또는 열변환하는데 어려움이 있어 추가 연구가 필요한 상황임.



• 기존 탄화물 활용

- 1) 국내에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 왕겨숯이나 참숯 등을 구입하여 본 연구에서 개발된 바이오숯과 토양개량, 오염저감, 탄소저감 및 경제성 등을 비교



2. 바이오숯 개발

• 열분해(Pyrolysis)를 통한 바이오숯 제작

- 1) 선별된 원료를 열분해시 온도, 압력, 가열시간, 산소의 여부 등 열분해 조건을 다르게 하여 다양한 바이오숯을 제작하여 적정 조건을 탐색함.

- Biomass의 전처리과정 설정

- ① 몇 cm의 직경으로 파쇄할 것인가의 문제 해결
- ② 수분함량을 몇 % 이하로 맞출 것인가의 문제 해결
- ③ 작업 용이를 위해 별도의 첨가제를 포함할 것인가 문제 해결

- ④ 다수의 재료가 혼합되어 있는 경우 선별(Screening) 문제 해결
- 2) 바이오숯의 생산효율과 안정적인 생산을 위해 저속 열분해 공정을 적용함.

- Biomass별 열분해 setting

- ① 목재의 열분해 시점, 온도, 지속시간 setting ← 리그닌(lignin)의 분해 어려움
- ② 유기화합물의 열분해 시점, 온도, 지속시간 setting
- ③ 무기화합물의 열분해 시점, 온도, 지속시간 setting

- 3) 원료(폐목재, 제지슬러지 등)에 따른 차별화된 온도, 압력, 가열시간 조건을 도출, 적용하는 기술로서 그 산물로 Bio-gas, -oil, -char를 생산
- 4) 바이오숯의 생산효율을 극대화하기 위해 열분해 반응기 적용(그림 16)
- 5) 고속탄화로 생산된 숯(Charcoal)과 차별화된 탄소중립(Carbon-neutral) 소재인 바이오숯(biochar) 생산을 위해 원료별 적정 조건 탐색
- 6) 원료별 열분해 조건 탐색을 위해 소용량(110mL)의 반응기로서 3시간 내외의 짧은 시간 동안 반응하는 공정을 가지고 있어 조건 탐색에 적합하다고 판단됨



그림 12. 열분해 반응기
(Muffle Furnace LT24/11,
Germany)

- 7) 본 연구에서는 폐목재를 적정 온도에서 열분해하여 가장 안정적이고, 효능이 우수한 토양개량제를 개발하는 내용
- 8) 선행 연구 결과 300-450℃에서 열분해 한 폐목재가 CEC가 가장 높았으며, 양분적인 측면에서도 효과가 있는 것으로 조사됨

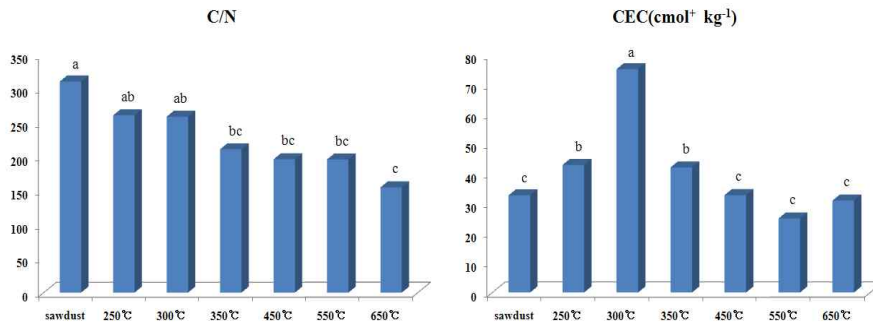


그림 13. 폐목재의 바이오숯 제조 및 바이오숯의 물리/화학적 특성

● 바이오숯 생산수율 향상

- 1) 바이오숯의 생성 수율은 단순히 투입된 원료에 대한 생산량이 아닌 최소한의 에너지를 사용하여 탄소저감의 효과를 극대화해야 함.
- 2) 기존 연구에 따르면 바이오숯의 수율은 원료에 따라 상당히 다르지만 일반적으로 최대 수율에서의 열분해 조건은 250~450°C 내외, 1~20시간, 저산소 조건으로 본 연구에서도 이와 같은 조건에서 수행함.
- 3) 바이오숯의 수율은 열분해 이 후 냉각방법에 따라 달라질 수 있어 이에 대한 연구도 병행 진행함.
 - Biomass별 열분해 후 산출물량, 생산효율 검토
 - ①생산된 biogas, biooil, 바이오숯 선별문제 해결
 - ②생산된 바이오숯 생산효율(비용, 시간, 원재료 투입량 대비 산출량) 검토
- 4) 열분해 조건은 250~450°C 내외, 1~20시간, 저산소 조건에서 수행가능 함
- 5) 기존 연구에 따르면 열분해 후 냉각 방법에 따라 Bio-oil, -gas의 생성량이 달라질 수 있으므로 이에 대한 연구개발이 필요함
- 6) 반응 후 수냉 및 가스 제거하여 뷰흐너 깔때기(Büchnerfunnel)와 No.53 여과지 (HyundaiMicro)를 이용하여 타르성분을 제거하여 -char의 중량을 측정함
- 7) 이후 바이오숯을 대상으로 삼성분 분석(Three components analysis), 원소분석(Ultimate analysis), 물질수지(탄소) 등을 통해 물리, 화학적 분석을 시행함

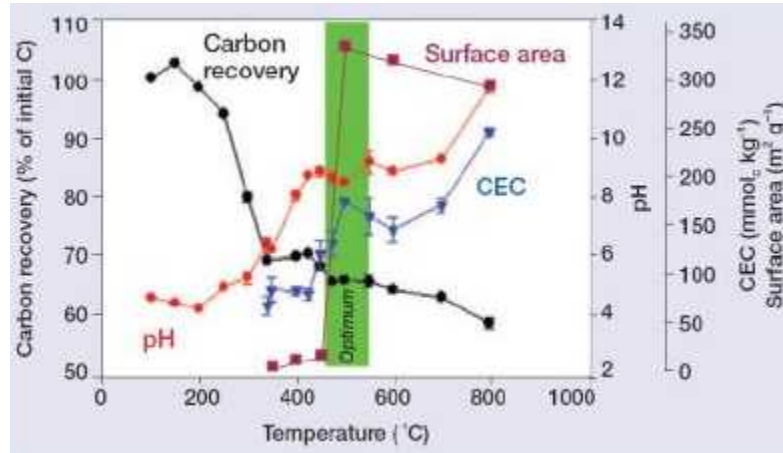


그림 14. 열분해 온도에 따른 바이오숯 특성의 변화(출처: biochar. pbworks 웹사이트)

- 바이오숯 특성 분석

- 1) 농작물의 생산량 증대, 오염토양의 정화 그리고 탄소저감의 목표를 달성하기 위해 필요한 바이오숯의 특성은 pH, CEC, 비표면적, 탄소함량 등이 있으며 이러한 항목들의 분석을 통해 본 연구의 목적에 적합한 바이오숯을 선별함.
- 2) 바이오숯의 선별은 농작물의 생산량 증대, 오염토양의 정화 그리고 탄소저감의 목표에 적합한 바이오숯 제작 조건과 특성을 고려하여 선별하고 재배실험 및 탄소저감량 평가를 수행함.
- 3) 기존 제품들과의 이화학적 비교, 생육효과 비교를 통해 기술성을 판단함

3. 바이오숯 기반 미생물 담체 개발

- AM fungi를 담체에 선 접종시키는 기술 개발
- 담체와 바이오숯 적정 비율의 배합 기술 개발
- 배합 후 특정 조건하의 AM fungi 발현, 대량증식 기술 개발
- 본 연구는 내생균근균의 증식을 위해 다양한 기주식물(수단그라스, 수수, 자운영)과 다양한 자재를 활용하여 실험을 진행하였음
- 선행연구 결과 perlite, biochar과 같은 안정한 물질에서 수단그라스를 재배한 실험구에서 내생균근균 증식이 가장 우수한 것으로 조사됨

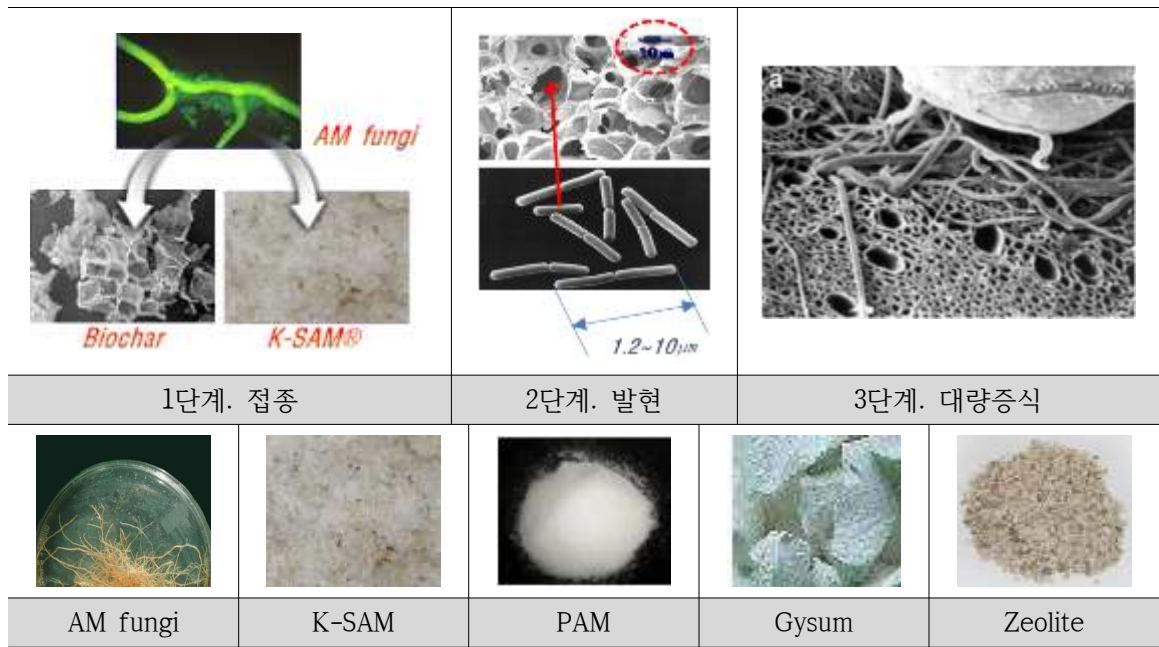


표 1. 수수 포자 및 균사 감염률

처리구	Spore		Hyphae	
	감염률(%)	지수(%)	감염률(%)	지수(%)
강흙+발흙 1:1	4.55a	100	14.77a	100
펄라이트	3.77f	82.86	16.98c	114.96
biochar	6.31c	138.68	21.62d	146.38
활성탄	10.53e	231.43	15.79b	106.91
제올라이트	5.45b	119.78	16.36bc	110.77
목탄	3.80f	83.52	13.92e	94.25
펄라이트+목탄 7:3	5.17b	113.63	12.07f	81.72
펄라이트+biochar 95:5	8.89d	195.38	14.44ae	97.77

* DMRT at 5% level

4. 바이오숯 기반 유기질 비료 개발

- AM fungi를 접종시킨 바이오숯에 다양한 원예/조경재료 조합
- 물리성, 화학성, 미생물성 분석을 통해 각 재료별 특정 배합비 도출
- 유기질 비료의 물성은 입경 3~5mm, pH 6.5~9.0, 비중 0.25~0.30g/cm³, 유기물함량 3~5%, CEC 20cmol/kg 내외 등으로 조절

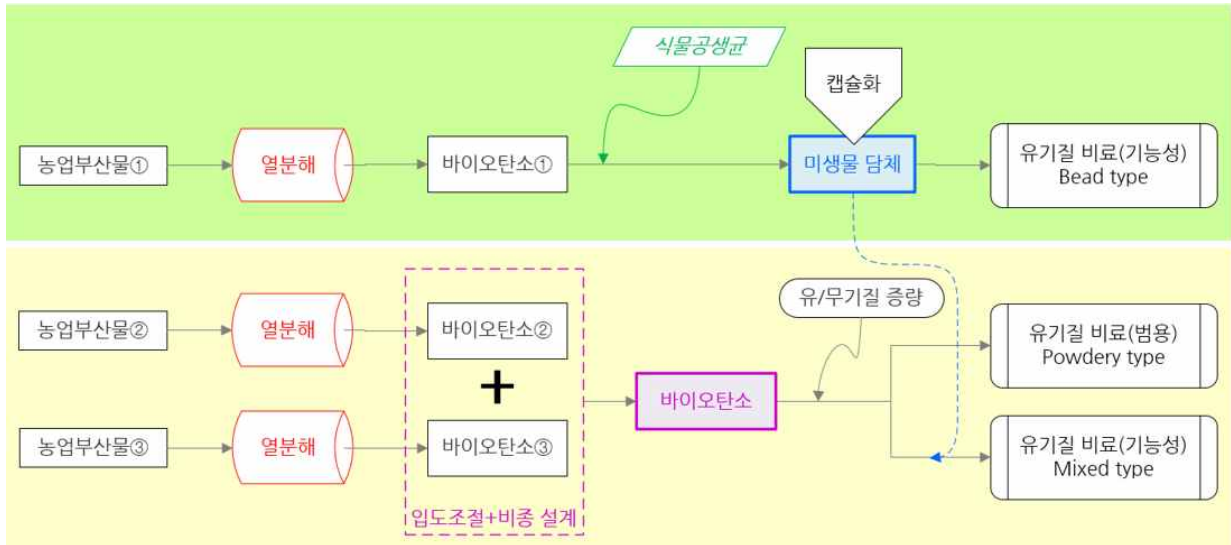


그림 15. 바이오숯 기반 유기질 비료 개발(안)

5. 바이오숯 적용시 토양환경 영향 연구

• 토양 내 질소 및 영양성분 변화 연구

- 1) 칼럼(column)실험을 통해 바이오숯이 토양 내 양분이동 변화에 미치는 영향을 파악함.
- 2) 염분함량이 높은 온실재배 토양을 대상으로 바이오숯을 적용하여 실제 토양 내 양분의 흡착 및 용출 특성을 구명함.
- 3) 잦은 경운으로 토양의 물리성이 약한 온실재배 토양을 대상으로 바이오숯의 적용이 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성 개선에 미치는 영향을 구명함.

• 토양 중금속 저감 효과

- 1) 중금속 흡착실험을 통해 바이오숯의 중금속 흡착능 평가함.
- 2) 중금속으로 오염된 토양에 바이오숯을 처리하여 중금속의 용출 및 식물체로의 전이량 감소 효과 구명
- 3) 토양오염 저감을 위한 바이오숯 활용의 문제점 및 개선사항을 파악하고 수정함.
- 4) 현장검증을 통한 오염토양 저감효과 구명
- 5) 실제 중금속으로 오염된 토양에 바이오숯을 처리하여 토양 내 중금속 유효도와 식물체로의 전이 감소를 평가함.

나. 1협동: 바이오숯 기반 저탄소 농업기술 개발

- 바이오숯의 처리에 따른 토양 내 이화학성 변화를 평가함
- 관행 대비 바이오숯 기반 유기질비료 처리에 의한 농작물 생육환경 변화를 평가함

- 바이오숯 기반 저탄소 농법 개발을 위해 6종의 농산물에 대한 온실 재배를 통하여 농작물의 생산성과 품질 향상 등을 평가함

1. 저탄소 농법 관련 선행연구 검토

- 국내외 사전 연구 분석과 자료 수집을 통한 저탄소 농법 연구 동향 파악
- 저탄소 농법에 따른 각각의 기술 분류
- 저탄소 농업 기술 개발을 위한 바이오숯의 최적 활용 방법 검토

2. 온실 내 작물 재배 실험

- 농작물 6종 선별
 - 1) 현재 한국은 국민 1인당 시설재배 면적이 약 10m² 로 세계에서 가장 높은 수준 (출처: 한국 농업의 백색혁명, 한국과수협회, 2013)
 - 2) 따라서, 바이오숯 적용에 의한 고품질 저탄소농산물 생산기술 확보와 바이오숯 시용에 따른 농작물의 품질 및 토양 내 탄소저감효과 평가를 위하여 국내 시설재배 대표 농작물 6종을 선별
 - 3) 농작물의 선정조건은 시설재배 채소분류별, 국내 소비량과 재배면적 비율, 작물별 CO₂ 방출량, 농업부산물 배출량 등을 선정조건으로 함.
 - 4) 상기 선정조건을 바탕으로 작물 후보군을 선정함. (후보군: 배추, 상추, 가지, 방울토마토, 고추, 양파)

표 2. 작물 후보군의 재배적 특성

분류	6종의 농작물 후보군	최적 토양 요구도		유기물 (g kg ⁻¹)	표준시비량(kg/10a) (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
		산도(pH)	토성		
과채류	가지	6.0~6.5	양토~식양토	20~30	25.0-17.0-22.0
	방울토마토	6.0~6.5	양토~식양토	25~35	20.4-10.3-12.2
조미채소	양파	6.3~7.8	사양토~식토	20~30	24.0-7.7-15.4
	고추	6.0~6.5	양토~식양토	25~35	19.0-11.2-14.9
엽채류	상추	6.5~7.0	사양토~식양토	20~30	7.0-3.0-3.6
	배추	6.0~6.5	사양토	25~35	32.0-7.8-19.8

- 바이오숯 이용 온실재배 기반 구축
 - 1) 충남대학교 온실에서 바이오숯을 처리한 토양에 작물을 재배함으로써 농작물 생육환경 변화 및 토양 이화학성 변화를 분석함.
 - 2) 농작물의 생산량 증대, 탄소저감 효과를 극대화하기 위한 온실재배방법을 도출함.

- 3) 온실재배를 통해 수확한 작물의 생산량을 기존 관행 농법과 비교하고, 농작물의 품질 분석을 통해 품질의 차이를 구명함.



그림 16. 온실재배 전경

- 관행재배 대비 바이오숯 시용에 따른 화학비료 대체효과 비교 검토
 - 1) 바이오숯 혼합비율: 0%(바이오숯 무시용구-관행재배), 2%, 5%(w/w)
 - 2) 시비: 농촌진흥청에서 제시한 작물별 최적 재배기술에 따라 시비방법 설정
 - 3) 토양 특성분석: 바이오숯 시용에 따른 토양 이화학적 변화 평가 (pH, EC, CEC, 유기물, 유효수분함량, 투수성, 용적밀도 등)
 - 4) 양분수지분석: 재배기간 중 총 투입된 양분과 토양 및 작물체내 양분 분석을 통한 양분수지 변화 산출

$$\text{양분수지} = \text{양분 투입량} - (\text{토양 내 잔존량} + \text{작물의 양분 흡수량})$$

- 5) 바이오숯 연용시험: 바이오숯의 연용에 의한 토양의 이화학적 변화 및 작물 품질에 미치는 영향 평가

3. 바이오숯 이용 저탄소농산물 재배기술 개발

- 각 작물별 평가지표 설정
 - 1) 양분수지 분석을 통한 작물의 양분이용율 조사
 - 2) 작물별 품질 분석 실시: HPLC 등의 기기를 이용한 각각의 작물별 품질 분석을 통하여 고품질의 친환경 저탄소농산물 생산 가능성 평가 (평가항목: 당도, 질산염, 엽록소 함량 등)

3) 작물별 생육 조사 실시: 농촌진흥청에서 제시한 방법에 따라 각각의 작물별 수량 및 생육 평가 (평가항목: 생체중, 건물중, 엽수, 엽장 등)

- 바이오숯 기반 저탄소 농법 매뉴얼 작성

- 1) 기준항목 설정: 탄소저장량(CCS), 에너지 투입량 절감 효과 등 경제성 및 환경성 고려
- 2) 바이오숯 시용/연용에 따른 작물 생육과 농산물 품질 및 토양 환경 변화에 대한 지속적인 평가를 통하여 바이오숯 이용 최적 저탄소 농법의 기준 설정
- 3) 농민들이 직접 활용 가능한 바이오숯 기반 저탄소 농법 작물재배 매뉴얼 작성
- 4) 기존 제품과의 이화학적 비교, 생육효과 비교, 탄소 격리, 고정 비교

- 바이오숯 기반 저탄소 농법 개선 및 보급

- 1) 농작물의 생산성 증대와 더불어 농업 분야 탄소배출량 저감이라는 시대적 목표에 부합하도록 바이오숯 활용 저탄소 농법을 현장에 보급
- 2) 현장 검증 전후 전문가의 자문과 농민들의 실행 가능여부 판단을 위한 설문조사를 통하여 바이오숯 기반 저탄소 농법의 지속적인 개선

다. 2세부: 저탄소 농업기술 현장 실증

- 바이오숯 농법의 실증화를 위해 농작물 6종의 포장실험을 통한 농작물의 생산성 및 탄소 저감량을 평가함
- 농작물 6종에 대한 온실, 노지재배 기반을 구축하고 관행 대비 바이오숯 및 바이오숯 기반 유기질비료 처리에 따른 농작물의 생산성 증대, 품질 향상을 측정, 평가함
- 계약재배 농가를 확보하고 생산현장의 바이오숯 적용에 따른 저탄소 농법의 검증, 적용 타당성 검토

1. 현장 실증을 위한 기반 구축

- 농작물 6종별 시설, 노지재배 기반 구축
- 농작물 6종별 계약재배 농가 확보
- 바이오숯 기반 유기질비료의 품질 검증
 - 1) 코코피트 및 피트모스(유기물) 대체 원료로서 물리화학적 비교 검토
 - 2) 품질관리를 위한 유통시 유의사항, 상품 보관(유통기한내 변질, 이화학적 변화등) 및 시장 경제성 등 확인

2. 작물 재배 및 모니터링

- 유기질 비료로서 시설 재배지 토양 물리·화학적, 미생물성 확인
 - 1) 과도한 인산 및 칼리 축적으로 인해 토양 산성화, 지하수 오염 우려 등 측정
 - 2) 토양 물리성 변화(폐알구조) 및 화학성 변화(산도, CEC, EC등) 확인
 - 3) 토양 내 미생물상 변화 확인
- 바이오숯 기반 유기질비료의 작물별 생육 조건 확인
 - 1) 발아율 / 초장 / 엽폭 / 엽장 / 엽록소 지수 등 지상부 상태 확인
 - 2) 발근상태 등 지하부 상태 확인
- 온실, 노지재배시 화학비료, 농약 투입 정도 및 병해충 비교 분석
 - 1) 바이오숯 기반 유기질 비료로서 관행 제품 대비 화학비료 투입량, 투입시기 등을 비교 분석
 - 2) 바이오숯 기반 유기질 비료 투입시 토양 내 미생물상 변화에 따른 병해충 발생 정도, 발생 빈도, 발생 패턴 등의 변화를 분석
 - 3) 동일한 양과 패턴의 화학비료, 농약 투입시 바이오숯 기반 저탄소 농법과 관행 농법 사이의 효과(생산량, 품질 변화) 발현 차이를 분석
- 바이오숯 기반 유기질비료의 작물별 생산량 증대 확인
 - 1) 과채류(고추, 토마토 등) 등 열매 수확 과정 확인 및 비교
 - 2) 과육, 과피, 수확량, 미려도, 당도 등 열매의 품질 상태 확인

3. 저탄소 농법의 적용 타당성 검토

- 관행 재배 대비 저탄소 농법의 현장 적용 가능성, 타당성 검증
 - 1) 계약재배 농가들을 대상으로 한 설문조사, 인터뷰 등을 통해 바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술의 관행 대비 효용성을 판단, 검토
 - 2) 사용자 입장에서 경제성, 사용 편의성, 환경 기여도 등을 종합적으로 판단하도록 설문조사 양식을 작성하여 배포
 - 3) 사용자 피드백을 바탕으로 개선점, 특징점을 도출

라. 2협동: 탄소 저감량 및 탄소흡수 방법론 연구

- 바이오숯 기반 선별 농작물(1종) 재배지에 CO₂ Flux chamber System을 구축하여 토양 호흡량, 작물의 광합성량 및 호흡량을 연속 측정하고 농작물 전생산과정의 시계열에 따른 탄소순환 및 CO₂ 교환수지 프로세스를 규명함.
- 야외 현장 측정을 통하여 바이오숯 처리구와 대조구의 각각의 농생태계(대기-농작물-토양)의 정량적 탄소수지(흡수/배출량)를 평가하고 농작물 생산체계에 있어서 바이오숯 적용에 따른 탄소 저감 효과와 그 기여도를 종합적으로 파악함.
- 바이오숯 적용 녹색농업기술의 탄소흡수 사업화를 구축하기 위하여 보다 신뢰성이

높은 야외현장 측정결과에 기반을 둔, 탄소흡수 방법론을 개발하고자 적용가능 조건 및 사업경제성 검토와 베이스라인 시나리오 선정 및 탄소 흡수량 및 배출량 산정, 그리고 모니터링 변수 및 방법을 제안함.

1. CO₂ Flux Chamber System을 활용한 바이오숯 기반 농작물 생산과정의 탄소 저감량 연구

- 선별 작물(1종) 재배지내 바이오숯 적용 처리구 및 대조구 비교 실험사이트 조성
 - 1) 바이오숯 적용, 비적용에 따른 각 농생태계(대기-농작물-토양)의 탄소순환과 CO₂ 교환 프로세스를 정량적으로 평가하고자 주요 선별 작물(1종)의 재배지를 선정하여 바이오숯 처리구 및 대조구용 각 야외현장 실험사이트를 조성함.
 - 2) 작물의 생산과정의 체계 속의 토양과 농작물의 호흡 및 광합성 모니터링 위치 선정 및 환경인자 측정센서 설치 지점을 정함.

- CO₂ Flux Chamber System 구축 및 운영
 - 1) 본 재배지내 선별 농작물(1종)의 생육 환경에 적합하고 시공간 및 계절변화에 따른 대기-농작물-토양으로부터 발생되어지는 CO₂ flux 측정을 장기적으로 연속 측정하기 위하여 automatic multi-chamber를 제작하고 본 실험사이트 주변에 챔버를 구축 적용하고 controlling system, data logger, 전원공급 장치(상용 AC 220V) 등을 안전하게 보관 및 유지 관리 가능한 보조창고를 세움.
 - 2) Automatic multi-chamber system은 CO₂ 적외선분석기(Infrared gas analyze, IRGA; LI-820, LI-COR Lincoln, NE USA), 자료수집장치(data logger; CR1000; Campbell Scientific Inc.) 다채널방식의 가스 샘플러와 컨트롤러, 자동화된 챔버의 주요 4부분으로 구성됨.
 - 3) 자동측정분석은 밀폐순환법(closed dynamic chamber method)을 적용하여 동일한 8개의 챔버들을 대상으로 자료수집장치의 다채널 프로그램에 의해 DC 12V 8-컨트롤러(Weather Tech. Seoul, Korea)의 릴레이 전자회로부분을 조절함.
 - 4) 궁극적으로 각 챔버별로 225초씩, 한 사이클 당 30분에 다다를 수 있는 순차적이고 연속적인 측정이 가능함.
 - 5) 챔버의 형태와 재질은 매우 얇고 투명한 실린더형의 항공아크릴을 사용하여 내부의 온도, 습도, 광도, 공기순환 등이 외부의 환경상태에 비해 극심한 변화가 일어나지 않도록 함.
 - 6) 주요 컨트롤러로부터 측정개시 신호가 전달되어 챔버 뚜껑이 천천히 닫힘과 더불어, 동시에 내부의 공기 혼합팬(KMFH-12; Nihon Blower)과 공기순환펌프가 토양 및 식물체의 CO₂ 농도측정 단계가 이루어지기 전에 먼저 가동되어서 챔버 내부의 공기를 외부의 대기와 최대한 동일하게 유지되도록 조절함.

- 7) 완전히 밀폐가 이루어지게 되면 챔버 내부의 공기는 3 l/min 공기순환펌프를 통해 챔버의 배출구에서 최대 20m의 흡입튜브를 따라 가스샘플러 흡입구로 이동되어 가스유량계와 공기필터를 거친 후, 0.4 또는 0.7 l/min 유량의 샘플공기 일부를 CO₂ 적외선분석기에 통과시켜서 연속적으로 농도를 1초마다 측정하고, 10 초 간격의 평균값으로 CR1000 자료수집장치(data logger) 및 PC에 저장시킴.
- 8) CO₂ 농도분석을 끝마친 측정 샘플공기와 나머지 공기는 처음에 샘플링된 유량과 동일한 양으로 합해지고, 같은 공기순환펌프에 의해 10-20m의 배출튜브를 따라 다시 챔버 내부로 자동 순환시킴.
- 9) 야외에 설치 시에는 외부환경의 교란으로부터 챔버의 안정성과 내구성이 유지되도록 챔버 외부에 2개의 고정판을 설치함.
- 10) 또한 측정기간 동안에 챔버 내부에 자라는 잡초의 광합성 작용에 의해 측정된 값이 과소평가 되지 않도록 주기적으로 모두 제거함.
- 11) 측정으로부터 얻어진 모든 데이터는 실험사이트 주변에 초기에 설치 후, 약 한 달 정도의 안정화 단계를 거친 다음 지속적으로 회수함.



그림 17. CO₂ Flux Chamber System 적용 기술

- Automatic chamber method에 의한 토양호흡량, 광합성량, 식물체호흡량 연속측정
 - 1) 멀티 자동 chamber system을 사용하여 각각의 바이오숯 처리구 및 대조구 내의 토양호흡(soil respiration), 선별 농작물(1종)의 광합성(photosynthesis) 및 호흡(plant respiration)을 모니터링 하고 수집된 데이터로부터 각각의 탄소순환 및 CO₂ 교환수지 프로세스의 일변화 및 계절변화를 분석함.

- 토양호흡, 광합성, 식물체호흡 속도의 계산식:

$$CO_2 Flux (mg CO_2 m^{-2} s^{-1}) = \left(\frac{\Delta c}{\Delta t} \right) \frac{V}{A} = \left(\frac{\Delta c}{\Delta t} \right) h$$

Δc : CO₂ concentration increased in the chamber for measurement time period

Δt : measurement time period (sec)

V: volume of the chamber (m³)

A: Soil or plant surface area covered by the chamber (m²)

h: height of chamber (m)

- 호흡속도와 온도와의 관계 및 Q₁₀값

$$CO_2 Flux = a \times e^{bT}$$

$$Q_{10} = e^{b10}$$

a: respiration rate at 0°C

T: air or soil temperatures

- 선별 작물 재배지내의 환경인자 및 엽면적 지수(Leaf Area Index) 측정
 - 1) 실험사이트 내에 기온 측정을 수행하기 위해서 지면으로부터 1.3m 높이의 2곳을 정하고, 직사광선 차단을 위한 실드를 고정파이프에 부착하고 그 내부에 열전대 (thermocouple 및 PT) 센서를 설치하여 연속 측정함.
 - 2) 지온은 토양표면으로부터 5cm 깊이로 탐침 열전대 센서(thermocouple 및 PT)의 2set를 바이오숏 처리구 및 대조구에 각각 설치하여 연속 측정함.
 - 3) 작물의 광합성에 영향을 끼치는 광량 측정을 위한 광량자속 센서를 인위적인 광저해를 피해, 챔버의 상단에 인접한 지면으로부터 약 50cm 높이에 설치하고 연속 측정한다. 단 반드시 광량자속 센서 부분이 지면과 수평 유지되도록 지지대를 설치함.
 - 4) 토양수분함량을 측정하기 위해서 2대의 TDR 센서(CS616; Campbell Scientific Inc.)를 각 대조구 및 처리구의 토양 5cm 깊이에 설치한다.
 - 5) 공급전력의 이상발생시, 비상용으로 Hobo사의 기온, 지온, 토양수분 측정용 센서를 가지고 1.3m 높이에서 기온과 토양 5cm 깊이에서 지온 및 토양수분함량을 연속 측정함.
 - 6) 모든 환경인자 데이터는 1초마다 측정하여 10초 간격의 평균값으로 자료수집장치(datalogger; CR1000; Campbell Scientific Inc., Utah, USA) 및 PC에 저장되고 수집된 데이터는 주기적으로 분석됨.
 - 7) 엽면적지수(Leaf area index, LAI)나 엽면적의 분포는 야외 휴대용 LI-2200 수관

분석기(canopy analyzer)와 LI-3000C 엽면적기 등을 이용하여 정기적으로 측정하고 선별 작물(1종)의 계절적인 현상을 측정함.

- 바이오숯 처리구 및 대조구 생산 작물의 순일차생산량(NPP) 측정

- 1) 선별 작물(1종) 재배지의 바이오숯 적용 처리구 및 대조구 챔버로부터 수확된 농산품을 비롯하여, 작물 생산시기를 끝마친 해당 식물체의 지상부(잎, 줄기 등)와 지하부(뿌리)를 채취하여 각각의 건중생물량(biomass)을 구함.
- 2) 또한 생산과정에 떨어진 낙엽 등의 다양한 종류의 리타 및 곤충이나 동물에 의해 소비된 엽량 등을 조사함.
- 3) 선별 작물(1종)의 생산과정에서 얻어진 각 기관의 식물체의 탄소성분을 C/N analyzer로 분석하여 해당 식물체의 탄소전환계수를 구하고 그 값을 건중생물량에 곱하여, 선별 농작물이 광합성을 통하여 대기로부터 흡수한 CO₂량인 순일차생산량(NPP, net primary production)을 산정함.

- 바이오숯 처리구 및 대조구의 토양 탄소축적량 측정

- 1) 선별 작물(1종) 재배지의 각 바이오숯 적용 처리구 및 대조구의 토양 탄소축적량은 2mm 이하의 토양을 분말형태로 곱게 분쇄하여 65℃에 건조한 다음, C/N analyzer를 이용하여 건식연소법으로 토양 내 탄소농도를 분석하고 토양탄소축적량은 각 깊이별 탄소농도와 용적밀도 그리고 석력함량을 이용하여 단위면적으로 환산함.

- 토양 탄소축적량(ton/ha) = T (토양의 두께, m) × BD (토양 용적밀도, g/cm³) × C (탄소농도, g/kg) × (1-CF (석력 함량비)) × 10

- 2) 토양 용적밀도는 토심별 시료의 건중량(2mm 이하 토양)을 부피로 나누어 계산함.

- 토양 용적밀도 (Bulk density, g/cm³) = 토양시료(2mm 이하) 건중량(g) / 토양시료의 부피(cm³)

- 3) 토양 석력함량은 2mm 이상 되는 석력을 105℃ 건조기에서 항량이 될 때까지 건조한 후, 중량을 측정하고 토양 탄소축적량 산출에는 총 토양 건중량 대비 2mm 이상 석력의 비율로 계산됨.

- 바이오숯 적용 농생태계(대기-농작물-토양)의 정량적 탄소수지(carbon budget) 평가
 - 1) 농생태계의 탄소수지를 정량적으로 평가하기 위해서 CO2 Flux Chamber System 을 활용한 생리생태학방법을 적용하여 순생태계생산량(NEP, Net ecosystem production)을 산정하고 주요 농작물 생산체계에 있어서 바이오숯 적용에 따른 탄소 저감 효과와 그 기여도를 종합적으로 파악함.
 - 2) 농생태계의 탄소수지는 식물(농작물)의 광합성에 의해 합성한 유기물의 총생산량 (GPP, gross primary production)과 식물의 생명유지 활동에 의해 대기 중으로 CO2를 방출하는 호흡량(Ra)의 차에 의해 결정 된다. 이차를 순일차생산량(NPP, net primary production)이라 한다. 즉,

$$NPP = GPP - Ra \quad (1)$$

- 3) 식물의 호흡량(Ra)은 가지(Rb), 줄기(Rst), 잎(Rl)과 뿌리(Rr)의 호흡량에 의해 결정 된다. 즉 $Ra = Rb + Rst + Rl + Rr$ 이다.
- 4) 대기-농작물-토양 간의 CO2의 수지 교환은 농생태계의 순일차생산량(NPP)과 종속영양생물(주로 토양미생물)의 호흡에 의한 CO2 배출량(Rh)과의 차에 의해 결정 되는데 이를 순생태계생산량(NEP, net ecosystem production)이라 한다. 즉,

$$NEP = NPP - Rh = GPP - Ra - Rh \quad (2)$$

$$(Ra = Rb + Rst + Rl + Rr)$$

- 5) NEP가 (+)양이면 그 생태계는 대기의 CO2를 흡수하게 되고, (-)음이면 대기로 CO2를 방출하게 된다. 따라서 대기-농작물-토양 간의 CO2 수지는 식(2)의 NEP를 정확하게 추정됨.
- 6) 일반적으로 뿌리호흡(Rr)과 종속영양생물호흡(Rh)은 토양 속에서 일어나므로 토양호흡(Rs)을 측정하게 된다. 따라서 $Rs = Rr + Rh$ 로 표시되므로 식(2)는,

$$NEP = GPP - Rl - Rst - Rb - Rs \quad (3)$$

- 7) 농생태계의 탄소수지(토양-농작물-대기 간의 CO2 수지 교환)를 정확하게 추정한다는 것은 식(2)혹은 (3)의 NEP 값을 정확하게 추정하는 것을 의미함..
- 8) 또한 $NEP = NPP - (Rs - Rr)$ 이 값이 플러스이면 그 생태계는 탄소의 흡수원 (sink)으로서, 마이너스이면 탄소의 방출원(source)으로서 작용하게 된다. CO2 Flux Chamber System 방법으로 탄소수지(순 CO2)를 측정하려면 $NEP = GPP -$

Rb - Rst - RI - Rs의 각 항을 측정하면 된다. 즉 식물의 광합성, 가지, 줄기와 잎 호흡과 토양호흡을 측정함.

- 9) 이 분석 자료를 사용하여 선별 작물(1종) 재배지내 바이오숯 적용 처리구 및 대조구의 탄소수지를 정량적으로 평가하고 대기-농작물-토양의 CO2 수지 교환 (NEP) 프로세스를 상호비교 및 검토하여 보다 명확한 바이오숯 기반의 탄소 저감량 연구결과 도출에 기여함.

2. 바이오숯 기반 저탄소 농업의 경제성, 환경성 평가

- 생애주기비용평가³⁾를 통한 경제성 평가

- 1) 바이오숯 기반 저탄소 농업의 생애주기비용 분석의 목적은 초기투자비와 유지관리비용 사이의 균형을 최적화시키고 더 낮은 유지관리비용으로 농산물의 생애주기를 연장시키기 위한 것으로 농업 및 농산물을 선택함에 있어 정책결정/집행자, 소비자의 의사 결정과정에 도움을 줄 수 있음
- 2) 특히 기대비용의 순현재가치⁴⁾로 환산이 가능한 특징이 있으며 이를 계산하기 위해서는 할인율의 선택이 중요하므로 다양한 문헌 조사, 전문가 자문을 통해 저탄소 농업의 경제성 평가에 적합한 할인율 선택이 이뤄지도록 함

$$NPV = \frac{C_0}{(1+r)^0} + \frac{C_1}{(1+r)^1} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

C:t년도에 소요되는 비용

r:할인율(이자율)

n:사업의 내구년도(분석기간)

3) 생애주기비용(LCC, Life Cycle Cost): 기대수명동안의 기대비용은 건설비용과 현시점의 유지관리비용인 초기비용, 향후 유지관리를 위한 비용 및 유지관리행위 동안 기능을 이용하지 못하는 간접비용, 해체·폐기 비용 등 모든 범위의 비용을 포함하며, 이러한 기대비용들을 현재가치나 연간가치와 같은 등가의 가치로 변환하는 과정을 통해 의사결정이 이루어진다.

4) 순현재가치: 투자사업의 전 기간에 걸쳐 발생하는 순편익의 값을 현재가치로 할인하여 합산한 값

비용 모델	미래비용의 현재가치화
※ NIST 모델(Ehlen/Marshall, 1996) $PVLCC = IC + PVOMR + PVD$ 여기서 $PVLCC$ = 현재가치의 총기대비용 IC = 초기비용 $PVOMR$ = 유지보수비용의 현재가치 PVD = 철거 및 폐기비용의 현재가치	$PV(LCC) = \sum_{n=1}^k \frac{C_n}{(1+i)^n} = \frac{C_1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{C_k}{(1+i)^k}$ 여기서, PV = 미래에 발생하는 현재가치 C_n = n년 후에 발생하는 비용 I = 할인율 k = Life Cycle 고려시 설계수명

그림 18. LCC 분석의 정식화(출처: 박기학 등, 2005)

• 전과정평가를 통한 환경성 평가

- 1) 바이오숯이 도입되는 시점부터 작물 재배에 사용되고 작물을 수확하는 시점까지의 Life cycle을 도출함
- 2) 이를 바탕으로 바이오숯 적용된 저탄소 농업의 전과정평가를 통해 정량적인 환경성 평가(환경영향평가)를 시행함
- 3) 국외 저탄소 농업의 LCA 모델⁵⁾을 참조하여 농업부산물의 수급 및 열분해, 열분해 후 유기질 비료 생산, 비료 물류 후 현장 투입 등의 시나리오를 설정하여 전과정평가를 실시함
- 4) 산업통상자원부가 개발한 전과정평가 프로그램인 PASS를 사용함
- 5) 농업부산물 1kg이 바이오숯으로 재활용되는 과정과 바이오숯이 농지에 투입되는 과정에서 환경에 미치는 잠재적 영향들을 정량적 및 정성적으로 분석함
- 6) 원활한 업무수행을 위해 서울대학교 기후변화 대응 연구실(교수 이동근)과 협업, 용역을 통해 LCA 수행함

5) Roberta Salomone. 2003. Life cycle assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. Food, Agriculture & Environment; Vol.1(2). p.295-300.

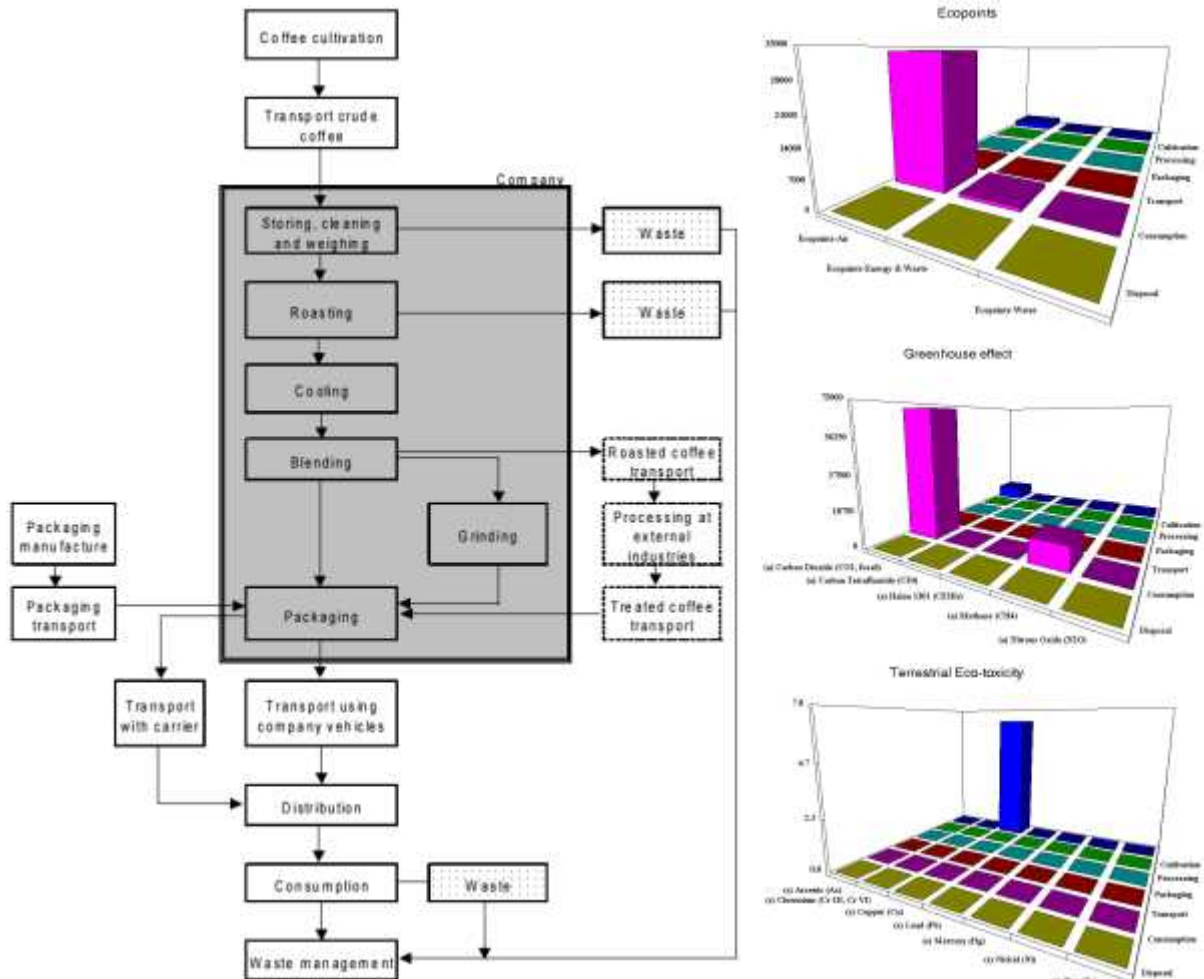


그림 19. Coffee life cycle(左), 지표별 특성화 결과(右)(출처:R. Salomone, 2003)

3. 바이오숯 적용 녹색농업기술의 탄소흡수 방법론 개발

- 탄소흡수사업을 추진을 위한 타당성 검토

- 1) 국내 온실가스 배출 감축 제도 도입에 대비하여 개발한 녹색농업기술의 이용촉진 및 탄소시장 적극 진입 가능조건과 사업경계 기준 파악.
- 2) 국내 농업 현실에 맞는 녹색농업기술의 탄소흡수 시범사업 추진 및 등록을 위한 성공 사례 조사.

- 베이스라인 시나리오 선정

- 1) 선별 작물(1종) 재배지의 바이오숯 적용 및 비적용에 따른 작물 생산체계의 전과정 비교분석.
- 2) 탄소 저감 관련 베이스라인 시나리오에 필요한 생산체계의 전과정 목록 작성 및 해석.

- 바이오숯 기반의 베이스라인 탄소 흡수량 및 배출량 산정

- 1) CO2 Flux chamber System을 활용한 바이오숯 기반 농작물 생산과정의 탄소수지 평가 결과에 의한 정량적 베이스라인 탄소 흡수/배출량 산정방법 제시.
- 2) 산정식을 이용하여 바이오숯 기반 베이스라인 탄소 흡수/배출량 산출.

- 모니터링 변수 및 방법

- 1) 자료의 신뢰성을 얻기 위한 지속적인 바이오숯 기반의 농작물 재배지의 탄소수지(흡수/배출량) 평가 및 모니터링 추진과 데이터베이스화.
- 2) QA/QC 및 검·교정 방안 모색.

제 3 절 연구개발 추진일정 및 체계

가. 연구개발 추진일정

- 1차년도

수행기관	연구내용	기술개발기간												비고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
총괄/ 1세부/ 1협동	연구계획 수립 및 진도 점검													
	국내외 문헌고찰 및 자료조사													
	농업부산물 유래 바이오숯 개발													
	바이오숯 기반 미생물담체 개발													
	바이오숯 기반 유기질비료 개발													
	국내외 저탄소 농법 관련 문헌조사 및 기술 분류													
	농작물 선별, 재배기술 검토													
	온실재배 기반 구축													
	작물 재배 전 토양환경, 생육환경 분석													
	연차 보고서 작성													
2세부/ 2협동	연구계획 수립 및 진도 점검													
	국내외 문헌고찰 및 자료조사													
	계약재배 농가 수매													
	자동화 CO ₂ flux 챔버 개발 및 성능 테스트													
	CO ₂ 챔버 설치 및 운용 (현장 재배 전)													
	챔버 및 환경인자의 시계열 측정자료 분석													
	작물 6종의 현장 재배 실증													
	CO ₂ 챔버 운용, 모니터링 (현장 재배 후)													
연차 보고서 작성														

• 2차년도

수행기관	연구내용	기술개발기간												비고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
총괄/ 1세부/ 1협동	과제 진도관리 및 자문, 점검													
	바이오숯 처리시 영양 성분, 미생물 변화 연구													
	토양 중금속 저감 연구													
	바이오숯 시용 온실 재배실험													
	저탄소 농산물 재배기술 개발													
	오염물질 거동 평가													
	연차 보고서 작성													
2세부/ 2협동	과제 진도관리 및 자문, 점검													
	현장 실증 모니터링													
	관행 대비 저탄소 농법 비교													
	자동 CO ₂ 챔버 운용, 모니터링													
	챔버 및 환경인자 시계열 측정자료 분석													
	탄소수지 평가 산출													
	바이오숯 기반 제품, 농법 활용 현장 재배, 모니터링													
	LCA 수행													
	연차 보고서 작성													

• 3차년도

수행기관	연구내용	기술개발기간												비고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
총괄/ 1세부/ 1협동	과제 진도관리 및 자문, 점검													
	바이오숯 처리시 영양성분, 미생물 변화 연구													
	토양 중금속 저감 연구													
	바이오숯 현장 활용 및 검증													
	저탄소 작물재배기술 확립													
	저탄소 농법 개선 및 보급													
	연차, 최종 보고서 작성													
2세부/ 2협동	과제 진도관리 및 자문, 점검													
	CO ₂ 챔버 운용, 모니터링													
	챔버 및 환경인자 시계열 측정자료 분석													
	탄소수지 평가 산출													
	현장 실증 모니터링													
	관행 대비 저탄소 농법 비교													
	LCA 수행													
	탄소오프셋 도출													
연차, 최종 보고서 작성														

나. 연구개발 추진체계

- 본 연구과제는 (주)포이엔 주관 하에 3개의 연구개발 목표 및 내용으로 이뤄져 있으며, 각 주제별로 산학협력 연구팀이 구성되어 있음.

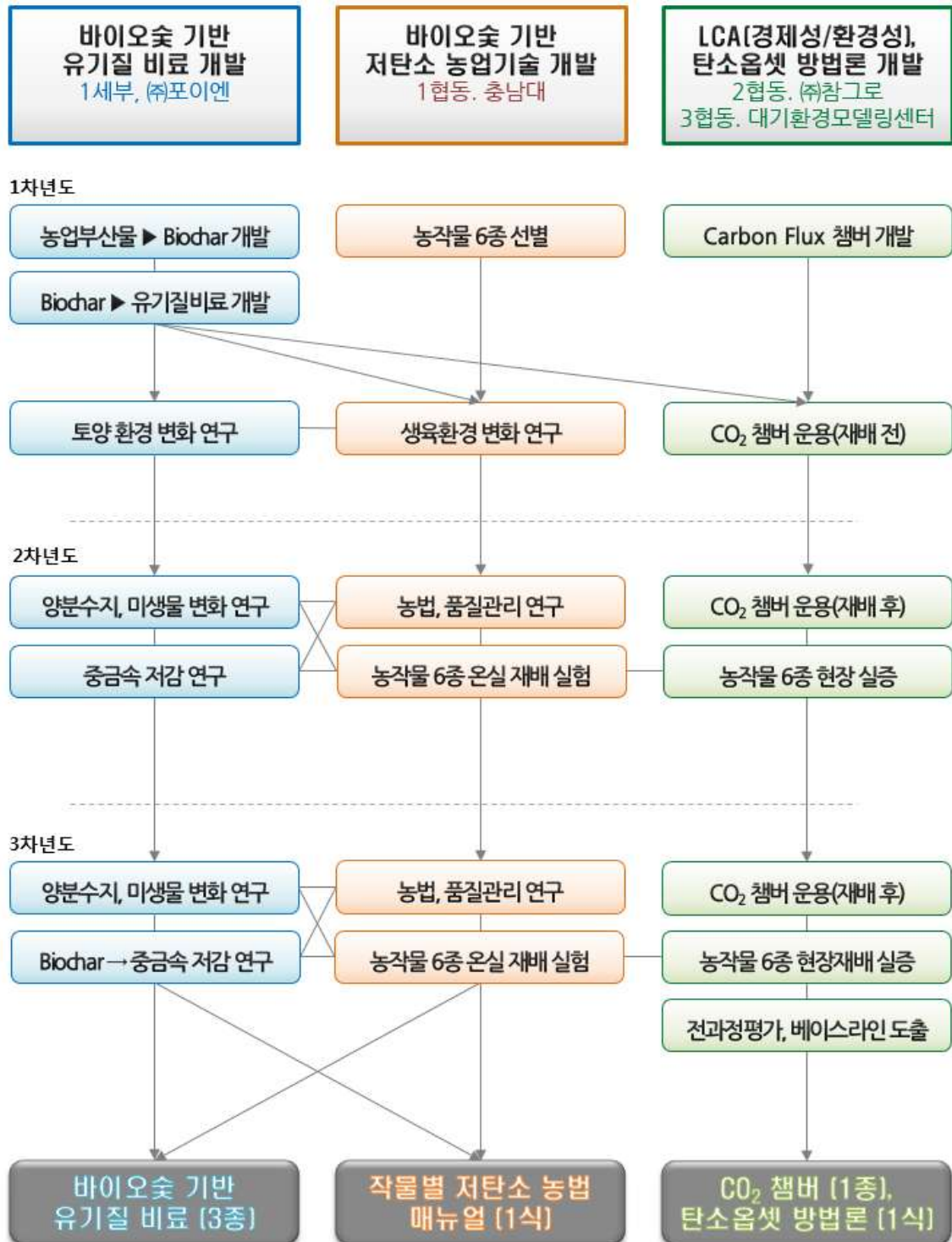


그림 20. 과제별 연구개발 목표 및 내용

제 4 절 연구수행 결과

가. 저탄소 농법 문헌조사

1. 국내 저탄소 농법 관련 문헌조사

1) 국내 저탄소 농법 기술 분류

- 현재 국내에서 적용하고 있는 저탄소 농법은 토양관리농법, 파종농법, 비료관리 활용농법, 대체에너지 활용농법, 고효율 기술농법, 물관리농법으로 분류할 수 있음

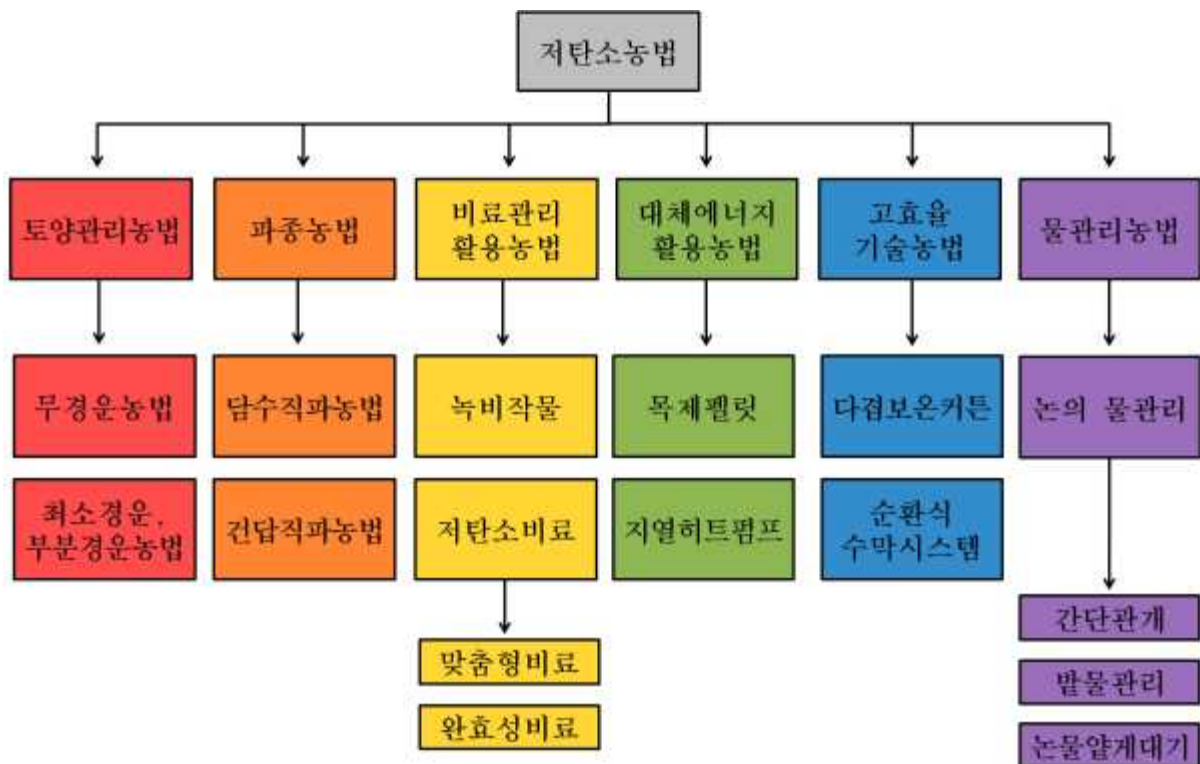


그림 21. 국내 저탄소 농법 기술 분류 (참조: 농업기술실용화재단, 2012년)

2) 국내 저탄소 농법 기술별 연구비율 분석

- 저탄소 농법 관련하여 2015년까지 국내 학술지에 발표된 논문과 각 기관의 연구 보고서 등 총 1,865편의 연구결과를 분석함
- 녹비작물 이용 방법(24.29%)이 가장 많았고, 지열히트펌프 활용(23.16%), 건답직파 방법(15.34%)의 순임
- 저탄소 농법 관련 연구 초기에는 파종 농법에 관한 연구가 주를 이루었고, 2000년도 이후에는 대체에너지 활용농법과 고효율 기술 농법에 관한 연구가 지속적으로 증가하였음

- 간단관계(0.54%), 부분경운(3.38%) 등에 대한 연구가 부족하였으며, 특히 완효성 비료 연구는 3.91%로 바이오숯을 활용한 연구의 필요성을 확인함

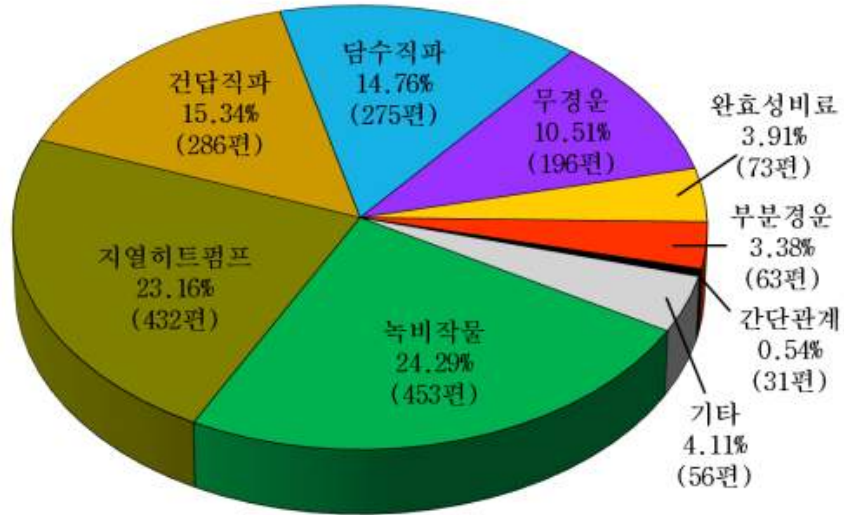


그림 22. 국내 저탄소 농법 기술별 연구비율

3) 년도 구간별 저탄소 농법 기술 동향 분석

- 저탄소 농법 관련 전체 1,865편의 연구 결과에 대한 년도 구간별 기술 동향을 분석
- 2000년에서 2006년도 까지 발표 논문은 감소하는 경향을 보였으나, 2007년 이후 증가하는 경향을 보임

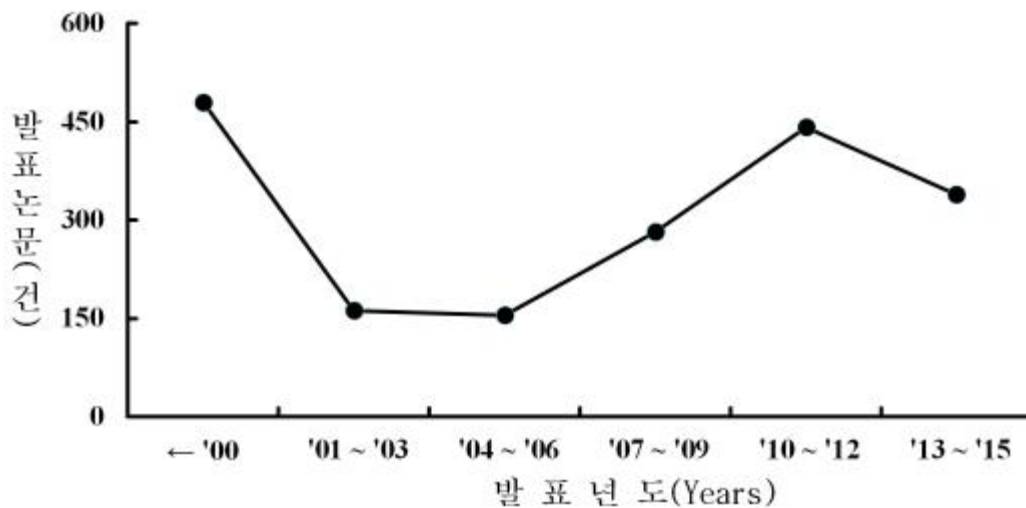


그림 23. 년도 구간별 저탄소 농법 기술 동향

2. 농작물 선별, 재배기술 검토

1) 국내 시설재배 대표 농작물 선별

- 농작물의 선정조건: 시설재배 채소분류별, 국내 소비량과 재배면적 비율별, 작물별 CO₂ 방출량, 농업부산물 배출량 등을 고려
- 작물 후보군: 6종의 농작물 선별 (배추, 상추, 가지, 방울토마토, 고추, 양파)

2) 작물 후보군의 재배 방법

- 작물 후보군의 년 중 시기별 재배 방법: 농업진흥청 농사로 등을 이용하여 후보작물의 년 중 시기별 재배방법 조사

표 3. 후보 작물의 년 중 시기별 재배방법

월	시기	심기	재배	수확
1월				
2월	중순	고추, 가지, 토마토 모종 키우기		
3월	초순	밭 만들기	거름 만들기 준비	
	중순		양파 덮개 걷고 웃거름 주기	
4월	초순	상추 등 잎채소 씨뿌리기 / 옮겨심기		
5월	초순	고추, 가지, 토마토 옮겨심기	잎채소 벌레 잡기 토마토 결순 따기 잎채소 숙아주기	
	중하순		잎채소 풀매고 웃거름 주기	상추 수확
6월	초순		고추, 가지, 토마토 지주 세우기	고추, 가지 수확 시작
	중순			상추 씨 받기 양파 거두기
7월	초순			토마토, 옥수수 수확
	중순		장마 이후 풀베기	
8월	초순	배추, 양파 모종 키우기		붉은 고추 수확
	중순	잎채소 씨뿌리기 배추 옮겨심기		고추, 가지 등 씨 받기
9월	초순		배추벌레 잡고 웃거름 주기	
	중순			가을 잎채소 수확
10월	초순	양파 모종 옮겨심기		
11월	초순		배추 잎 묶기	배추 거두기
	중순		양파 등 겨울 나는 채소 보온	
12월				

- 작물 후보군의 재배 특성: 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 이용

표 4. 작물 후보군의 재배 특성

분류	6종의 농작물 후보군	최적 토양 요구도		유기물 (g kg ⁻¹)	표준시비량(kg/10a) (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
		산도(pH)	토성		
과채류	가지	6.0~6.5	사양토~식양토	20~30	19.3-8.7-11.2
	방울토마토	6.0~6.5	미사질양토	25~35	22.6-10.6-11.9
조미채소	양파	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	24.0-7.7-15.4
	고추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	19.0-6.4-10.1
엽채류	상추	6.5~7.0	사양토~식양토	20~30	7.0-3.0-3.6
	배추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	17.8-3.0-7.3

※ 출처: 작물별 시비처방기준(농촌진흥청 국립농업과학원)

나. 바이오숯 선별

- 문헌조사 및 현장조사 결과를 바탕으로 농업부산물 선별
- 선별된 농업부산물을 열분해하여 바이오숯 제작

1. 바이오숯 원료 선별 및 특성분석

1) 원료 선별 및 원료 특성 분석

- 본 연구에서 바이오숯 생산을 위한 원재료 선정에 있어 중요한 조건은 다음과 같음

- ①농작물 생산 후 발생하는 농업부산물
- ②대량으로 발생되며 수급이 가능한 원료
- ③열분해 후 수율이 높은 원료
- ④열분해 후 탄소 고정화 비율이 높은 원료
- ⑤바이오숯으로서 양분 공급이 가능할 정도의 양분을 함유하고 있어야함

- 상기 조건을 고려하여 선정된 바이오숯 원료는 다음과 같음

- ①고추: 고추를 재배하고 남은 가지, 잎, 열매
- ②벼짚: 벼를 수확하고 남은 벼 줄기, 잎
- ⑤배 전정지: 배 나무를 전정한 가지
- ⑥커피: 커피를 내리고 남은 커피찌꺼기
- ⑦왕겨: 벼를 도정하고 남은 껍질

- 수급된 바이오숯 원료는 총질소, 유기물, 탄질율, P, K, Ca, Mg 함량 및 중금속 함량을 분석하였음(표 1, 2)
- 바이오숯 원료 중 총질소 함량은 고추부산물(2.56%)로 가장 높게 측정되었으며, 이어 커피, 벚짚, 배전정지, 왕겨 순으로 조사되었음
- 탄소함량은 36.6~47.2% 범위에서 조사되었으며, 벚짚의 탄소함량이 46.7%로 가장 높았음

표 5. 바이오숯 원료별 이화학적 특성

	T-N	Organic matter	Carbon	C/N	Water content	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	----- % -----								
고추	2.56	63.1	36.6	14.3	20.8	0.28	1.62	1.76	0.72
벚짚	0.72	80.5	46.7	64.6	9.7	*n.d.	0.78	0.45	0.19
배전정지	0.56	77.3	44.8	80.3	8.5	0.14	0.44	0.57	0.16
왕겨	0.45	78.1	45.3	99.8	7.4	0.07	0.35	0.13	0.04
커피	1.95	78.0	45.2	23.2	8.4	0.19	0.30	0.16	0.19

*n.d.: not detected

- 바이오숯 원료의 중금속함량은 ‘토양환경보전법’에서 제시한 ‘토양오염우려기준’ 농경지(가 지역) 기준보다 낮게 측정되었음

표 6. 바이오숯 원료별 중금속 함량

	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
	----- mg/kg -----							
고추	N.D	0.19	3.94	2.60	0.69	20.04	63.45	1.00
벚짚	2.63	0.14	2.72	4.44	1.18	50.30	58.58	0.83
배전정지	0.50	0.17	1.27	1.53	0.48	7.55	12.28	1.04
왕겨	N.D	N.D	1.78	2.07	0.42	1.85	17.26	0.46
커피	N.D	N.D	0.77	1.19	0.55	19.74	9.93	0.66



고추



벼짚



배전정지



왕겨



커피

그림 24. 바이오숯 원료

2. 바이오숯 열분해 조건 도출

1) 실험 방법

- 선정된 원료를 각 농장에서 공급받아 열분해 재료를 사용하였음
- 선정된 원료 중 입자의 크기가 큰 줄기 등은 5cm 이하로 절단하여 열분해에 사용함
- 열분해에 사용된 장비는 Muffle Furnaces LT24/11장비를 사용하였음
- 열분해 온도는 바이오숯의 특성변화가 급격하게 일어나는 온도구간 중 200, 400, 600℃로 수행함
- 최고온도에 도달하는 시간은 30min이며 최고온도부터 3h 동안 열분해하였음
- 각각 원료별 생산 수율을 계산하였으며 계산방법은 다음과 같음

$$\text{바이오숯 생산 수율(\%)} = \frac{\text{바이오탄소 생산량(g)}}{\text{열분해 투입 원료량(g)}} \times 100$$



그림 25. 열분해기
(Muffle Furnaces LT24/11)

2) 실험 결과

- 열분해 온도가 200°C 일 때 탄화도가 가장 낮은 것을 육안으로 확인할 수 있었음
- 탄화된 정도가 가장 균일 했던 것은 400°C 에서 열처리한 산물이 가장 좋았으며, 열처리 온도가 600°C 일 때 표면에 재(ash)가 생겼음



그림 27. 바이오매스 200°C 열분해 결과



그림 29. 바이오매스 200°C 열분해 결과



그림 31. 바이오매스 600°C 열분해 결과

- 바이오숯의 생산수율은 다음과 같이 조사되었음
- 열분해 온도가 높을수록 생산수율은 30%이하로 낮았으며 200℃에서 400℃로 온도가 높아질 때 수율이 급격하게 변화하였음
- 400℃에서 수율이 급격하게 감소하는 것은 유기물분해가 400℃ 부근에서 일어나기 때문인 것으로 사료됨

표 7. 바이오매스 원료의 온도별 바이오숯 생산 수율

원료	열분해 온도(℃)	수율(%)	원료	열분해 온도(℃)	수율(%)
고추	200	76.0	배전정지	200	84.8
	400	35.6		400	31.8
	600	29.1		600	26.4
벚꽃	200	76.9	왕겨	200	83.6
	400	35.5		400	42.1
	600	29.8		600	24.9
커피	200	87.6			
	400	29.4			
	600	24.5			

3. 바이오숯 특성분석

1) 비료성분 분석

- 각 원료를 200, 400, 600℃로 열분해하여 생산한 바이오숯의 화학적 특성을 분석하여 다음 표와 같이 나타내었음
- 바이오숯의 pH는 열분해 온도가 높아질수록 pH도 상승하는 결과를 보였으며 200℃에서는 7.0이하였으나 400℃부터 상승하여 염기성을 띠었음
- 탄소의 함량은 열분해 온도가 상승할수록 탄소 함량도 높아졌으며 배전정지의 탄소함량이 가장 높았으며 벚, 왕겨가 가장 낮았음
- 총질소 함량은 원료에 따라 큰 차이를 보였으며, 열분해 온도가 400℃ 였을 때 가장 높게 측정되었음
- 총질소가 가장 낮은 값은 0.6%로 왕겨를 200℃에서 열분해한 바이오숯이었으며, 가장 높은 값은 커피를 400℃에서 열분해한 바이오숯이 3.9%로 가장 높았음
- 인 함량은 다른 원소들에 비해 특히 낮은 값을 나타내었으며, 그중 고추 부산물의 바이오숯의 인산함량이 가장 높았음
- 인은 열분해 온도가 높아질수록 증가하는 경향을 보였으며, 최소 0.08%, 최대 0.71%, 평균 0.39%로 조사되었음

표 8. 농업부산물 바이오숯의 화학적 특성

		pH	유기물	T-C	T-N	C/N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
		----- % -----								
고추	200℃	6.7	80.8	46.9	2.0	23.1	0.46	2.77	2.90	1.04
	400℃	10.2	91.6	53.1	2.2	24.5	0.57	2.56	2.23	1.01
	600℃	11.1	103.4	60.0	1.9	31.2	0.71	3.24	3.66	2.04
벼짚	200℃	6.5	78.1	45.3	0.6	71.3	0.17	0.88	0.37	0.18
	400℃	6.9	92.8	53.9	1.1	49.7	0.45	1.95	1.21	0.46
	600℃	10.1	95.0	55.1	1.0	56.4	0.65	2.52	1.28	0.57
배전정지	200℃	6.1	85.7	49.7	0.6	81.5	0.18	0.54	0.58	0.17
	400℃	8	117.9	68.4	1.5	45.0	0.41	1.11	1.21	0.35
	600℃	9.6	141.9	82.3	1.1	66.1	0.46	1.32	1.58	0.31
왕겨	200℃	6.4	76.4	44.3	0.6	71.9	0.08	0.4	0.14	0.05
	400℃	7.6	87.6	52.0	0.9	58.3	0.19	0.87	0.32	0.10
	600℃	10	98.5	57.2	0.7	79.4	0.28	1.23	0.42	0.12
커피	200℃	5.9	97.5	56.6	2.5	22.3	0.23	0.37	0.18	0.23
	400℃	8.4	121.2	70.3	3.9	18.2	0.59	0.95	0.46	0.57
	600℃	9.6	138.0	80.1	3.5	22.9	0.44	0.85	0.31	0.34
최소		5.9	76.4	44.3	0.6	18.2	0.08	0.37	0.14	0.05
최대		11.1	141.9	82.3	3.9	81.5	0.71	3.24	3.66	2.04
평균		8.2	100.4	58.3	1.6	48.1	0.39	1.44	1.12	0.50

2) 중금속 함량

- 농업부산물 바이오숯의 중금속 분석결과는 아래 표와 같음
- 분석결과 농촌진흥청 고시 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’ 혼합유기질비료 기준 기준에 만족하였음

표 9. 농업부산물 바이오숯의 중금속 함량

시료	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	
	----- mg kg ⁻¹ -----								
고추	200℃	*n.d.	0.23	0.81	2.66	0.62	30.08	83.22	0.94
	400℃	n.d.	0.17	0.79	0.80	0.30	4.81	52.10	0.64
	600℃	n.d.	n.d.	0.74	1.23	1.13	9.34	61.17	1.28
벼짚	200℃	2.71	0.11	0.83	3.11	1.16	22.47	36.61	0.76
	400℃	3.76	0.25	0.58	3.43	1.96	6.49	56.86	1.15
	600℃	6.28	0.03	n.d.	2.98	2.74	6.35	69.38	1.69
배전 정지	200℃	0.83	0.22	n.d.	1.42	0.41	7.59	11.58	0.66
	400℃	n.d.	0.36	0.31	2.52	0.40	14.61	24.78	0.83
	600℃	n.d.	n.d.	0.35	2.90	1.99	29.41	34.95	1.04
왕겨	200℃	0.74	0.01	0.47	1.91	0.41	1.84	17.71	0.39
	400℃	0.98	0.05	n.d.	2.55	0.68	4.50	39.89	0.69
	600℃	0.90	n.d.	0.53	2.96	0.69	3.77	43.06	0.73
커피	200℃	0.48	n.d.	0.28	1.33	0.37	20.80	10.56	0.75
	400℃	0.51	n.d.	0.32	1.74	1.27	42.68	26.20	1.40
	600℃	0.40	n.d.	0.49	1.22	0.38	29.88	19.00	0.72
**유기질 비료 기준	20 이하	2 이하	1 이하	50 이하	90 이하	120 이하	400 이하	20 이하	

*n.d.: not detected

**유기질비료 기준: 농촌진흥청 고시 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’ 혼합유기질비료 기준

2) 바이오숯 표면 특성

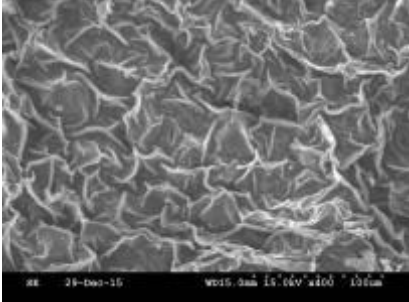
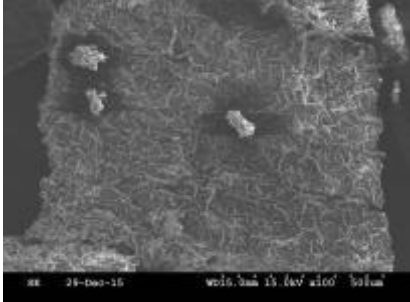
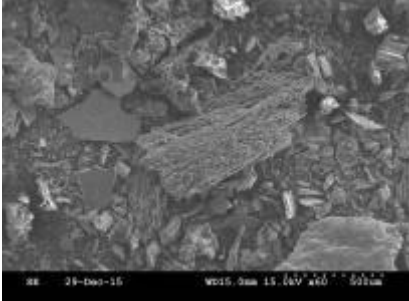
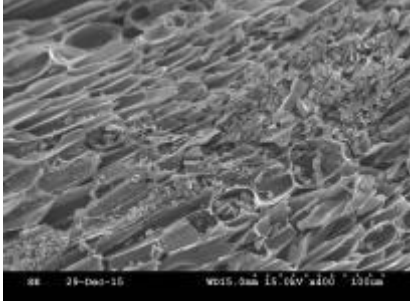
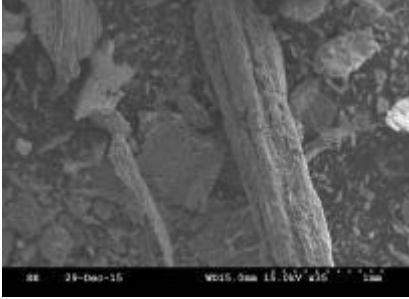
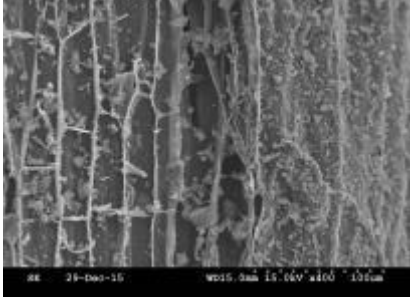
- 각 농업부산물 원료로 생산한 바이오숯의 표면 특성을 알아보기 위하여 SEM-EDX(Hitachi S-4300, Japan)분석을 진행하였으며 아래와 같음
- 열분해한 바이오숯의 표면의 탄소 함량은 열분해 온도가 높을수록 탄소함량도 높아졌음
- 바이오숯표면의 산소 함량은 200℃에서 400℃로 올라가는 동안에는 감소하였으나 400℃에서 600℃로 올라가면서 산소함량도 증가하였음

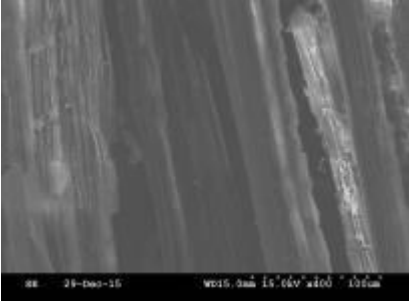
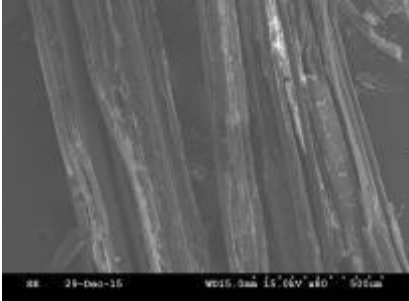
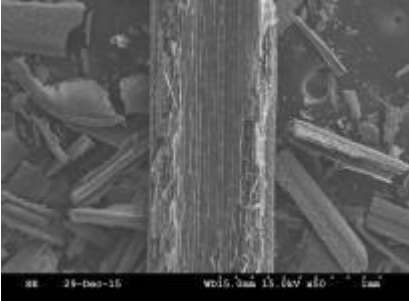
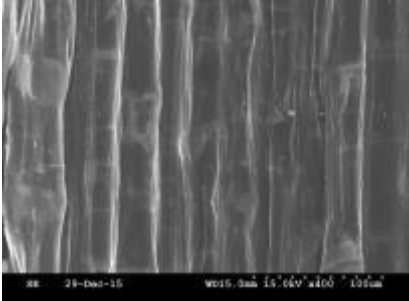
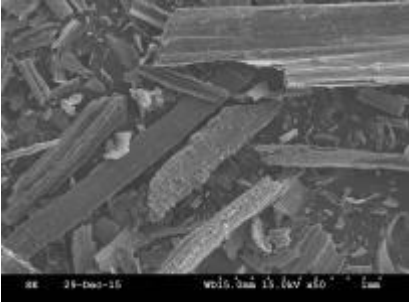
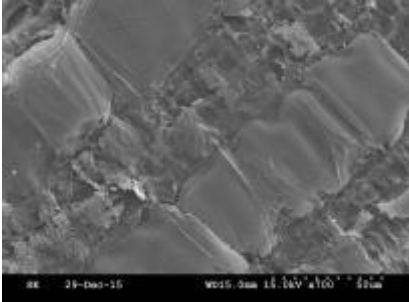
표 10. 농산부산물 바이오탄소의 열분해 온도에 따른 표면 원소 함량

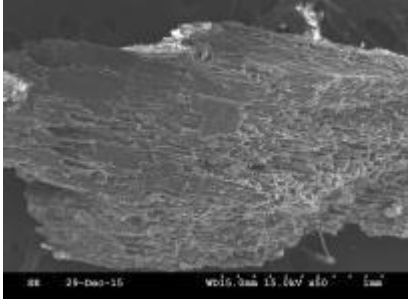
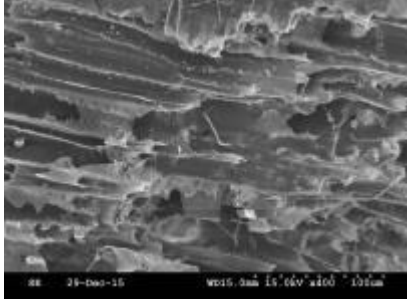
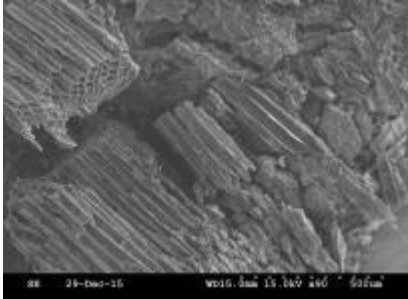
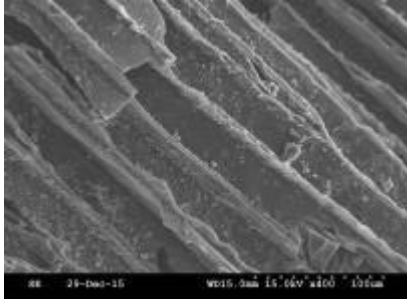
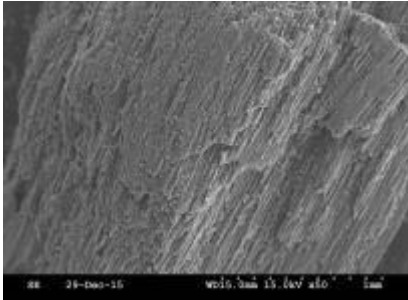
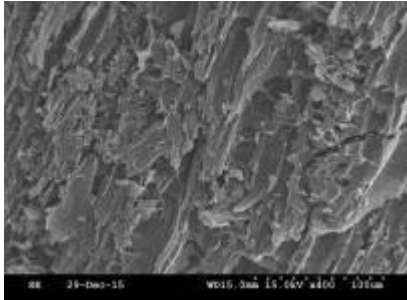
시료명	열처리 온도(℃)	C	O	Mg	K	Ca	Si	P	Cl	Na	S
		----- % -----									
고추	200	58.8	35.6	0.7	3.8	-	0.7	-	-	-	0.4
	400	72.3	19.2	0.7	5.9	0.9	-	-	0.7	-	0.3
	600	54.4	28.2	2.5	10.1	2.7	0.3	-	1.0	-	0.8
벗짚	200	57.4	37.1	-	3.4	-	1.5	-	0.7	-	-
	400	77.4	17.9	-	1.0	-	3.8	-	-	-	-
	600	52.5	32.5	-	2.7	-	11.2	-	1.1	-	-
배가지	200	58.0	41.1	-	0.9	-	-	-	-	-	-
	400	78.1	10.9	-	4.2	1.54	1.2	-	3.3	0.9	-
	600	90.7	6.9	-	2.5	-	-	-	-	-	-
왕겨	200	28.5	50.2	-	0.5	-	20.8	-	-	-	-
	400	23.9	51.0	-	0.5	-	24.0	-	-	-	-
	600	47.3	36.8	-	0.6	-	14.3	-	-	-	-
커피	200	67.7	32.1	-	0.2	-	-	-	-	-	-
	400	84.1	11.4	0.5	2.1	0.7	-	1.1	-	-	-
	600	88.3	8.0	0.5	1.7	0.6	-	0.9	-	-	-

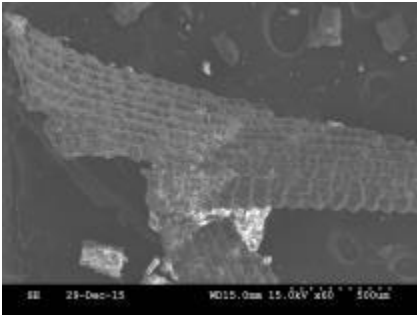
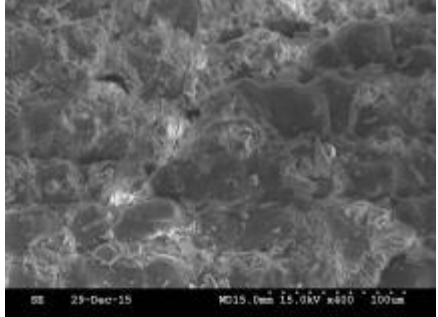
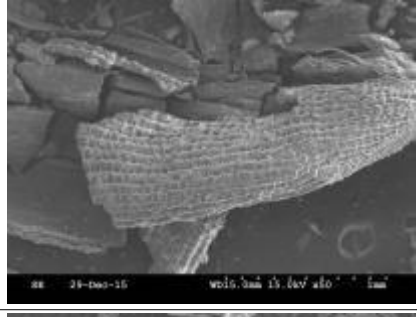
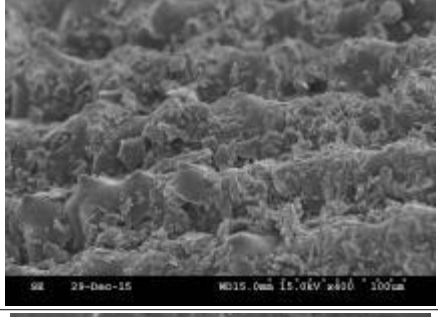

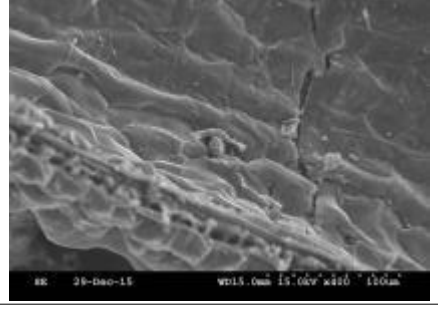
- 각 원료별 바이오숯의 표면특성이 다른 것을 확인할 수 있으며, 배전정지와 고추같이 즐기부분이 많이 포함된 바이오숯은 다공질 적인 특성이 있었음
- 열처리 온도가 올라갈수록 바이오숯 표면이 일그러지는 것을 볼 수 있음

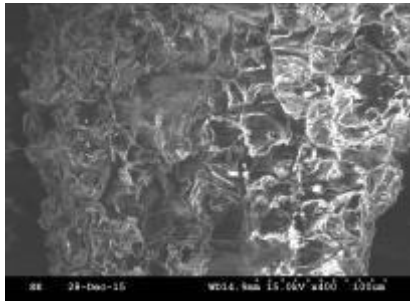
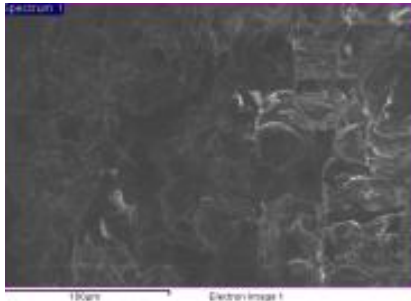
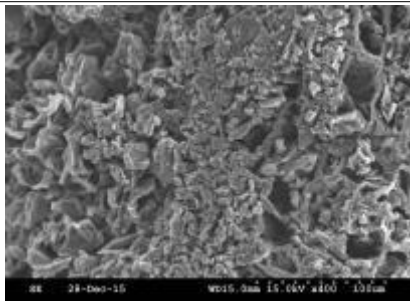
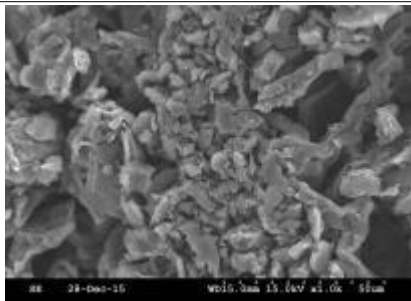
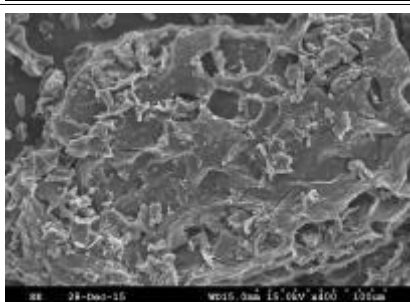
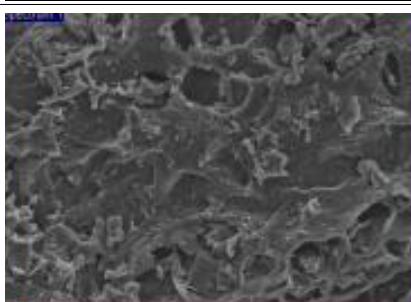
표 11. 바이오숯 주사전자현미경(SEM) 관찰 이미지.

시료명	열처리온도 (°C)	이미지	
고추	200		
	400		
	600		

시료명	열처리온도 (°C)	이미지	
벚꽃	200		
	400		
	600		

시료명	열처리온도 (°C)	이미지	
배전정지	200		
	400		
	600		

시료명	열처리온도 (°C)	이미지	
왕겨	200		
	400		
	600		

시료명	열처리온도 (°C)	이미지	
커피	200		
	400		
	600		

3) 바이오숯 선별

- 5종의 바이오매스를 열분해하여 생산한 바이오숯의 수율 및 특성 등을 고려하여 본 과제에서 가장 적합한 바이오숯을 선별함
- 먼저 생산 수율은 열분해 온도가 낮을수록 수율이 높아 가장 경제적인 것으로 사료되나 그 만큼 탄소의 함량도 낮았음
- 탄소의 함량은 온도가 높을수록 높아져 온실가스 감축량 산정시 높은 온도로 열분해한 바이오숯이 유리할 것으로 사료됨
- 또한 열분해 온도가 높으면 질소, 인산, 칼리의 함량도 증가하여 비료 효과도 좋을 것으로 판단됨
- 따라서 바이오숯 수율, 탄소함량, 질소, 인산, 가리 함량을 종합적으로 평가한 결과 고추대 및 커피박이 비료로서 가장 좋을 것으로 판단됨

다. 바이오숯 제형

- 바이오숯은 미세한 분말형태로 쉽게 먼지가 날리고 다루기 어려우며, 토양에 처리한 후 비나 바람에 의해 유실될 수 있는 단점이 있음
- 이러한 단점을 개선하기 위하여 본 사업에서는 바이오숯 분말을 입자형태로 제형하는 실험을 진행하였음

1. 바이오숯 비드 제작 조건 도출

1) 개요

- 기존 유기질비료의 형태는 분상 혹은 펠릿 형태로 타제품과 차별성을 주기 위하여 구슬형태의 비료를 제작하기로 함
- 본 실험에서 사용된 비드 제형방법은 토양 및 식물에 유해하지 않은 sodium alginate 제형방법을 사용하였음
- Sodium alginate는 다시마, 미역 등의 해조류에서 추출한 물질로 2가 양이온과 만나면 피막을 형성하며 응집하는 특성을 갖고 있음
- 또한, sodium alginate는 토양 중 중금속을 흡착하여 고정한다는 연구결과도 있어 중금속 저감 효과 또한 기대됨

2) 방법

- 바이오숯을 입단화하기 위한 방법 중 비드형태로 제작하기 위하여 아래 표와 같은 조건으로 실험을 진행하였음
- 바이오숯 기반 bead 제작방법은 아래와 같음
 - ①Sodium alginate 1.5%v/v 용액에 biochar 45%(v/v) 혼합한다.
 - ②충분히 혼합된 1)혼합액을 비드메이커 상부에 옮겨 담아 calcium nitrate 용액에 1방울씩 떨어뜨린다.
 - ③Calcium nitrate 용액에 20분이상 방치한다.
 - ④형성된 bead를 Calcium nitrate 용액에서 건져낸 후 세척한 뒤 60℃에서 건조한다.
 - ⑤건조된 비드 40%와 석고 15%, 피트모스 45%(v/v)를 리본믹서로 혼합한다.



그림 32. 비드메이커

표 12. 바이오숯 비드 제작 조건별 비드 특성

	Sodium alginate ----- % -----	바이오숯 함량 ----- % -----	Ca(NO ₃) ₂	방울 크기 ----- mm -----	건조 전 직경	건조 후 직경	용출액 pH	용출액 EC dS/m
조성 1	1.5	30	1.0	2.0	4.0	2.0	6.9	4.51
조성 2			3.0	2.0	4.0	2.0	6.7	8.33
조성 3			1.0	2.0	4.0	3.0	7.0	4.96
조성 4			3.0	2.0	4.0	3.0	6.7	9.50
조성 5			1.0	4.0	6.0	4.0~5.0	6.8	3.90
조성 6			3.0	4.0	6.0	4.0~5.0	6.8	4.29
바이오숯							6.7	0.90

3) 결과

- 바이오숯 성형후 용출액의 pH는 6.7~7.0으로 중성에 가까운 수준이었으며 조성 별로 큰 차이는 없었음
- 바이오숯 용출액의 EC는 Ca(NO₃)₂의 농도가 증가할수록 bead의 EC도 증가하였음
- 바이오숯의 함량오 높아질수록 건조 후 bead의 크기가 2.0mm에서 4.0mm까지 증가하였음
- 바이오숯 함량이 50%이상 높아지면 alginate의 점도가 높아져 생산속도가 떨어 짐
- 따라서 본 과제에 사용하는 bead 제작방법은 아래 조성으로 함
 - ①Sodium alginate 1.5%
 - ②Biochar 45%(v/v)
 - ③Ca(NO₃)₂ 1.0%



조성 1



조성 2



조성 3



조성 4



조성 5



조성 6

그림 33. 조성별 바이오솜 기반 bead 제작 결과

2. 바이오숯 펠릿 제작 조건 도출

1) 개요

- 기존 시판되고 있는 유기질비료와 동일한 방법으로 바이오숯을 입단화하는 방법을 모색함

2) 성형방법

- 바이오숯 입단화 방법 중 단순하며 대량생산이 쉬운 방법인 펠릿 성형방법을 적용함
- 바이오숯을 펠릿으로 성형하기 위하여 다음의 조건으로 펠릿 성형을 진행함
- 현재 보유하고 있는 장비로는 바이오숯과 같은 거친 미분을 펠릿으로 성형하기 어려워 바이오숯의 함량을 높일 수 없었음
- 바이오숯 pellet 성형방법은 아래와 같이 진행함
 - ①Biochar 40%와 석고 15%, 피트모스 45%(v/v)를 리본믹서로 혼합한다.
 - ②혼합 중 미량요소비료 0.2%(v/v)를 스프레이로 뿌린다.
 - ③혼합물을 펠릿 성형기에 투입하여 펠릿으로 성형한다.



리본믹서



펠릿 성형기

그림 34. 시제품 제작 설비

표 13. 바이오숯 펠릿 생산 배합비

	바이오숯	커피	미강
	----- %(v/v) -----		
조성 A	10	15	75
조성 B	10	0	90

2) 결과

- 성형결과 상기 조성으로 펠릿 성형이 원활하게 진행되었으나 기존 시판되는 제품과 강도의 차이가 컸음

- 성형성은 조성 A가 좋았으며 크기는 직경 6mm 길이 30mm였으며 조성 B는 동일한 직경에 길이는 10~20mm였음
- 조성 A는 커피 15%가 함유되어 양분을 보충하는 조성이지만, 펠릿 성형 후 쉽게 곰팡이가 발생하는 문제가 있어 커피를 제외한 조성 B로 생산을 진행함



조성 A 펠릿



조성 B 펠릿

그림 35. 바이오숯 기반 펠릿

라. 기초 재배실험(예비실험)

1. 바이오숯 이용 온실재배 기반 구축 및 기초 재배실험 실시

1) 온실재배 기반 구축

- 온실재배를 통해 수확한 작물의 생산량을 기존 관행 농법과 비교 및 농작물의 품질 분석을 통해 품질의 차이를 구명
- 농작물의 생산량 증대와 탄소저감 효과를 극대화
- 저탄소 재배실험을 위한 온실 기반 구축: 온실확보(충남대학교, 국립농업과학원)



충남대학교(대전)



농촌진흥청 국립농업과학원(전주)



충남대학교(대전)



농촌진흥청 국립농업과학원(전주)

그림 36. 충남대학교 및 농촌진흥청 온실

2) 재료 및 방법

- 장소: 충남대학교 농업생명과학대학 온실
- 작물: 배추(국풍), 상추(삼적로메인), 가지(천하대장), 고추(PP산울림), 양파(금대고황), 방울토마토(슈퍼산체리1호)
- 작물별 모종 이식일: 2016년 3월 17일
- 바이오숯 처리조건: 무처리(0%), 1%, 3%, 5%(w/w)
- 바이오숯 성상: 비드(포이엔 제공)
- 시비량: 농촌진흥청 작물별 표준시비량에 따라 시비
- 작물 재배 배지: 토양(충남대학교 농장 채취)

3) 결과

- 재배 실험용 토양 및 바이오숯의 기초분석 결과는 아래 표와 같음
- 재배 실험용 토양의 토성은 사양토이며, pH는 6.3으로 약산성을 띠었음
- EC는 0.2 ds m^{-1} 였으며, 토양 내 유기물 함량은 1.3%로 조사됨
- 분말, 비드, 펠렛 바이오숯의 pH는 각각 6.78, 7.25, 6.70 으로 조사됨
- 바이오숯 각각의 탄소함량은 482, 477, 447 g kg^{-1} 이었으며, 유기물함량은 83.0, 82.2, 77.0 %로 조사됨

표 14. 실험 토양의 기초분석

Soil texture		pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	OM (%)	Bulk density (g cm ⁻³)	Porosity (%)	Water content (%)
Soil	Sandy loam	6.3	0.2	1.3	1.4	46.9	20.9

표 15. 바이오숯의 기초분석

	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N	OM (%)	C/N ratio
Biochar	7.25±0.04	61.4±3.4	477±15	6.6±0.5	82.2	72.2

- 재배 실험 종료 후 수확한 배추의 생육조사 결과는 아래와 같음
- 배추 지상부의 생체중, 엽수, 엽장, 엽폭, 당도가 무처리구에서 가장 높았음
- 바이오숯 함량이 증가함에 따라 배추의 생육이 불량해 지는 경향을 보임
- 바이오숯 혼합비 증가에 따라 토양 pH가 증가하여 배추 생육 최적 pH 범위 (6.0~6.5)를 벗어났으며, EC도 함량이 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보임

표 16. 바이오숯 함량에 따른 배추의 생육 특성(아래 계속)

Treatments	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Water content (%)		Root length (cm)
	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root	Root
	Control	86.2±11.4	25.4±10.9	10.1±1.3	4.1±1.6	88.2±0.5	82.7±5.0
Biochar 1%	84.1±4.3	31.3±4.8	10.9±0.8	5.8±0.1	87.0±1.5	80.8±4.0	28.3±4.1
Biochar 3%	64.2±13.8	24.3±8.3	8.9±1.3	5.4±3.2	85.9±1.2	80.0±10.8	24.5±1.8
Biochar 5%	70.9±21.2	22.7±1.0	10.4±1.8	5.0±0.8	84.7±2.4	77.8±4.3	28.7±7.3

표 17. 바이오숯 함량에 따른 배추의 생육 특성

Treatments	Number of leaf per plant	Leaf length (cm)	Leaf width	NO ₃ -N (ppm)	Sweetness (Brix)
Control	19.0±1.0	22.6±0.4	11.8±0.6	3,100±572	4.5±1.1
Biochar 1%	19.0±1.0	22.5±0.7	11.3±0.2	3,833±1360	3.5±0.8
Biochar 3%	17.0±1.0	21.0±1.2	10.5±1.5	2,733±236	3.7±0.5
Biochar 5%	17.0±2.0	21.7±1.7	9.7±0.9	3,400±787	3.7±0.2

표 18. 배추 재배 후 토양의 pH 및 EC 분석

	Control	Biochar 1%	Biochar 3%	Biochar 5%
pH (1:5)	6.53±0.23	7.23±0.11	8.12±0.15	8.43±0.28
EC (ds m ⁻¹)	7.48±0.62	18.03±1.49	16.33±1.59	21.40±1.04



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 1%



Bead biochar 3%



Bead biochar 5%

그림 4. 바이오숯 처리량에 따른 배추 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 상추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 무처리구에 비해 바이오숯 처리구에서 엽수, 엽장, 엽폭이 증가하는 경향을 보임
- 바이오숯 함량이 증가할수록 생중량, 엽장, 엽폭이 증가하는 경향을 보임
- 바이오숯 3%처리구에서 가장 좋은 생육을 보였으며, 바이오숯 5%처리구에서 생육이 감소하였음
- 바이오숯 처리구가 무처리구에 비해 적은 NO₃⁻-N 함량을 나타냄
- 재배 후 토양의 분석 결과 바이오숯 함량에 따라 pH와 EC가 증가하는 경향을 나타냄

표 19. 바이오숯 함량에 따른 상추의 생육 특성(아래 계속)

Treatments	Fresh weight		Dry weight		Water content	
	(g)		(g)		(%)	
	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root
Control	30.1±2.5	4.1±0.2	2.3±0.1	0.4±0.0	92.4	90.2
Biochar 1%	60.6±8.1	8.9±2.1	5.0±0.7	0.9±0.3	91.7	89.9
Biochar 3%	61.9±2.0	9.9±1.1	4.7±0.3	0.9±0.1	92.4	90.9
Biochar 5%	65.5±3.1	8.8±0.8	5.6±0.4	0.9±0.1	91.5	89.8

표 20. 바이오숯 함량에 따른 상추의 생육 특성

Treatments	Number of leaf per plant	Leaf length	Leaf width	NO ₃ -N
			(cm)	(ppm)
Control	12.7±0.6	16.3±0.8	8.1±0.2	2,533±385.9
Biochar 1%	19.7±2.9	19.3±0.2	9.5±0.4	2,400±244.9
Biochar 3%	20.0±2.8	21.8±0.9	10.7±1.0	1,700±734.8
Biochar 5%	17.3±1.3	21.0±0.5	10.8±0.6	2,000±247.4

표 21. 배추 재배 후 토양의 pH 및 EC 분석

	Control	Biochar 1%	Biochar 3%	Biochar 5%
pH (1:5)	6.25±0.1	6.44±0.4	7.75±0.0	8.12±0.1
EC (ds m ⁻¹)	16.40±0.9	17.71±1.6	17.81±1.5	22.03±0.7



그림 37. 바이오숯 처리량에 따른 상추 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 무처리구에 비해 바이오숯 1%, 3% 처리구에서 좋은 생육을 보였으며, 5% 처리구에서 생육이 가장 저조하였음
- 바이오숯 5%를 뺀 나머지 처리구에서 생육이 양호한 것으로 판단되며, 3% 처리가 고추 생육에 가장 좋은 함량으로 판단됨
- 바이오숯 함량에 따라 pH와 EC가 증가하는 경향을 나타냄
- 재배 후 토양의 분석 결과 바이오숯 함량에 따라 pH와 EC가 증가하는 경향을 나타냄

표 22. 바이오숯 함량에 따른 고추의 생육 특성

Treatments	Plant height (cm)	Fresh weight (g)			Total fruits* (ea)	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	Sweetness (Brix)
		Shoot	Root	Fruit			
Control	37.7±3.7	11.8±2.4	4.4±1.6	20.2±6.0	R0.7, G2.0	730±149	9.9±1.1
Biochar 1%	41.7±2.6	14.3±2.2	4.2±1.0	21.5±1.4	R0.3, G2.3	917±160	7.2±0.6
Biochar 3%	40.7±2.9	13.7±3.4	2.9±0.9	13.3±3.9	R1.3, G2.0	583±110	14.0±2.6
Biochar 5%	35.0±6.4	9.9±5.3	2.1±0.9	10.6±7.8	R0.3, G1.3	690±50	9.3±0.7

* R: red fruit, G: green fruit

표 23. 배추 재배 후 토양의 pH 및 EC 분석

	Control	Biochar 1%	Biochar 3%	Biochar 5%
pH (1:5)	5.80±0.09	6.83±0.02	7.57±0.04	7.87±0.02
EC (ds m ⁻¹)	4.19±0.20	7.86±0.07	8.71±0.03	9.58±0.56



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 1%



Bead biochar 3%



Bead biochar 5%

그림 38. 바이오숯 처리량에 따른 고추 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 방울토마토의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 작물의 높이는 무처리구에서 가장 높게 나타났으며, 열매 개수와 열매당 무게, 지상부 무게는 무처리구에 비해 바이오숯 처리구에서 높았음
- 과실수는 바이오숯 1%에서 가장 많았고, 열매당 무게는 대조구보다 바이오숯 처리구가 높았음
- 당도는 무처리구에서 가장 높았고, 바이오숯 처리에 따라 감소하는 경향을 나타냄
- 재배 후 토양의 분석 결과 바이오숯 함량에 따라 pH와 EC가 증가하는 경향을 나타냄

표 24. 바이오숯 함량에 따른 방울토마토의 생육 특성

Treatments	Plant height (cm)	Number of fruit (per plant)	Weight per fruit (g)	Sweetness (Brix)	Shoot weight (g)	
					Fresh	Dry
Control	70.0±13.7	G3±2 R3±1	3.6±1.1	8.2±0.6	12.7±1.4	2.2±0.2
Biochar 1%	62.3±1.5	G4±1 Y0.3±0.6 R4±1	3.7±0.2	7.2±0.5	17.0±0.3	3.1±0.0
Biochar 3%	55.3±3.5	G2±1 R3.3±1.5	4.2±1.3	6.8±1.6	14.8±3.9	3.6±0.9
Biochar 5%	62.7±6.8	G2.3±1.2 R4.3±2.1	4.9±0.6	6.9±0.5	19.8±3.5	4.1±0.9

표 25. 방울토마토 재배 후 토양의 pH 및 EC 분석

	Control	Biochar 1%	Biochar 3%	Biochar 5%
pH (1:5)	6.42±0.11	7.61±0.08	8.23±0.06	8.26±0.01
EC (ds m ⁻¹)	1.85±0.07	2.78±0.07	5.03±0.10	5.64±0.30



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 1%



Bead biochar 3%



Bead biochar 5%

그림 39. 바이오숯 처리량에 따른 방울토마토 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 양파의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 무처리구에 비해 바이오숯 처리구에서 양호한 지상부 생육을 보임
- 바이오숯 1%와 3%처리구에서 양호한 생육을 보였으며, 5%처리구에서는 생육이 불량해짐
- 전체 처리구에서 양파의 지상부 생육은 확인 할 수 있었으나, 지하부의 생육이 불량하여 생육 특성 조사가 불가능 하다고 판단
- 재배 후 토양의 분석 결과 바이오숯 함량에 따라 pH와 EC가 증가하는 경향을 나타냄

표 26. 바이오숯 함량에 따른 양파의 생육 특성

Treatments	Stem length (cm)	Number of stem (per plant)
Control	30.7±2.9	5.3±0.4
Biochar 1%	41.5±1.8	6.0±0.0
Biochar 3%	40.2±1.7	6.3±0.4
Biochar 5%	30.5±3.2	5.7±0.4

표 27. 양파 재배 후 토양의 pH 및 EC 분석

	Control	Biochar 1%	Biochar 3%	Biochar 5%
pH (1:5)	5.96±0.05	7.25±0.05	7.51±0.03	7.51±0.03
EC (ds m ⁻¹)	5.05±0.13	5.84±0.11	7.51±0.04	7.74±0.07



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 1%



Bead biochar 3%



Bead biochar 5%

그림 40. 바이오숯 처리량에 따른 양파 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 가지의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 무처리구에 비해 바이오숯 처리구에서 작물 높이가 높았음
- 바이오숯 처리 비율이 높을수록 생육이 좋아지는 경향을 보임
- 열매가 열리지 않아 열매의 생육 특성을 조사하지 못함
- 재배 후 토양의 분석 결과 바이오숯 함량에 따라 pH와 EC가 증가하는 경향을 나타냄

표 28. 바이오숯 함량에 따른 가지의 생육 특성

Treatments	Plant height (cm)	Number of Fruit (per plant)	Total fruit weight (g)	Sweetness (Brix)
control	16.0±4.3	-	-	-
Biochar 1%	19.3±2.5	-	-	-
Biochar 3%	18.7±0.9	-	-	-
Biochar 5%	25.0±3.2	-	-	-

표 29. 양파 재배 후 토양의 pH 및 EC 분석

	Control	Biochar 1%	Biochar 3%	Biochar 5%
pH (1:5)	6.72±0.36	7.93±0.21	8.66±0.01	8.91±0.20
EC (ds m ⁻¹)	3.10±0.56	7.80±0.73	10.33±0.93	15.75±0.22



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 1%



Bead biochar 3%



Bead biochar 5%

그림 41. 바이오숯 처리량에 따른 가지 생육

3) 작물 후보군 기초 재배 실험 결론

- 비드 바이오숯 제형을 이용한 기초 작물 재배 실험
- 작물에 따라 최적의 처리 함량은 각기 다른 것으로 조사됨
 - 배추: 무처리 또는 바이오숯 1% 처리구
 - 상추: 바이오숯 3% 처리구
 - 고추: 바이오숯 3% 처리구
 - 방울토마토: 바이오숯 1% 처리구
 - 양파: 바이오숯 1% 또는 3% 처리구
 - 가지: 바이오숯 5% 처리구
- 양파는 뿌리가 여물지 않아 생육 특성 조사가 원활히 이루어지지 못함
 - 차후 다른 작물로 변경 필요 할 수 있음
- 가지는 열매가 열리지 않아 생육 특성 조사가 원활히 이루어지지 못함
 - 차후 다른 작물로 변경 필요 할 수 있음

- 바이오숯 함량에 따라 토양의 pH와 EC에 영향을 미치는 것으로 판단됨
 - 바이오숯 함량이 높아질수록 토양의 pH와 EC가 증가하는 경향을 보임
- 차후 바이오숯의 3가지 제형에 대한 작물실험을 통하여 바이오숯 제형 및 함량에 따른 작물의 생육 특성 조사 필요

마. 바이오숯 시제품 1차 평가(Lab Scale)

1. 바이오숯 기반 시제품 재배실험 실시

1) 개요

- 본 실험은 바이오숯 및 바이오숯 성형 시제품이 작물 재배에 미치는 영향을 구명하기 위하여 본 실험을 진행함

2) 실험 3: 온실 내 토양 기반 작물 재배 실험

- 장소: 농촌진흥청 국립농업과학원 온실
- 작물: 가지(천하대장), 고추(카스), 상추(한밭), 토마토(썬글로브)
- 작물별 모종 이식일: 2016년 6월 7일
- 바이오숯 처리조건: 무처리(0%), NPK, 시제품 3%, 7%(v/v)
 - 무처리구를 뺀 나머지 처리구 모두에 NPK 처리
- 시비량: 농촌진흥청 작물별 표준시비량에 따라 시비
- 바이오숯 성상: 분말, 비드, 펠렛(포이엔 제공)
- 작물 재배 배지: 토양(< 2mm)

표 30. 바이오숯의 기초분석

	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N	O.M. (%)	C/N ratio
Powder	6.78±0.04	76.2±3.6	482±13	5.8±1.6	83.0	83.1
Bead	7.25±0.04	61.4±3.4	477±15	6.6±0.5	82.2	72.2
Pellet	6.70±0.05	24.9±0.6	447±10	18.1±1.2	77.0	24.6



가지



고추



상추



토마토

그림 42. 농촌진흥청 온실 내 작물 생육 실험

3) 작물 생육조사 결과

- 바이오숯을 처리하여 재배한 가지의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 펠렛 바이오숯 처리구를 뺀 나머지 처리구에서 경직경, 가지수, 지상부 생체중이 무처리구에 비해 높았음
- 바이오숯 처리구에서 바이오숯 처리 비율이 높을수록 생육이 불량해지는 경향을 보임
- 열매개수는 무처리구에서 가장 높았으며, 펠렛 바이오숯 처리구에서는 과실 생장이 불량하였고 영양생장만 계속됨

표 31. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지의 생육 특성(아래계속)

Treatments	Plant			
	Height (cm)	Diameter (mm)	Number of branch per plant	Fresh weight (g)
Control	55.3±5.9	6.8±0.8	21.3±2.5	55.7±3.4
N-P-K	74.3±0.9	9.3±1.0	37.3±3.3	166.5±15.8
Powder 3%	79.3±6.9	8.9±0.8	48.0±0.8	161.8±9.1
Powder 7%	82.3±7.8	8.8±0.6	43.7±3.3	150.4±10.9
Bead 3%	76.3±4.0	8.5±0.6	41.3±3.1	159.8±1.6
Bead 7%	83.0±2.9	8.1±0.4	39.3±1.2	156.7±10.7
Pellet 3%	48.0±9.0	8.4±0.1	40.3±7.7	172.7±8.6
Pellet 7%	46.0±4.9	7.9±0.2	41.7±2.6	144.0±20.6

표 32. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지의 생육 특성(아래계속)

Treatments	Number of fruit per plant	Fruit		
		Length (cm)	Diameter	Fresh weight (g)
Control	0.8±0.2	7.2±6.3	19.9±17.3	28.4±25.9
N-P-K	0.7±0.3	7.7±7.1	20.4±17.8	40.0±34.7
Powder 3%	0.4±0.2	3.7±6.4	10.5±18.1	13.4±23.2
Powder 7%	0.4±0.2	3.3±5.8	9.5±16.4	11.4±19.8
Bead 3%	0.3±0.3	6.8±5.9	21.3±18.5	25.0±21.7
Bead 7%	0.3±0.3	3.0±5.2	9.1±15.7	9.07±15.7
Pellet 3%	-	-	-	-
Pellet 7%	-	-	-	-



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 3%



Powder biochar 7%



Bead biochar 3%



Bead biochar 7%

<No fruit>

<No fruit>

Pellet biochar 3%

Pellet biochar 7%

그림 43. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지의 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 무처리구에 비해 바이오숯 처리구에서 높은 작물 높이를 보임
- 펠렛 바이오숯 처리구를 뺀 나머지 바이오숯 처리구에서 처리비율이 높을수록 생육이 불량해지는 경향을 보임
- 열매 개수는 펠렛 7% 처리구에서 가장 높았으며, 비드 7% 처리구에서 가장 낮았음

표 33. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 고추의 생육 특성

Treatments	Plant		Fruit	
	Height (cm)	Number of fruit (ea)	Length (cm)	Diameter (cm)
Control	75.0±9.8	16.6±4.8	8.4±0.6	1.7±0.2
N-P-K	97.3±3.9	35.2±20.7	9.0±0.2	1.5±0.0
Powder 3%	104.3±3.3	38.3±14.3	8.0±0.3	1.6±0.1
Powder 7%	118.0±7.8	31.2±20.5	8.0±0.7	1.6±0.3
Bead 3%	119.7±11.6	37.1±13.3	7.6±0.1	1.4±0.1
Bead 7%	120.3±4.1	14.0±3.3	7.6±0.5	1.4±0.2
Pellet 3%	120.0±9.9	30.3±6.1	7.8±0.2	1.4±0.2
Pellet 7%	109.3±6.0	40.4±16.7	8.1±0.1	1.5±0.0

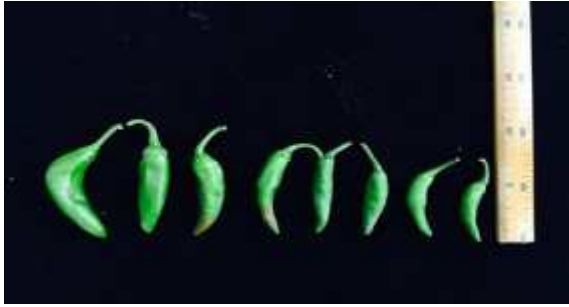
※ 총 3회 수확하였으며, 수확량을 누적하여 계산



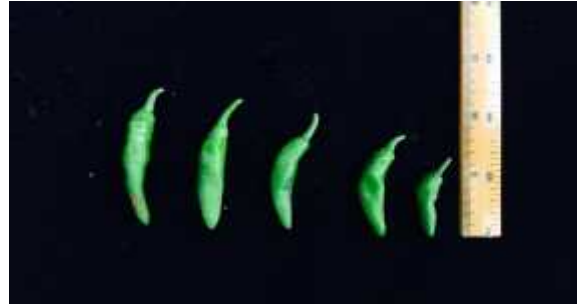
Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 3%



Powder biochar 7%



Bead biochar 3%



Bead biochar 7%



Pellet biochar 3%



Pellet biochar 7%

그림 44. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 고추의 생육(3차 수확 시)

- 바이오숯을 처리하여 재배한 상추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 분말 바이오숯 처리구는 처리 비율이 높을수록 생육이 감소하는 경향을 보임
- 비드, 펠렛 바이오숯 처리구는 처리 비율이 높을수록 생육이 증가함
- 비드 바이오숯 7% 처리구와 펠렛 바이오숯 7%처리구에서 비교적 좋은 생육을 보임

표 34. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 상추의 생육 특성

Treatments	Fresh weight (g)		Number of leaf (per plant)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)
	Shoot	Root			
Control	34.5±3.6	1.4±0.3	20±2.2	19.0±0.6	9.2±0.4
N-P-K	30.5±8.6	3.0±0.8	19±3.9	15.7±0.8	8.1±1.1
Powder 3%	31.3±5.1	3.0±0.2	23±0.8	13.7±0.4	7.7±0.3
Powder 7%	28.1±4.7	3.0±0.3	21±3.1	14.7±0.3	8.5±0.2
Bead 3%	30.5±2.8	2.3±0.1	19±2.6	15.8±0.2	9.1±0.3
Bead 7%	39.7±3.1	1.6±0.1	21±1.2	17.2±1.2	9.8±0.2
Pellet 3%	27.8±2.0	2.3±0.3	20±1.2	15.3±0.6	8.7±0.7
Pellet 7%	34.5±5.9	1.4±0.0	20±1.9	19.0±0.6	9.2±0.3



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 3%



Powder biochar 7%



Bead biochar 3%



Bead biochar 7%



Pellet biochar 3%



Pellet biochar 7%

그림 45. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 상추의 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 방울토마토의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 무처리구와 NPK처리구에 비해 바이오숯 처리구에서 높은 작물 높이를 보임
- 작물 높이는 펠렛 바이오숯 7% 처리구에서 가장 높았으며, 무처리구에서 가장 낮았음
- 지상부 생체중은 펠렛 바이오숯 7% 처리구에서 가장 높았으며, 무처리구에서 가장 낮았음

표 35. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 방울토마토의 생육 특성

Treatments	Height (cm)	Stem diameter	Shoot fresh weight (g)
Control	117.7±3.1	6.79±0.3	96.2±10.1
N-P-K	121.7±8.7	7.05±0.6	197.2±3.3
Powder 3%	142.7±9.8	7.28±0.5	194.2±5.9
Powder 7%	149.3±16.4	6.23±0.5	168.5±2.0
Bead 3%	148.3±13.5	7.31±0.5	187.6±16.5
Bead 7%	145.3±24.5	7.37±0.3	178.3±0.3
Pellet 3%	147.3±19.7	7.39±0.3	233.5±28.1
Pellet 7%	172.7±18.9	6.77±0.3	239.2±28.3

3) 결론

- 분말, 비드, 펠렛 바이오숯 제형을 이용한 작물 재배 실험
- 작물에 따라 최적의 제형 및 처리 함량은 각기 다른 것으로 조사됨
 - 가지: 무처리구
 - 고추: 펠렛 바이오숯 7% 처리구(열매 개수)
 - 상추: 비드 바이오숯 7%처리구, 펠렛 바이오숯 7% 처리구
 - 방울토마토: 펠렛 바이오숯 7% 처리구
- 이전 실험에서 가지는 열매가 열리지 않아 생육 특성 조사가 원활히 이루어지지 못하였지만 이번 실험에서는 열매가 맺어 조사가 가능했음
- 바이오숯의 효과는 사용된 바이오매스 원료, 생산 조건뿐만 아니라 제형에 따라 작물생육에 미치는 영향이 다르기 때문에 바이오숯 제형에 따른 특성 연구가 지속적으로 필요 할 것으로 판단

바. 시제품 현장실증(Pilot scale)

1. 현장실증 실험 준비

- 시제품 현장실증 실험을 위하여 농가 대여 및 시제품 처리 등을 준비함

1) 농장대여

- 현장실증 실험을 위한 농장은 충남 청양 대치면에 위치한 농가를 대여하였으며 농가사진은 아래 그림과 같음
- 농가 1동의 면적은 약 240m²으로 본 실험에 사용한 온실 외에는 이미 작물이 재배 중으로 대여가 불가하였음
- 본 시험에서 대여한 농가는 고추를 재배하던 온실로 시험전 토양의 기본 특성은 아래 표와 같음
- 토성은 모래와 점토함량이 높은 사질식양토로 고추재배에 적합한 토양임
- 시험전 토양의 pH는 6.27로 시설재배지 토양의 평균 pH와 비교하면 높은 편이었음
- EC는 11.45dS/m로 일반 밭토양보다 높은 편이나 시설재배지 토양 평균 값보다는 낮았음
- 토양 중 양분함량은 질소 전량을 제외하고 상당히 높았으며 유기물, 유효인산, 교환성 Ca의 함량이 높았음



그림 46. 현장실증을 위한 충남 청양 농가

표 36. 시험전 밭 토양의 기본 분석 결과

분석 항목		시험전 토양	단위
	pH	6.27	-
	EC	11.45	dS/m
	질소전량	0.42	%
	유기물	5.05	
	유효인산	1,162.8	mg/kg
교환성 양이온	K ⁺	2.98	mg/kg
	Ca ²⁺	24.11	
	Mg ²⁺	6.97	
	Na ⁺	0.81	
	CEC	20.89	cmol ⁺ /kg
토성	sand	55	%
	silt	25	
	clay	20	
	토성	사질식양토	-

2) 시험구 조성

- 본 실험에 사용한 시제품은 2종으로 (주)포이엔에서 제작한 시제품을 사용하였음
- 본 실험에 사용한 시제품 2종(bead, powder)은 아래 사진과 같음



시제품 bead



시제품 powder

그림 47. 바이오솔 시제품 2종

- 시제품의 처리는 토양 무게비로 3, 7% 처리하였으며 별도의 처리가 없는 시험

구를 대조구로 설정함

- 당초 연구개발계획시 선정한 작물 6종은 고추, 상추, 배추, 토마토, 가지, 양파 였으나 양파의 재배시기를 놓쳐 양파대신 부추로 진행함
- 따라서 본 실험의 공시작물은 6종으로 고추, 상추, 배추, 토마토 가지, 대파며 구체적인 시험구 조성은 아래와 같음

A. 고추		B. 상추		C. 배추	
① 기존 토양	대조구	① 기존 토양	대조구	① 기존 토양	
② BC 분말 3% 처리	실험구1그룹	② BC 분말 3% 처리	실험구1그룹	② BC 분말 3% 처리	
③ BC 분말 7% 처리		③ BC 분말 7% 처리		③ BC 분말 7% 처리	
④ BC 비드 3% 처리	실험구2그룹	④ BC 비드 3% 처리	실험구2그룹	④ BC 비드 3% 처리	

D. 토마토		E. 가지		F. 부추	
① 기존 토양	대조구	① 기존 토양	대조구	① 기존 토양	
② BC 분말 3% 처리	실험구1그룹	② BC 분말 3% 처리	실험구1그룹	② BC 분말 3% 처리	
③ BC 분말 7% 처리		③ BC 분말 7% 처리		③ BC 분말 7% 처리	
④ BC 비드 3% 처리	실험구2그룹	④ BC 비드 3% 처리	실험구2그룹	④ BC 비드 3% 처리	

- 시험구 조성방법은 아래 사진과 같이 진행함



시제품 처리



시제품, 토양 혼합



두둑 작업



비닐 작업



공시작물 모종 정식



시험구별 풋발 제작



대조구 풋발



시험구 A1(powder 3wt%)



시험구 A1(powder 7wt%)



시험구 B1(bead 3wt%)

그림 48. 시험구 조성 방법

- 온실 내 대조구와 시험구 모식도는 아래 모식도와 같음

	고추 (5개체)	상추 (5개체)	배추 (5개체)	가지 (5개체)	토마토 (5개체)	대파 (5개체)
대조구	A ① A ① A ① A ① A ①	B ① B ① B ① B ①	C ① C ① C ① C ①	D ① D ① D ① D ①	E ① E ① E ① E ①	F ① F ① F ① F ① F ①
시험구 1그룹	A ② A ② A ② A ②	B ② B ② B ② B ②	C ② C ② C ② C ②	D ② D ② D ② D ②	E ② E ② E ② E ②	F ② F ② F ② F ② F ②
시험구 2그룹	A ③ A ③ A ③ A ③	B ③ B ③ B ③ B ③	C ③ C ③ C ③ C ③	D ③ D ③ D ③ D ③	E ③ E ③ E ③ E ③	F ③ F ③ F ③ F ③ F ③

- 현장실증 실험은 약 2개월간 진행되었으며 2개월 후 작물 수확을 진행하였으며 채취한 샘플은 아래와 같이 분석을 진행함

① 식물체 생육조사

- 배추: 엽수, 최대엽, 엽록소, 결구중, 결구횡, 결구중, 생체중, 건물중
- 상추: 엽장, 엽폭, 엽록소, 생체중, 건물중
- 가지: 초장, 중경장, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
- 고추: 초장, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
- 토마토: 초장, 엽장, 엽폭, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
- 대파: 초장, 엽장, 엽록소, 위경길이, 위경당 입의 수, 생체중, 건물중

② 식물체 주원소 분석

- 질소전량, 인산전량,加里전량, 칼슘전량, 고토전량

2. 현장실증 실험 결과

1) 식물체 생육조사 결과

- 배추 생육조사결과는 아래 표와 같음
- 배추의 외엽수는 powder 시험구의 배추가 17장으로 가장 많았으며 대조구와 6장 차이였음
- 내엽의 수도 powder 시험구 상추가 가장 많아 엽수는 powder 7% 시험구 배추가 가장 많았음
- 배추의 엽장은 대조구가 54.4cm로 가장 컸으나 엽폭은 powder 3% 시험구가 39.0cm로 가장 컸음
- 배추 잎의 엽록소함량은 powder 시험구가 대조구 및 bead 시험구보다 좋았으며 powder 3, 7% 각각 4.04, 4.12mg/100cm²으로 측정됨
- 배추 결구의 크기는 powder 3% 시험구가 가장 컸으며 bead 3% 시험구가 가장 작았음
- 결구의 무게는 powder 시험구가 주당 2.35kg으로 가장 컸으며 이어 대조구가 주당 2.24kg으로 컸음
- 배추의 생체중은 powder 3% 시험구가 주당 평균 4.53kg으로 가장 컸으며 bead 3% 시험구가 2.73kg으로 가장 작았음
- 시제품 처리 후 배추의 생육은 powder 3%가 전반적으로 가장 좋았으며 bead 3% 시험구가 가장 좋지 않았음

표 37. 시험구별 배추 생육조사 결과

	엽수		최대엽		엽록소	결구종	결구횡	결구중	생체중	건물중
	외엽	내엽	엽장	엽폭						
	ea		cm							
대조구	11	70	54.5	19.5	2.72	29.0	15.0	2.24	3.40	128.86
powder 3%	16	75	52.0	39.0	4.04	31.0	17.0	2.35	4.53	216.53
powder 7%	17	74	52.5	31.0	4.12	25.5	13.3	1.19	2.90	89.61
bead 3%	12	71	51.0	30.8	3.26	27.5	13.5	1.67	2.73	79.44

- 시제품 처리 후 상추의 생육조사 결과는 아래 표와 같음
- 엽장 및 엽폭은 powder 7% 시험구가 각각 23.5, 23.0cm로 가장 좋았으며 엽록소의 함량은 powder 3% 시험구가 2.02mg/100cm²으로 가장 좋았음
- 상추의 평균 생체중은 powder 7% 시험구가 406.17g으로 가장 좋았으며 powder 3% 시험구가 326.90g으로 가장 좋지 않았음
- 상추의 평균 건물중은 powder 7% 시험구가 22.83g으로 가장 좋았음
- 상추의 생육조사 결과 powder 7% 시험구 상추의 생육이 가장 좋은 것으로 판단됨

표 38. 시험구별 상추 생육조사 결과

	엽장	최대엽 엽폭	엽록소	생체중	건물중
	cm		mg/100cm ²	g/주	
대조구	23.0	19.5	1.45	334.03	21.38
powder 3%	21.5	15.3	2.02	326.90	19.19
powder 7%	23.5	23.0	1.38	406.17	22.83
bead 3%	22.8	17.3	1.53	354.56	20.35

- 시험구별 가지의 생육조사 결과는 아래 표와 같음
- 가지의 초장은 powder 3% 시험구의 가지가 134cm로 가장 컸으며 중경장은 대조구가 25cm로 가장 컸음
- 가지의 경경은 powder 3, 7%가 좋았으며 각각 15.34, 15.62mm였음
- 엽록소함량은 powder 7%가 5.72mg/100cm²으로 가장 좋았으나 대조구가 5.28mg/100cm²으로 큰 차이는 없었음
- 가지 과실의 크기는 bead 3%가 과장, 과경 각각 26.0, 54.06cm로 가장 컸으며 대조구가 18.0, 36.46cm로 가장 작았음
- 가지 1주당 과수의 수는 powder 3% 시험구가 주당 6개로 가장 많았으며 powder 7%와 bead 3%가 주당 4개로 가장 적었음
- 주당 과수의 무게는 과수가 가장 많았던 powder 3% 시험구가 주당 594.54g으로 가장 많았으며 powder 7%가 주당 373.90g으로 가장 적었음

표 39. 시험구별 가지 생육조사 결과

	초장 cm	중경장	경경 mm	엽록소 mg/100cm ²	과장 cm	과경	과수 ea/주	과중 g/주
대조구	126	25	14.24	5.28	18.0	36.46	5	413.43
powder 3%	134	16	15.34	5.38	20.3	49.28	6	594.54
powder 7%	128	19	15.62	5.72	17.0	49.08	4	373.90
bead 3%	130	19	14.81	5.34	26.0	54.06	4	528.15

- 시험구별 고추의 생육조사 결과는 아래 표와 같음
- 고추 1주의 평균 초장은 powder 3%와 bead 3%가 각각 127.0, 126.0cm로 가장 좋았으며 대조구는 107.5cm로 가장 작았음
- 고추 1주당 과수의 수는 powder 7%와 bead 3%가 주당 32개로 가장 많았으며 주당 과수의 무게는 powder 7%가 520.80g으로 가장 많았음

표 40. 시험구별 고추 생육조사 결과

	초장 cm	경경 mm	엽록소 mg/100cm ²	과장 mm	과경	과수 ea/주	과중 g/주
대조구	107.5	10.67	5.65	15.2	18.80	22	334.78
powder 3%	127.0	12.74	5.91	16.2	26.48	22	304.51
powder 7%	118.0	13.71	6.11	16.8	23.63	32	520.80
bead 3%	126.0	11.75	5.78	18.0	25.69	32	461.05

- 시험구별 토마토의 생육조사 결과는 아래 표와 같음

- 토마토 1주의 평균 초장은 powder 3%가 123.0cm로 가장 컸으나 시험구별 큰 차이는 없었음
- 토마토 과수의 크기 중 과장은 대조구가 43.3mm로 가장 컸으며 과경은 powder 3%가 28.8mm로 가장 컸음
- 토마토 1주당 과수의 수는 powder 7%가 주당 40개로 가장 많았으며 과중 또한 453.00g으로 powder 7%가 가장 높았음
- 토마토 과실의 당도는 powder 3% 시험구의 토마토가 7.9brix로 가장 당도가 높았으며 대조구가 5.2brix로 가장 낮았음

표 41. 시험구별 토마토 생육조사 결과

	초장	최대엽		경경	엽록소	과장	과경	과수	과중	당도
		엽장	엽폭							
		cm		mm	mg/100cm ²	mm		ea/주	g/주	Brix
대조구	120.5	12.0	6.0	10.08	4.06	43.3	26.6	27	296.18	5.2
powder 3%	123.0	12.0	7.1	9.67	4.31	37.3	28.8	32	396.38	7.9
powder 7%	121.5	12.5	9.0	11.15	4.94	42.3	26.2	40	453.00	6.6
bead 3%	121.5	13.5	8.2	11.23	3.82	40.3	24.2	30	347.44	5.8

- 시험구별 대파의 생육조사 결과는 아래 표와 같음
- 대파의 초장은 powder 7% 시험구의 대파가 69.0cm로 가장 컸으며 엽장 또한 powder 7% 시험구가 54.5cm로 가장 컸으나 대조구와 큰 차이는 없었음
- 대파 1 주당 잎의 수는 powder 3%가 주당 9개로 가장 많았으며 대조구, powder는 주당 7개로 가장 적었음
- 대파의 평균 생체중 및 건물중은 powder 3%가 주당 각각 153.89, 11.26g으로 가장 좋았으며 이어 대조구가 각각 134.84, 8.36g powder 3% 다음으로 좋았음

표 42. 시험구별 대파 생육조사 결과

	초장	엽장	엽폭	위경길이	위경당 엽수	생체중	건물중
	----- cm -----				ea/주	g/주	
대조구	68.3	54.0	2.4	9.0	7	134.84	8.36
powder 3%	62.2	46.0	2.3	6.0	9	153.89	11.26
powder 7%	69.0	54.5	2.2	10.1	7	97.12	6.45
bead 3%	54.0	44.2	2.1	6.0	8	97.76	5.22

2) 식물체 성분분석 결과

- 각 시험구별 식물체의 성분분석결과에는 아래 표와 같음
- 시제품 처리 후 가장 변화가 컸던 항목은 질소로 가치를 제외하고 모든 작물에 질소 함량이 증가한 것을 확인할 수 있었음
- 식물체내 인산함량은 대조구와 시험구간 큰 차이가 없었으며 오히려 감소한 식물체도 있었음
- 식물체내 칼륨의 함량도 큰 차이가 없었으나 고추의 칼륨 함량에서 powder 시험구의 고추가 대조구대비 2배이상 증가한 것을 확인 할 수 있었음

표 43. 현장실증 실험 식물체 성분분석 결과

		질소전량	인산전량	가리전량	칼슘전량	고토전량
		----- % -----				
배추	대조구	5.60	0.90	2.87	3.33	0.45
	powder 3%	6.98	0.74	2.45	2.54	0.32
	powder 7%	6.95	0.84	3.14	3.49	0.48
	bead 3%	6.99	0.93	2.30	2.79	0.41
상추	대조구	3.59	0.37	2.74	1.96	0.41
	powder 3%	4.16	0.43	3.55	2.00	0.32
	powder 7%	4.12	0.39	3.53	2.31	0.29
	bead 3%	4.16	0.57	3.26	1.80	0.47
가지	대조구	5.80	0.38	1.89	2.18	0.56
	powder 3%	6.01	0.38	1.42	2.13	0.45
	powder 7%	5.99	0.32	2.13	2.51	0.39
	bead 3%	5.74	0.32	2.01	2.44	0.45
고추	대조구	4.73	0.16	1.10	1.89	0.61
	powder 3%	5.76	0.26	3.04	1.84	0.49
	powder 7%	5.70	0.22	2.11	2.00	0.51
	bead 3%	5.71	0.22	1.85	1.92	0.63
토마토	대조구	3.00	0.23	2.74	2.77	0.10
	powder 3%	3.87	0.18	2.31	2.29	0.57
	powder 7%	3.67	0.20	2.44	3.13	0.89
	bead 3%	3.49	0.23	2.99	2.24	0.69
파	대조구	3.89	0.32	2.04	3.06	0.45
	powder 3%	4.81	0.51	2.08	1.20	0.21
	powder 7%	5.18	0.44	2.16	1.14	0.23
	bead 3%	5.02	0.38	2.25	2.33	0.34

사. 바이오숯 기반 시제품 제작

1. 원료선정 및 배합

1) 선정 원료 및 시제품 배합비

- 1연차는 바이오숯만을 이용한 시제품으로 비료성분 부족, 강도 등 문제점이 많았음
- 2연차 시제품은 비료성분 및 강도를 보완하여 시제품을 생산함
- Pellet 형태의 시제품의 강도를 보완하고 바이오숯의 높은 pH를 적정 수준으로 조절하기 위하여 석고를 첨가함
- Bead 형태의 시제품은 1차년도 성형결과를 바탕으로 성형 조성이 선정됨
- Pellet 및 bead 시제품의 조성은 다음과 같음

표 44. 바이오 숯 bead의 조성

	Alginate	Ca(NO ₃) ₂	바이오숯
	----- %(v/v) -----		
Bead 조성	1.5	1.0	45

표 45. 바이오 숯 bead 혼합 시제품 배합비

	바이오 숯 Bead	피트모스	석고
	----- %(v/v) -----		
Bead 혼합 시제품	40	45	15

표 46. Pellet 시제품 배합비

	바이오숯	피트모스	석고	미량요소비료
	----- %(v/v) -----			
Pellet 시제품	40	45	15	0.2

2. 시제품 제작 방법

1) Bead 혼합 시제품

- Bead 혼합시제품의 제작 방법은 다음과 같음
 - ① Sodium alginate 1.5%(v/v) 용액에 biochar 45%(v/v) 혼합한다.
 - ② 충분히 혼합된 1)혼합액을 비드메이커 상부에 옮겨 담아 calcium nitrate 용액에 1방울씩 떨어뜨린다.

- ③ Calcium nitrate 용액에 20분이상 방치한다.
- ④ 형성된 bead를 Calcium nitrate 용액에서 건져낸 후 세척한 뒤 60°C 에서 건조한다.
- ⑤ 건조된 비드 40%와 석고 15%, 피트모스 45%(v/v)를 리본믹서로 혼합한다.

1) Pellet 시제품

- Pellet 시제품의 제작 방법은 다음과 같음

- ① Biochar 40%와 석고 15%, 피트모스 45%(v/v)를 리본믹서로 혼합한다.
- ② 혼합 중 미량요소비료 0.2%(v/v)를 스프레이로 뿌린다.
- ③ 혼합물을 펠릿 성형기에 투입하여 펠릿으로 성형한다.



리본믹서



비드메이커



펠릿 성형기

그림 49. 시제품 제작 설비

3. 바이오 숯 시제품 성형 결과

1) 바이오 숯 bead 시제품

- 바이오 숯 bead는 아래 왼쪽 그림과 같음
- 건조 전 3~4mm 크기였으나 건조 후 약 2~3mm로 작아졌으며 색상도 검은색에서 좀 더 밝아졌음
- 바이오 숯 혼합 시제품은 석고, 피트모스, 미량요소 비료를 혼합하였으며 완전히 분쇄되지 않은 석고 덩어리가 있었음
- 피트모스가 바이오 숯 bead를 완전히 감싸고 있는 형태로 혼합 시제품에서는 bead의 형태를 찾아보기 힘들
- 완성된 바이오 숯 bead 혼합 시제품은 비료성분 분석을 진행함



바이오 슬랫 bead 건조 전

바이오 슬랫 bead 건조 후

바이오 슬랫 bead 혼합 시제품

그림 50. 바이오 슬랫 bead 시제품(2 연차)

2) 바이오 슬랫 pellet 시제품

- 바이오 슬랫 pellet 시제품은 아래 사진과 같이 성형되었으며 직경 8mm, 길이 평균 25~30mm 크기였음
- 석고를 첨가하여 지난 1연차보다 pellet의 강도는 좋아졌음
- 다만 강도가 너무 강해져 토양 처리 후 비료성분의 용출 및 유기물 분해에 어려움이 있을 것으로 사료됨
- 완성된 pellet 시제품은 비료성분 분석을 진행함



그림 51. 바이오 슬랫 pellet 시제품(2 연차)

4. 시제품 분석 결과

1) 비료성분 분석결과

- 시제품 2종의 비료 성분 결과는 아래 표와 같음
- pellet의 pH는 3.57로 상당히 낮은 산성으로 분석이 되었으며 이는 pH 및 강도 조절을 위해 첨가된 석고에 의한 것으로 사료됨
- 3.57의 낮은 pH는 산성 토양인 우리나라 토양에 적합하지 않은 수준이었음
- 반면 bead는 6.36으로 pellet보다 높은 수준이었으나 바이오차의 토양 pH 교정 효과를 기대하기 어려웠음
- Pellet과 bead 혼합 시제품의 EC는 각각 10.16, 69.55 dS/m를 bead의 EC가 토양에 적용하기 어려울 정도로 높게 조사됨
- 이는 bead 제조시 첨가되는 Ca(NO₃)₂와 혼합 시제품 제작시 첨가된 석고의 영향으로 판단됨
- 시제품의 유기물 함량은 pellet, bead 각각 38.89, 37.08%로 유기질 비료 기준으로 상당히 낮은 수준이었음
- 주 비료 성분인 질소, 인산, 칼리의 함량은 비료로 보기에 상당히 낮은 수준이나 bead 혼합 시제품의 질소 함량은 3.01%로 적절하였음
- Bead 혼합 시제품의 질소함량은 bead 제조시 첨가되는 Ca(NO₃)₂에 의한 것으로 사료됨
- 미량요소는 석회 함량이 pellet, bead 각각 5.83 6.95%로 상당히 높았으며 이는 석고에 의한 것으로 판단됨

표 47. 시제품 비료 성분 결과

	Pellet 시제품	Bead 혼합 시제품	단위
pH	3.57	6.36	-
EC	10.16	69.55	dS/m
유기물	38.89	37.08	
질소전량(A)	0.43	3.01	
인산전량(B)	0.15	0.23	
칼리전량(C)	0.052	0.37	
석회	5.83	6.95	%
고토	0.037	0.4	
나트륨	0.012	0.76	
수분	36.38	17.23	
CEC	26.96	38.86	cmol ⁺ /kg

2) 중금속 함량 분석결과

- 시제품 2종의 중금속 함량은 아래 표와 같음
- 2종의 시제품 모두 ‘비료 공정규격’의 혼합유기질비료 기준을 만족하였음
- 납, 크롬, 아연의 함량이 pellet보다 bead 혼합 시제품에서 더 높았음

표 48. 시제품 중금속 분석결과

	Pellet 시제품	Bead 혼합 시제품	기준*	단위
비소	n.d.*	n.d.	20 이하	
카드뮴	n.d.	n.d.	2 이하	
수은	0.02	0.01	1 이하	
납	n.d.	10.76	50 이하	mg/kg
크롬	6.52	20.95	90 이하	
구리	n.d.	1.91	120 이하	
니켈	0.39	7.53	20 이하	
아연	20.06	90.94	400 이하	

*기준: 농촌진흥청 고시 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’
혼합유기질비료 기준

*n.d.: not detected

아. 시제품 토양 영향 평가 1차(Lab Scale)

1. 토양 중 양분 변화

1) 목적

- 시제품 2종이 토양 중 양분에 미치는 영향을 알아보기 위하여 본 실험을 진행함
- 본 과제의 목적은 바이오 숯을 이용한 비료의 개발로 탄소 격리 및 비료의 효과를 구명해야함

2) 재료 및 방법

- 본 실험은 충남 태안의 비닐 온실을 대여하여 진행함
- 시험에 사용한 토양은 일반 농가의 밭 토양을 사용하였으며 토양의 기본 분석 결과는 아래와 같음
- 토양은 sand함량이 높은 사양토였으며 우리나라 일반 밭 토양의 토성을 나타냄
- 토양의 pH는 5.4로 일반 밭 토양 수준으로 조사되었으며 EC는 1.2dS/m로 양분이 적당히 함유된 것을 확인하였음
- 질소, 유기물 및 유효인산은 조금 부족한 상태였으며 교환성 양이온의 함량 또

한 부족하였음

표 49. 시험전 밭 토양의 기본 분석 결과

분석 항목		시험전 토양	단위
	pH	5.4	-
	EC	1.2	dS/m
	질소전량	0.24	%
	유기물	2.10	
	유효인산	315.48	mg/kg
교환성 양이온	K ⁺	1.85	mg/kg
	Ca ²⁺	4.29	
	Mg ²⁺	1.13	
	Na ⁺	0.13	
	CEC	21.11	cmol ⁺ /kg
토성	sand	55.0	%
	silt	27.5	
	clay	17.5	
	토성	사양토	

- 시험구의 조성은 아래 표와 같이 대조구, 시제품 2, 5, 10wt%이며 3반복으로 구성되었음

대조구 - 1	대조구 -2	대조구 -3
pellet 시제품 2% -1	pellet 시제품 2% -2	pellet 시제품 2% -3
pellet 시제품 5% -1	pellet 시제품 5% -2	pellet 시제품 5% -3
pellet 시제품 10% -1	pellet 시제품 10% -2	pellet 시제품 10% -3
bead 혼합 시제품 2% -1	bead 혼합 시제품 2% -2	bead 혼합 시제품 2% -3
bead 혼합 시제품 5% -1	bead 혼합 시제품 5% -2	bead 혼합 시제품 5% -3
bead 혼합 시제품 10% -1	bead 혼합 시제품 10% -2	bead 혼합 시제품 10% -3

- 본 시험에 사용된 작물은 본 과제 1차년에 선정된 6개의 작물 중 상추(적치마)를 사용함
- 시험구 조성을 위한 시제품 처리 및 작물 정식 방법은 다음과 같이 진행함
 - ①준비된 토양 15kg에 시제품(pellet, bead)을 토양무게비로 각각 2, 5, 10wt% 혼합함
 - ②토양과 시제품을 균일하게 혼합한 뒤 5kg씩 pot에 옮겨 담음
 - ③약 600ml의 물을 각 pot에 관수한 뒤 48시간동안 방치하여 안정화함
 - ④공시 작물인 상추는 크기가 비슷한 것들을 준비하고 안정화가 끝난 토양에 모종을 심음
- 관수는 1일 1회 아침에 동일한 양을 각 포트에 관수하였으며 약 1개월간 작물 재배 실험을 진행함



토양 안정화



공시 작물 정식 후

그림 52. 시험구 조성

3) 생육 실험 결과

- 공시 작물 정식 2주 후 작물의 생육은 다음 사진과 같음
- pellet 2% 시험구의 생육은 대조구보다 좋지 않았으나 pellet 5, 10% 시험구 상추의 생육은 대조구와 비슷하거나 더 좋았음
- Bead 2% 시험구는 대조구보다 크기는 컸으나 질소과잉 증상을 보이듯 잎의 색이 진했음
- Bead 5, 10% 시험구는 대조구보다 생육이 좋지 않았으며 곧 고사할 것으로 판단됨
- 이는 bead 혼합 시제품의 높은 EC 때문인 것으로 사료되며 bead 생산에 사용된 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 의 질소 공급 효과를 간접적으로 확인할 수 있었음



대조구



시제품 pellet 2%



시제품 pellet 5%



시제품 pellet 10%



시제품 bead 2%



시제품 bead 5%



시제품 bead 10%

그림 53. 정식 2주 후 상추의 생육 상태(시제품의 토양 중 양분 변화 실험)

- 정식 4주 후 상추의 생육상태는 아래 사진과 같음
- Pellet 시험구 상추의 생육은 pellet 5%가 가장 좋았으며 pellet 2, 10% 시험구는 대조구와 비슷하였음
- Bead 시험구 중 bead 5, 10% 시험구의 상추는 고사하였으며 이는 2주차 생육 조사에서 예상한 결과였음
- 상추가 고사한 원인은 bead의 높은 EC가 주된 원인으로 판단됨
- Bead 2% 시험구 상추의 생육은 대조구와 비슷하거나 더 좋아보였음



대조구



시제품 pellet 2%



시제품 pellet 5%



시제품 pellet 10%



시제품 bead 2%



시제품 bead 5%



시제품 bead 10%

그림 54. 정식 4주 후 상추의 생육 상태(시제품의 토양 중 양분 변화 실험)

- 시제품 처리 4주 후 상추의 생육 조사 결과는 아래 표와 같으며 고사한 시험구에 대한 생육조사 결과는 없음
- 상추의 평균 초장은 bead 2%가 35.8cm로 가장 컸으며 이어 pellet 10% > pellet 5% > 대조구 > pellet 2% 였음
- 상추의 생체중은 pellet 5%가 346.7g으로 가장 좋았으며 pellet 2%를 제외하고

상추의 생체중은 대조구보다 좋았음

- 건물중은 22.7g으로 bead 2%가 가장 좋았으며 대조구보다 건물중이 낮았던 시험구는 없었음

표 50. 토양 중 양분변화 실험 상추의 생육 조사 결과(2연차)

	초장 cm	생체중 ----- g -----	건물중	수분 %
대조구	30.5±2.5	266.0±34.7	14.7±2.3	94.4±1.5
Pellet 2%	28.7±1.6	247.3±23.0	14.7±1.2	94.1±0.3
Pellet 5%	32.3±3.7	346.7±33.0	20.0±2.0	94.2±0.4
Pellet 10%	32.0±0.9	344.0±31.0	20.0±2.0	94.2±0.6
Bead 2%	35.8±5.0	330.0±14.0	22.7±2.3	93.1±0.5

- 시험 종료 후 채취한 토양의 분석결과는 아래 표와 같음
- 토양의 pH는 bead 10% 시험구를 제외하고 모두 대조구보다 낮아졌음
- 이는 시제품의 석고 함량이 높아 바이오숯의 토양 개량 효과 중 하나인 pH 조절 효과를 확인할 수 없었음
- 토양 EC는 시제품을 처리한 토양의 EC가 작물 생육에 적합한 2.0dS/m보다 높았으며 특히 bead 5, 10% 시험구 토양의 EC는 14.9, 18.3dS/m로 상추가 고사하였음
- 토양 중 질소 함량은 대조구 0.19%에서 pellet 시험구는 큰 변화가 없었으나 bead 5, 10%에서 각각 0.29, 0.32%로 증가하였음
- 유기물 함량은 pellet 2% 시험구를 제외하고 모두 증가하였으며 특히 pellet 10%, bead 5% 시험구에서 각각 3.91, 4.59%로 높았음
- 토양 중 유효인산은 pellet 10% 시험구가 374.87mg/kg으로 가장 높았으며 다른 시험구도 대조구보다 높아졌음
- 교환성 양이온 중 K의 함량은 bead 5, 10%가 가장 높았으며 Ca는 모든 처리구에서 대조구보다 2배이상 증가하였음
- 토양의 양이온 교환능력(CEC)는 bead 시험구에서 가장 효과가 좋았으며 pellet 2%는 대조구와 큰 차이가 없었음

표 51. 토양 중 양분변화 실험 토양 분석 결과(2연차)

	pH	EC dS/m	질소 전량 %	유기물 %	유효인산 -----	교환성양이온			CEC cmol ⁺ /kg	
						K ⁺ mg/kg	Ca ²⁺ -----	Mg ²⁺ -----		Na ⁺ -----
대조구	5.6	0.8	0.19	1.66	309.96	0.70	4.50	1.41	0.24	7.54
Pellet 2%	4.9	5.5	0.18	1.34	323.65	0.53	13.42	1.16	0.21	7.68
Pellet 5%	4.9	10.9	0.20	2.35	315.00	0.50	22.91	1.07	0.24	9.84
Pellet 10%	4.8	9.7	0.21	3.91	374.87	0.91	22.76	1.33	0.44	10.23
Bead 2%	4.5	4.8	0.21	1.76	316.12	0.72	10.08	1.04	0.17	14.20
Bead 5%	4.9	14.9	0.29	4.59	336.51	1.24	22.44	1.53	0.33	10.14
Bead 10%	5.9	18.3	0.32	2.72	342.08	1.28	27.33	1.47	0.38	14.33

- 토양 중 양분변화 실험 공시 작물인 상추의 분석결과는 아래 표와 같음
- 식물체가 고사한 시험구인 bead 5, 10%에 대한 분석결과는 없음
- 식물체내 질소 함량은 pellet 10% 시험구의 상추가 4.87%로 가장 높았으며 pellet 5%로 10%와 비슷한 수준이었음
- pellet 2% 시험구 상추는 대조구와 큰 차이가 없었으며 bead 2% 시험구 상추의 질소함량은 대조구보다 높은 3.38%였음
- 인산함량은 pellet 5%가 0.45%로 가장 높았으며 다른 시험구는 대조구와 큰 차이가 없었음
- 칼륨 함량은 pellet 5%를 제외하고 모두 대조구보다 낮은 값을 나타냄
- 칼슘 함량은 pellet 10% 시험구가 1.60%로 가장 높았으며 이어 bead 2% 시험구가 1.48%로 높았음

표 52. 토양 중 양분변화 실험 식물체 분석 결과

	N	P	K	Ca	Mg	Na
	----- % -----					
대조구	2.88±0.36	0.31±0.09	4.15±0.28	0.77±0.13	0.22±0.03	0.25±0.02
Pellet 2%	2.96±0.27	0.27±0.08	4.17±0.33	0.73±0.29	0.20±0.07	0.20±0.07
Pellet 5%	4.47±0.56	0.45±0.07	3.54±0.55	0.92±0.08	0.27±0.03	0.28±0.06
Pellet 10%	4.87±1.32	0.32±0.07	3.53±0.19	1.60±0.30	0.41±0.03	0.40±0.04
Bead 2%	3.38±0.78	0.34±0.12	3.83±0.21	1.48±0.63	0.42±0.14	0.40±0.16

2. 토양 중 중금속 저감 효과

1) 목적

- 바이오숯의 기능 중 하나는 높은 pH, BET, CEC 등으로 토양 중 중금속 및 유

해성분을 흡착할 수 있음

- 따라서 시제품 2종의 토양 중 중금속 안정화 효과를 구명하기 위하여 본 실험을 진행함

2) 재료 및 방법

- 본 실험은 충남 태안의 비닐 온실을 대여하여 진행함
- 시험에 사용한 토양은 일반 농가의 밭 토양에 중금속 시약을 처리하여 인위적 오염토양을 제작(Spiking)하여 사용하였으며 토양 spiking 방법은 아래와 같음

- ① 토양 오염 기준은 ‘토양환경보전법’ ‘오양오염우려기준’ 중 농경지인 ‘1 지역’ 의 2배로 설정함
- ② 기준이 맞춰 중금속 시약을 준비함
- ③ 일반 밭 토양에 중금속 시약을 분무기로 뿌려주면서 토양을 균일하게 혼합함
- ④ 시약 처리가 끝나면 토양을 균일하게 혼합 한 뒤 약 7일간 안정화함

- Spiking한 토양의 기본 분석결과는 아래 표와 같음
- 토양의 토성은 양토였으며 우리나라 일반 밭 토양의 토성을 나타냄
- 토양의 pH는 4.89로 일반 밭 토양 수준보다 약간 낮게 조사되었으며 EC는 5.4dS/m로 spiking 전 1.2dS/m 였으나 중금속 시약 첨가 후 상당히 증가한 것을 볼 수 있었음

표 53. Spiking 전·후 토양 기본 분석 결과

분석 항목		spiking 전	spiking 후	단위
	pH	5.4	4.9	-
	EC	1.2	5.4	dS/m
	질소전량	0.24	0.25	%
	유기물	2.10	3.02	
	유효인산	315.48	N.D.	mg/kg
교환성 양이온	K ⁺	1.85	1.75	mg/kg
	Ca ²⁺	4.29	5.08	
	Mg ²⁺	1.13	1.73	
	Na ⁺	0.13	0.11	
	CEC	21.11	27.36	cmol ⁺ /kg
토성	sand	55.0	50	%
	silt	27.5	30	
	clay	17.5	20	
	토성	사양토	양토	

- 토양 오염 Spiking 후 토양 중 중금속 함량은 아래 표와 같음
- Spiking 전 총 중금속 함량은 ‘토양오염우려기준’에 미치지 못하였으며 spiking 후 목표인 우려기준의 2배에는 미치지 못하였으나 우려기준의 약 1.5배로 나타남
- 유효태 중금속함량은 spiking 아연만 검출되었으나 spiking 후 상당량 검출되어 본 실험에 적합한 토양이 되었음

표 54. Spiking 전·후 토양 중 중금속 함량

분석 항목	spiking 전	spiking 후	*기준	목표	단위
총 중금속	Cd	**n.d.	5.74	4 이하	8
	Cu	2.29	265.33	150 이하	300
	Ni	4.72	152.7	100 이하	200
	Pb	4.58	324.56	200 이하	400
	Zn	48.58	462.88	300 이하	600
***유효태 중금속	Cd	n.d.	4.53	-	-
	Cu	n.d.	34.95	-	-
	Ni	n.d.	151.33	-	-
	Pb	n.d.	32.77	-	-
	Zn	3.17	239.03	-	-

mg/kg

*기준: 환경부 고시 ‘토양환경보전법’의 ‘토양오염우려기준’ 중 ‘1지역’ 기준

**n.d: not detected

***유효태 중금속: NH₄NO₃ extract 중금속 함량

- 시험구의 조성은 아래 표와 같이 대조구, 시제품 2, 5, 10wt%이며 3반복으로 구성되었음

대조구 - 1	대조구 -2	대조구 -3
pellet 시제품 2% -1	pellet 시제품 2% -2	pellet 시제품 2% -3
pellet 시제품 5% -1	pellet 시제품 5% -2	pellet 시제품 5% -3
pellet 시제품 10% -1	pellet 시제품 10% -2	pellet 시제품 10% -3
bead 혼합 시제품 2% -1	bead 혼합 시제품 2% -2	bead 혼합 시제품 2% -3
bead 혼합 시제품 5% -1	bead 혼합 시제품 5% -2	bead 혼합 시제품 5% -3
bead 혼합 시제품 10% -1	bead 혼합 시제품 10% -2	bead 혼합 시제품 10% -3

- 본 시험에 사용된 작물은 본 과제 1차년에 선정된 6개의 작물 중 상추(적치마)를 사용함
- 시험구 조성을 위한 시제품 처리 및 작물 정식 방법은 다음과 같이 진행함
 - ①준비된 spiking 토양 15kg에 시제품(pellet, bead)을 토양무게비로 각각 2, 5, 10wt% 혼합함
 - ②토양과 시제품을 균일하게 혼합한 뒤 5kg씩 pot에 옮겨 담음
 - ③약 600ml의 물을 각 pot에 관수한 뒤 48시간동안 방치하여 안정화함
 - ④공시 작물인 상추는 크기가 비슷한 것들을 준비하고 안정화가 끝난 토양에 모종을 심음
- 관수는 1일 1회 아침에 동일한 양을 각 포트에 관수하였으며 약 1개월간 작물 재배 실험을 진행함



토양 안정화



공시 작물 정식 후

그림 55. 시험구 조성

1) 생육 실험 결과

- 시제품 처리 및 정식 2주 후 각 시험구별 상추의 생육은 아래 사진과 같음
- 대조구, pellet 10%, bead 5%를 제외하고 고사할 위험이 보였으며 bead 10% 시험구의 상추는 이미 고사하였음
- Spiking으로 높아진 토양의 EC에 EC가 높은 시제품을 처리하여 상추가 고사한 것으로 사료됨



대조구



시제품 pellet 2%



시제품 pellet 5%



시제품 pellet 10%



시제품 bead 2%



시제품 bead 5%



시제품 bead 10%
 그림 56. 정식 2주 후 상추의 생육 상태
 (시제품의 토양 중 양분 변화 실험)

- 정식 4주 후 대조구 일부를 제외한 모든 상추가 고사하였으며 생육조사가 불가하였음



그림 57. 정식 4주 후 상추의 생육 상태
 (시제품의 토양 중 양분 변화 실험)

- 시험 종료 후 채취한 토양의 화학적 특성 및 유효태 중금속 함량은 아래 표와 같음
- Pellet 시험구 토양의 pH는 모두 대조구보다 감소하여 4.9~5.1의 범위를 나타냄
- 토양 pH의 감소는 토양 중 중금속의 이동성을 높여 유효태 중금속 농도를 높이는 결과로 이어짐
- 반면 bead 시험구의 pH는 bead 2%가 대조구와 동일한 수치로 분석된 것 외에 bead 5, 10%는 대조구보다 높아졌음
- 토양 중 유효태 중금속 함량 분석결과 pellet 시험구에서는 대조구보다 오히려

증가하였음

- 특히 pellet 10% 시험구의 유효태 Cd 함량은 대조구의 약 2배로 분석되었음
- 반면 bead 시험구의 유효태 중금속 함량은 대조구보다 낮게 분석되었음
- Cd은 bead 5, 10% 시험구에서 각각 1.61, 1.83mg/kg으로 분석되었으며 대조구보다 약 30~20% 감소하였음
- Cu는 bead 2, 5%에서 각각 13.92 12.08mg/kg으로 대조구보다 약 6, 18% 감소하였으며 bead 10%는 대조구의 약 2배로 증가하였음
- Ni, Zn은 bead 5, 10% 시험구에서 대조구보다 낮게 분석되었음
- 중금속 저감 효과가 가장 잘 나타난 항목은 Pb이며 모든 bead 시험구에서 대조구보다 낮게 측정되었음
- 특히 bead 5, 10%의 Pb 함량은 대조구보다 약 75% 감소한 결과를 나타냄

표 55. 시험구별 토양 화학적 특성 및 유효태 중금속 함량(2연차)

	pH	유기물 %	CEC cmol ⁺ /kg	Cd	유효태 중금속 mg/kg			
					Cu	Ni	Pb	Zn
대조구	5.5	2.96	13.50	2.24	14.82	94.97	10.90	153.26
Pellet 2%	5.1	2.72	11.80	3.24	19.40	112.53	18.83	209.40
Pellet 5%	5.0	3.45	23.35	4.36	20.84	123.71	19.57	258.81
Pellet 10%	4.9	3.92	26.30	4.57	24.63	145.58	21.18	258.70
Bead 2%	5.5	2.01	12.56	2.81	13.92	98.23	9.63	233.77
Bead 5%	5.7	3.07	33.21	1.61	12.08	64.57	2.40	126.81
Bead 10%	6.0	3.98	34.04	1.83	32.43	78.63	2.65	108.85

표 56. 대조구 대비 토양 중 유효태 중금속 저감량

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
	----- % -----				
Pellet 2%	-45	-31	-18	-73	-37
Pellet 5%	-95	-41	-30	-80	-69
Pellet 10%	-104	-66	-53	-94	-69
Bead 2%	-25	6	-3	12	-53
Bead 5%	28	18	32	78	17
Bead 10%	18	-119	17	76	29

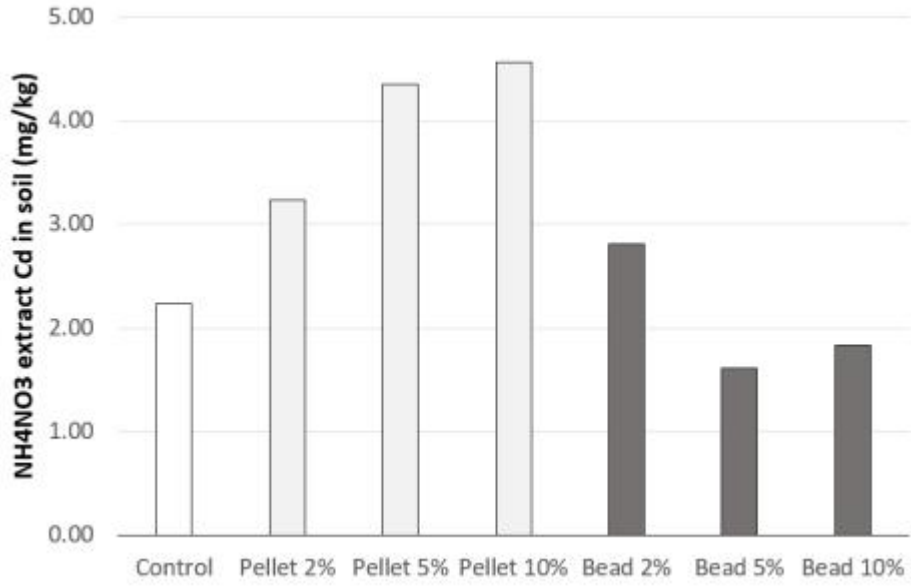


그림 58. 토양 중 NH₄NO₃ extract Cd 함량(2연차)

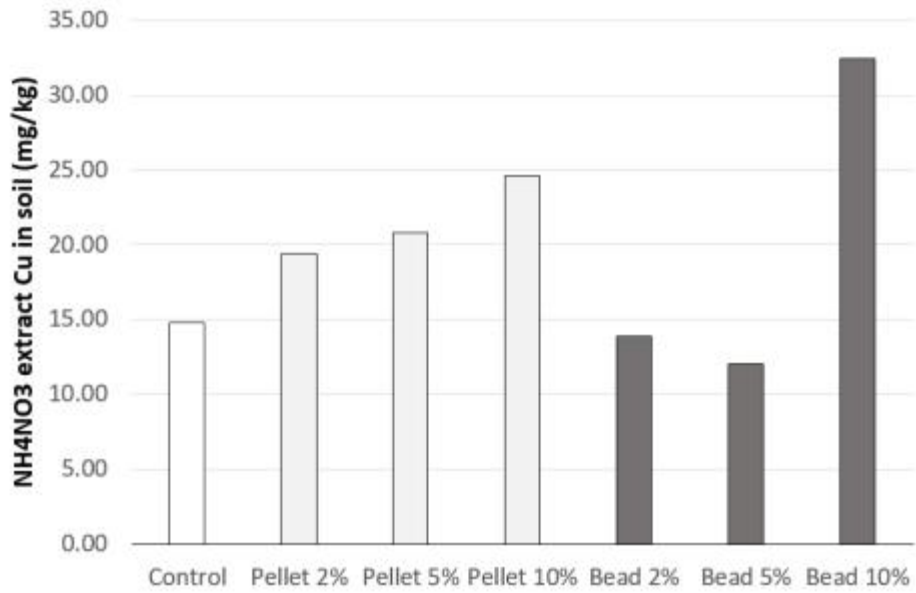


그림 59. 토양 중 NH₄NO₃ extract Cu 함량(2연차)

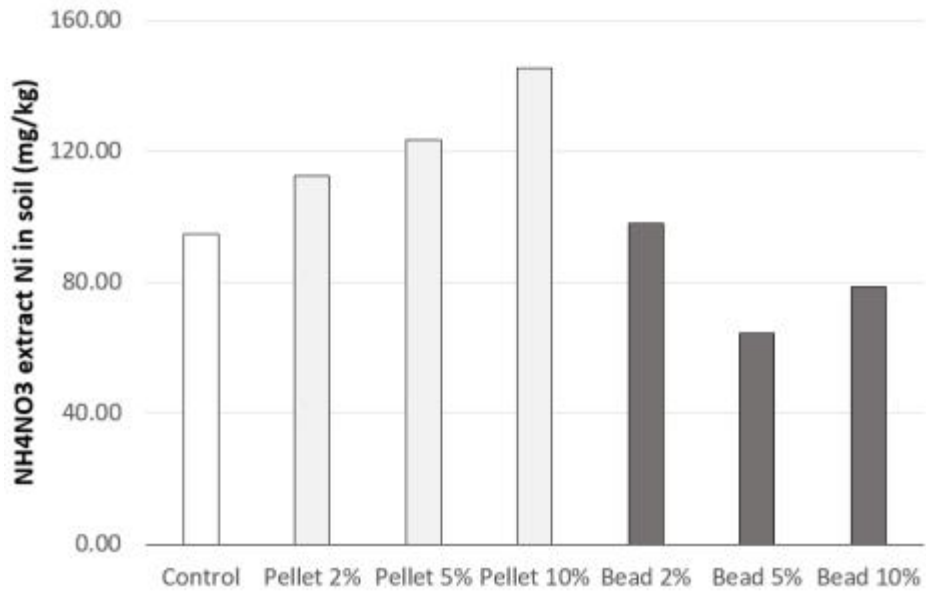


그림 60. 토양 중 NH₄NO₃ extract Ni 함량(2연차)

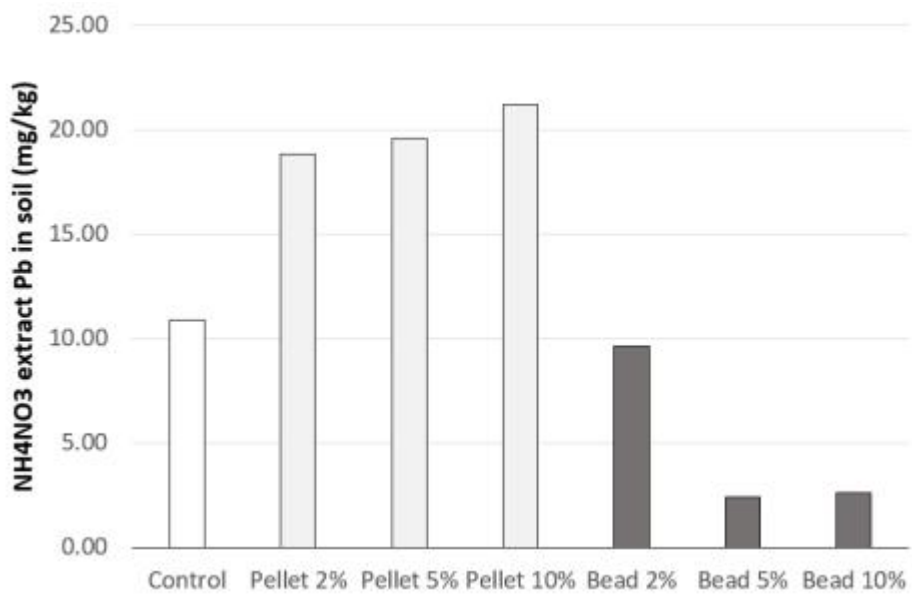


그림 61. 토양 중 NH₄NO₃ extract Pb 함량(2연차)

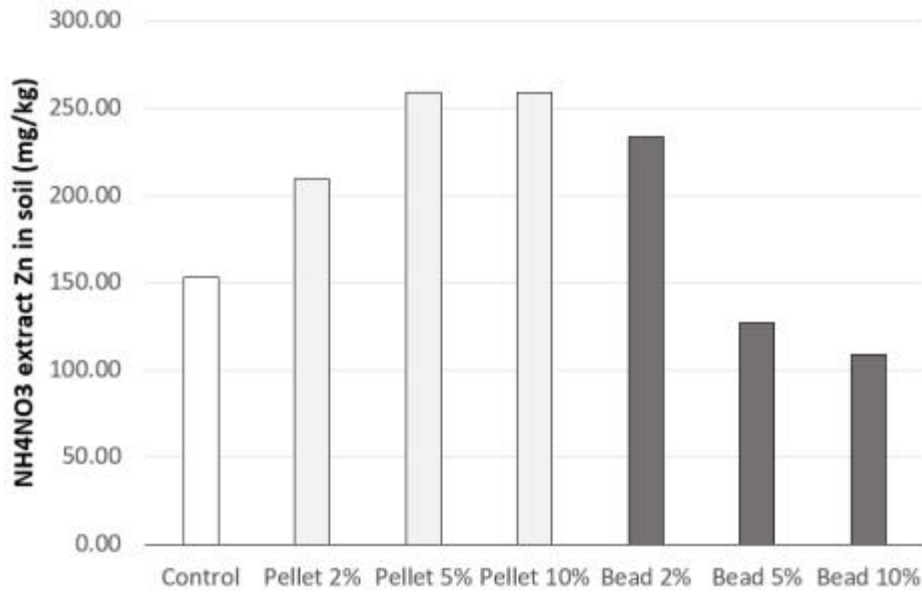


그림 62. 토양 중 NH₄NO₃ extract Zn 함량(2연차)

- 토양 pH와 토양 중 중금속 유효태의 상관관계를 분석한 결과 아래 그림과 같음
- 토양 중 양이온성 중금속의 이동은 토양 pH와 높은 상관성을 갖으며 본 실험결과도 높은 상관성을 보였음
- 특히 토양 중 유효태 Cd와 pH가 가장 높은 상관성을 나타냈으며 Cu는 가장 낮은 상관성을 보였으나 bead 10% 결과를 제외하면 R²값이 0.9821로 가장 높은 상관성을 보였음

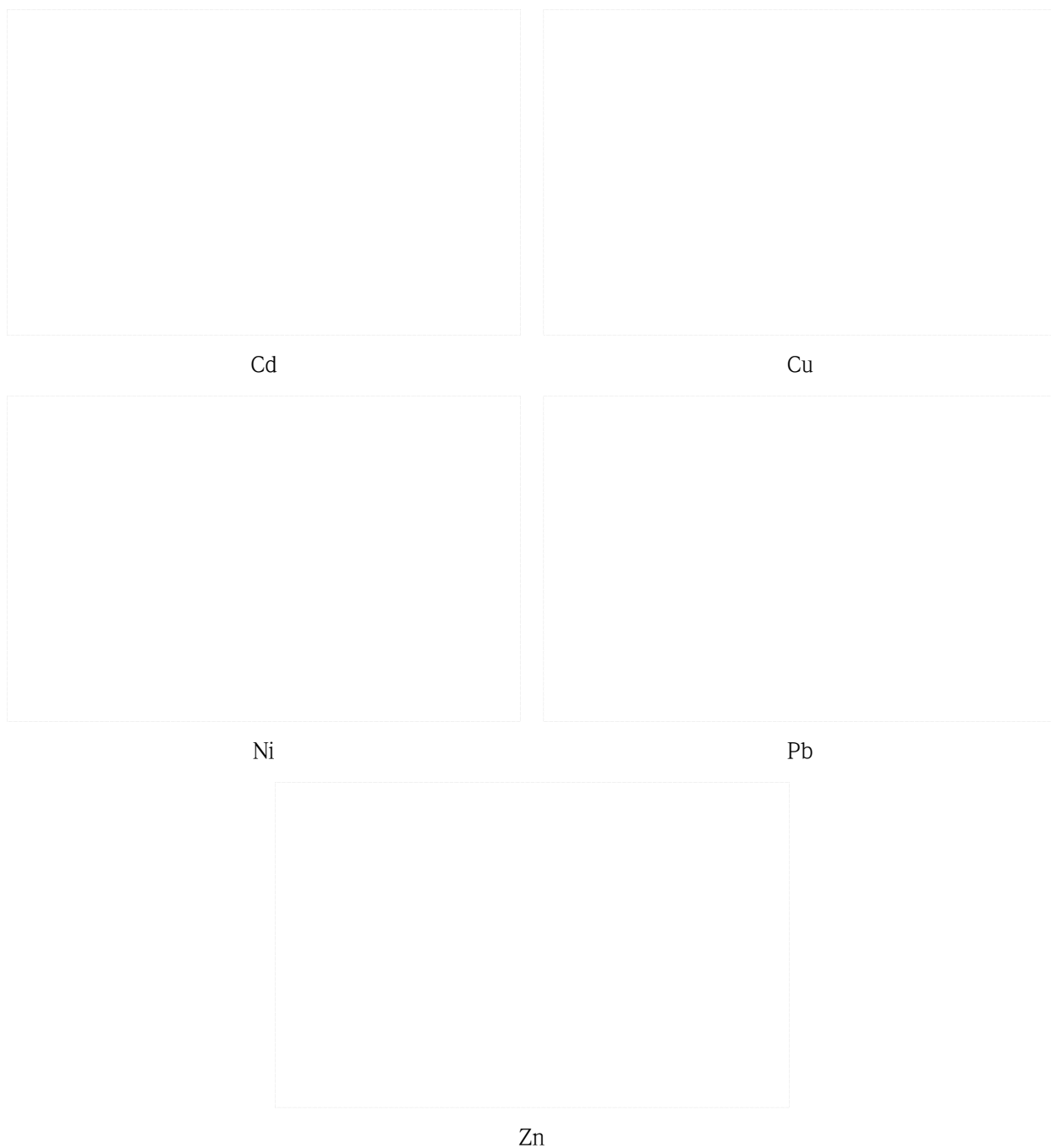


그림 63. 토양 pH와 토양 중 유효태 중금속 함량의 상관관계

3. 시제품 토양 영향 평가 결과

- 2연차 시제품 평가 결과 시제품 강도 및 pH 조절 용도로 첨가한 석고의 영향으로 바이오숯의 특성이 나타나지 않았음
- 특히 pellet 시제품의 pH는 3.57로 작물 양분 공급에 부정적인 영향을 줄뿐만 아니라 토양 중 중금속의 이동성을 높였음
- 반면 bead 시제품의 pH는 6.36으로 목표했던 수치보단 낮았지만 토양 중 중금속 저감효과를 나타냄

- 작물 생육에 있어 석고 첨가의 가장 큰 문제점은 높은 EC였으며 그 결과 공시 작물인 상추가 고사하는 결과를 나타냄
- pH, EC 문제 외에도 질소, 인산, 가리 등 양분과 유기물 함량의 부족으로 양분 공급의 역할을 수행하기 어려웠음
- 따라서 이후 시제품의 개량은 석고 함량을 줄이거나 제외하여 pH와 EC의 문제를 해결하고 질소, 인산, 가리 등 양분 공급이 가능한 원료를 사용하는 방향으로 진행함

자. 바이오숯 시제품 2차 평가(Lab Scale)

1. 바이오숯 시용 온실 재배 실험

1) 개요

- 본 실험은 바이오숯 기반 시제품이 작물 6종에 미치는 영향을 평가함

2) 재료 및 방법

- 장소: 충남대학교 농업생명과학대학 온실
- 작물: 가지(흑원경), 방울토마토(원홍5호), 고추(부자), 부추(새론), 상추(홍빛5호), 배추(대통)
 - 전년도 양파의 생육 불량으로 인하여 부추로 작물 교체
- 실험 기간: 2017.04. ~ 2018.07.
- 바이오차 성상: 비드, 펠릿(포이엔 제공)
 - 분말 제형은 토양 혼화 처리 시 외부환경에 의해 유실의 가능성이 있기 때문에 비드와 펠릿 제형으로 제조하여 실험에 이용
- 바이오차 처리조건: 제형별 각각 0%(무처리), 2%, 5% 처리 (모든처리구 NPK처리)
- 시비량: 농촌진흥청 작물별 표준시비량에 따라 시비
- 작물 재배 배지: 토양(충남대학교 농장 채취)
- 실험 작물: 작물의 선정조건은 시설재배 채소분류별, 국내 소비량과 재배면적 비율, 작물별 CO₂ 방출량, 농업부산물 배출량 등을 고려하여 6개 작물을 선정

표 57. 작물 후보군의 재배 특성

분류	작물	최적 토양 조건			표준시비량(kg/10a) (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
		산도 (pH)	토성	유기물(g kg ⁻¹)	
과채류	가지	6.0~6.5	사양토~식양토	20~30	19.3-8.7-11.2
	방울토마토	6.0~6.5	미사질식양토	25~35	22.6-10.6-11.9
조미채소	고추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	19.0-6.4-10.1
	부추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	24.3-3.0-8.3
엽채류	상추	6.5~7.0	사양토~식양토	20~30	7.0-3.0-3.6
	배추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	17.8-3.0-7.3

※ 출처: 작물별 시비처방기준(농촌진흥청 국립농업과학원)

표 58. 작물별 파종 및 육묘기간

작물	품종	제조사	이식일	생육조사	육묘기간	평균 육묘기간
가지	흑원경	다농	2017.01.05	2017.04.06	2017.07.07	80 일
방울토마토	원홍 5호	다농	2017.02.01	2017.04.06	2017.06.22	70 일
고추	부자고추	농우바이오	2017.01.05	2017.04.06	2017.06.22	90 일
부추	새론	다농	2017.02.01	2017.04.06	2017.06.22	80 일
상추	홍빛 5호	다농	2017.03.01	2017.04.06	2017.04.28	30 일
배추	대통	농우바이오	2017.02.27	2017.04.13	2017.06.02	60 일

표 59. 제형별 바이오차의 제조 배합 비율

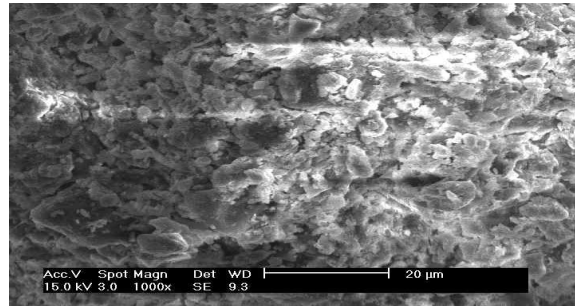
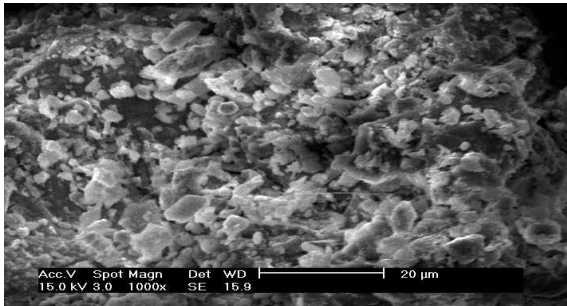
	Oak biochar	Gypsum	Peat moss	Trace elemental
	----- %(v/v) -----			
Bead	40	15	45	0.2
Pellet	40	15	45	0.2



Bead manufacturing machine

Pellet manufacturing machine

그림 64. 제형별 바이오차 제조기



Bead biochar

Pellet biochar

그림 65. 전자현미경(SEM)을 이용해 촬영한 제형별 바이오차

3) 재배실험 전 토양 및 제형별 바이오차의 기초분석

- 재배 실험용 토양의 pH는 8.04로 약알칼리성을 띠었음
- EC는 0.53 ds m^{-1} 였으며, 토양 내 유기물 함량은 1.46%로 조사됨
- 비드 및 펠렛 바이오차의 pH는 각각 6.16과 3.76으로 조사됨
- 바이오차 각각의 탄소함량은 $154.6, 241.1 \text{ g kg}^{-1}$ 이었으며, 유기물함량은 26.66, 41.57 %로 조사됨

표 60. 실험 토양 기초분석

	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)			
				T-C	T-N			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Soil	8.04±0.09	0.53±0.09	192.1	8.5±0.2	1.6±0.2	1.46	5.05	0.97	12.86	1.27	1.27

표 61. 바이오차의 기초분석

	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)			
				T-C	T-N			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Bead	6.16±0.02	98.9±2.9	1016±23.5	154.6±23.7	27.4±2.3	26.66	5.6	4.92±0.28	104.9±0.5	2.61±0.28	3.84±0.18
Pellet	3.76±0.01	16.7±0.2	448±37.0	241.1±10.4	4.7±0.1	41.57	50.8	2.45±0.18	100.8±1.1	4.53±0.38	2.58±0.12

4) 작물 생육조사 결과

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 가지 작물 높이, 생체중, 엽록소 함량은 비드 바이오차 5% 처리구에서 가장 높았음
- 가지 열매 개수, 열매 전체 무게가 비드 바이오숯 2% 처리구에서 가장 높았음
- 바이오숯 혼합량이 증가할수록 작물높이, 생체중, 엽록소함량, 수분함량이 증가하는 경향을 보임
- 바이오숯 혼합량이 열매 개수와 열매 전체 무게가 감소하는 경향을 보임
- 토양의 pH는 감소하는 경향을 보였으며, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation은 증가하는 경향을 보임
- 전체적으로 EC가 과도하게 증가하였음, 이는 바이오숯 제조 시 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

표 62. 바이오차 제형 및 함량에 따른 가지 생육 특성(아래계속)

Treatment	Height (cm)	Stem diameter	Shoot		Chlorophyll (SPAD)	
			Weight (g)	Water content (%)		
Control	60.5±1.7ab	0.76±0.09a	33.9±3.8a	76.8±0.2ab	29.8±2.5a	
Bead	2%	57.8±3.0ab	0.83±0.07a	37.3±7.7a	73.9±0.4a	36.6±3.4bc
	5%	64.0±7.3b	0.79±0.10a	62.2±8.3b	79.0±2.8b	41.8±2.8c
Pellet	2%	56.0±3.3a	0.81±0.02a	28.3±3.4a	76.4±1.1ab	31.0±3.9a
	5%	58.7±3.7ab	0.70±0.08a	51.8±2.0b	78.8±2.2b	34.6±3.9bc

표 63. 바이오차 제형 및 함량에 따른 가지 생육 특성(아래계속)

Treatment	Number of fruits (per plant)	Total fruit weight (g)	Length (cm)	Diameter	Sweetness (Brix)
Control	1.5±0.5a	104.7±29.6a	16.6±5.6a	3.3±0.3a	4.0±1.0a
Bead	2%	3.2±0.9c	204.4±31.0b	15.3±2.3a	3.5±0.6a
	5%	2.0±1.1b	187.1±71.0b	18.7±4.7a	4.1±0.3a
Pellet	2%	2.0±0.8b	157.4±17.0ab	17.8±4.2a	3.5±0.2a
	5%	1.5±0.5a	143.4±54.7ab	19.3±1.4a	4.3±0.9a

표 64. 가지 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Control	7.2±0.0	0.57±0.08	170.2±1.1	5.8±0.5	0.6±0.1	1.00	9.6	0.14±0.02	9.1±0.6	0.72±0.03	0.70±0.03	
Bead	2%	7.3±0.0	0.72±0.28	195.8±7.4	10.4±2.3	0.8±0.1	1.79	13.0	0.14±0.02	9.3±0.3	0.45±0.05	0.66±0.04
	5%	6.9±0.0	6.10±1.38	202.5±2.6	10.8±3.0	0.9±0.1	1.86	12.0	0.15±0.02	15.7±3.4	0.49±0.11	0.70±0.05
Pellet	2%	6.9±0.1	5.75±1.63	174.2±3.9	16.9±4.6	0.9±0.1	2.91	18.7	0.14±0.01	17.8±2.0	0.63±0.09	0.74±0.07
	5%	6.6±0.0	10.94±0.64	181.1±15.5	21.0±3.0	1.0±.01	3.64	21.1	0.14±0.03	31.3±4.3	0.81±0.15	0.82±0.07



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%

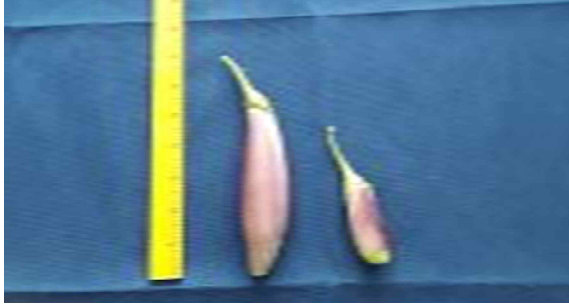


Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 66. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지의 생육



Control(Biochar 0%)



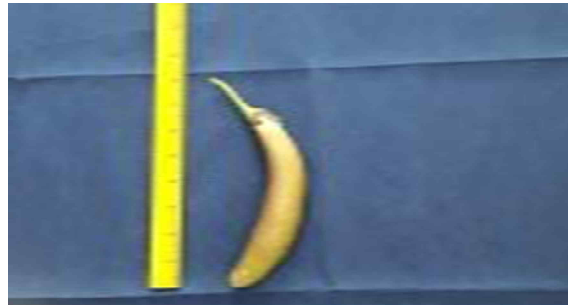
Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 67. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지 열매의 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 방울토마토 지상부의 높이, 생체중, 엽록소 함량이 비드 바이오숯 2% 처리구에서 가장 높았음
- 방울토마토 열매 전체 개수, 전체 무게, 당도가 비드 바이오숯 5% 처리구에서 가장 높았음
- 펠렛 바이오숯 처리구에 비해 비드 바이오숯 처리구에서 양호한 생육을 보임
- 토양의 pH는 감소하는 경향을 보였으며, EC, T-C, T-N, OM은 증가하는 경향을 보임
- 전체적으로 EC가 과도하게 증가하였음, 이는 바이오숯 제조 시 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

표 65. 바이오차 제형 및 함량에 따른 방울토마토 생육 특성(아래계속)

Treatment	Height	Stem diameter (cm)	Shoot		Chlorophyll (SPAD)	
			Weight (g)	Water content (%)		
Control	112.5±8.7a	0.9±0.1a	122.6±10.2a	48.4±7.0a	25.3±4.5ab	
Bead	2%	118.5±16.5a	0.8±0.1a	155.0±22.5ab	47.1±8.5a	33.7±7.5bc
	5%	119.7±18.2a	1.0±0.1a	177.3±31.2b	45.8±5.8a	37.3±1.6bc
Pellet	2%	113.5±0.6a	0.9±0.1a	117.0±18.8a	53.0±5.7ab	22.5±4.0a
	5%	101.4±10.9a	0.8±0.1a	116.6±35.8a	66.8±11.0b	29.4±4.5abc

표 66. 바이오차 제형 및 함량에 따른 방울토마토 생육 특성

Treatment		Number of fruits (per plant)	Total fruit weight (g)	Weight per fruit (g/ea)	Length (cm)	Diameter	Sweetness (Brix)
Control		18.3±2.5a	96.3±22.0a	5.2±0.5a	2.7±0.0a	2.9±0.0c	5.4±1.6a
Bead	2%	32.6±11.6ab	179.2±76.3ab	5.3±0.4a	2.6±0.1a	2.8±0.2bc	5.6±1.2a
	5%	46.3±11.7a	234.9±9.6b	5.0±0.0a	2.6±0.1a	2.5±0.1a	6.0±1.1a
Pellet	2%	18.0±6.2a	98.8±16.1a	5.7±1.3a	2.5±0.0a	2.8±0.1c	5.9±2.1a
	5%	25.6±6.1a	130.0±43.0a	5.0±0.8a	2.7±0.1a	2.5±0.0ab	6.0±1.5a

표 67. 방울토마토 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Control	7.2±0.0	0.48±0.08	208.7±6.5	6.4±0.5	0.7±0.1	1.10	9.1	0.13±0.05	10.5±0.3	0.64±0.13	0.63±0.11	
Bead	2%	7.1±0.0	0.62±1.33	193.7±0.9	8.1±1.6	0.9±0.1	1.40	9.0	0.14±0.02	11.2±0.14	0.46±0.08	0.80±0.01
	5%	7.0±0.1	5.10±4.68	214.1±1.9	11.8±3.8	1.0±0.2	2.03	11.8	0.11±0.02	11.7±0.6	0.64±0.16	0.74±0.09
Pellet	2%	7.0±0.0	4.54±2.33	195.0±5.9	12.5±2.7	1.0±0.1	2.16	12.5	0.13±0.02	14.0±2.4	0.67±0.11	0.84±0.07
	5%	6.8±0.5	9.21±2.51	170.1±6.3	17.2±4.7	1.0±0.1	2.97	17.2	0.12±0.01	30.9±1.5	0.58±0.08	0.75±0.16



Control(Biochar 0%)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%

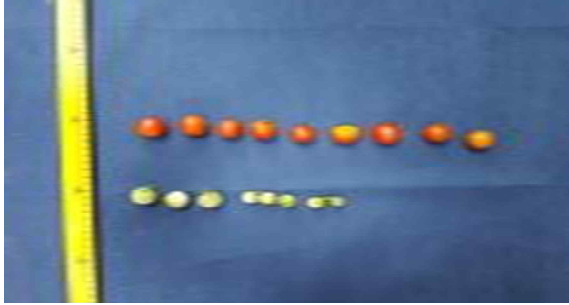


Pellet biochar 2%

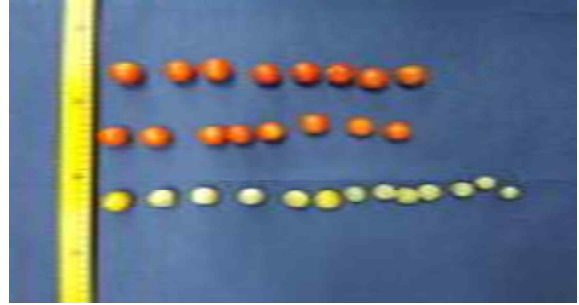


Pellet biochar 5%

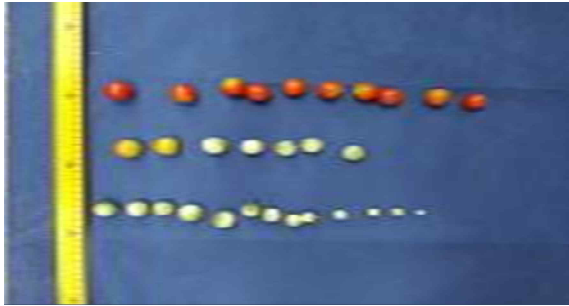
그림 68. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 방울토마토 생육



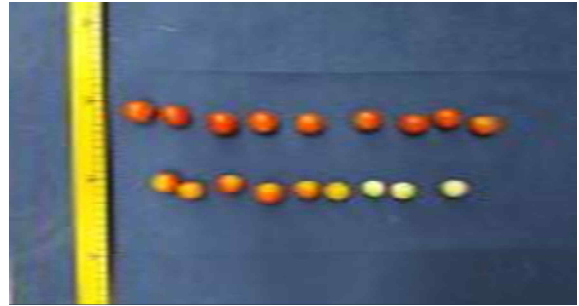
Control(Biochar 0)



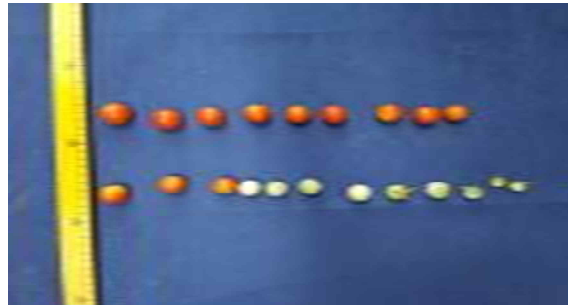
Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 69. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 방울토마토 열매 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 고추 작물 높이, 생체중, 엽록소 함량, 열매 개수, 열매 전체 무게, 열매 크기, 당도가 비드 바이오숯 2% 처리구에서 가장 높았음
- 바이오숯 함량이 높아질수록 엽록소 함량, 작물 높이, 줄기 직경, 열매개수와 열매전체 무게가 감소하는 경향을 보임
- 펠렛 바이오숯 혼합은 고추 생육에 유의적인 영향을 나타내지 않았음
- 토양의 pH는 감소하는 경향을 보였으며, EC, T-C, T-N, OM, Ex. cation이 증가하는 경향을 보임
- 전체적으로 EC가 과도하게 증가하였음, 이는 바이오숯 제조 시 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

표 68. 바이오차 제형 및 함량에 따른 고추 생육 특성(아래계속)

Treatment	Height (cm)	Stem diameter	Shoot		Chlorophyll (SPAD)	
			Weight (g)	Water content (%)		
Control	79.7±8.0ab	0.9±0.08a	42.5±4.1b	72.8±0.6a	41.3±1.1a	
Bead	2%	93.3±10.2b	0.9±0.03a	63.0±6.8c	74.4±0.8a	57.1±3.3b
	5%	59.6±25.3a	0.8±0.18a	32.6±12.4a	79.9±0.9c	53.7±7.2bc
Pellet	2%	72.9±3.3ab	1.0±0.19a	46.5±7.1b	74.1±0.1a	41.7±4.1a
	5%	65.9±8.1ab	0.9±0.09a	43.0±11.6b	77.0±0.3b	47.1±3.6ab

표 69. 바이오차 제형 및 함량에 따른 고추 생육 특성

Treatment		Number (per plant)	Total fruit weight (g)	Weight per fruit (g/ea)	Length (cm)	Diameter	Sweetness (Brix)
Control		9.0±0.8b	40.5±11.7b	4.4±1.1bc	9.1±1.0a	1.30±0.06c	7.2±1.6ab
Bead	2%	12.0±0.9c	56.5±8.6c	4.4±0.5bc	10.5±1.1b	1.34±0.09c	7.7±1.4b
	5%	5.5±0.5a	15.5±6.8a	2.9±1.4a	7.8±1.7a	0.96±0.20a	4.9±1.2a
Pellet	2%	9.5±3.6b	43.5±8.8b	5.0±1.8bc	8.8±0.8ab	1.18±0.07bc	6.7±1.7ab
	5%	7.5±2.0bc	41.0±4.7b	5.7±1.4c	10.2±1.0b	1.10±0.10ab	7.2±1.6ab

표 70. 방울토마토 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)		
				T-C	T-N				Ca ^{z+}	Mg ^{z+}	Na ⁺
Control	7.2±0.0	0.38±0.03	174.2±2.6	6.3±0.8	0.5±0.1	1.09	12.60	0.12±0.02	8.5±0.6	0.74±0.00	0.64±0.02
Bead	2%	7.1±0.0	225.6±4.3	8.4±2.1	0.80±0.1	1.45	10.50	0.16±0.03	10.1±1.1	0.47±0.07	0.62±0.12
	5%	6.9±0.0	6.89±2.22	242.0±3.1	10.8±3.4	1.0±0.2	1.86	10.80	0.22±0.02	13.2±1.2	0.47±0.03
Pellet	2%	7.0±0.0	222.2±5.0	10.3±0.9	0.8±0.0	1.78	12.88	0.14±0.02	19.1±0.4	0.65±0.08	0.54±0.00
	5%	6.8±0.0	9.47±1.89	210.7±4.3	17.7±5.2	0.9±0.1	3.05	19.67	0.17±0.00	23.6±2.7	0.70±0.07



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%

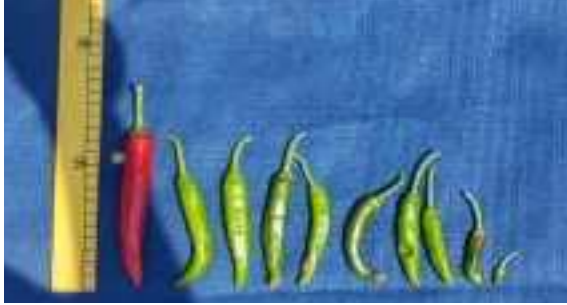


Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 70. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 고추 생육



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 71. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 고추 열매 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 부추 생체중, 엽수, 엽장은 펠릿 바이오숯 2% 처리구에서 가장 높았음
- 펠릿 바이오숯 처리구가 비드 바이오숯 처리구에 비해 양호한 생육을 보임
- 바이오숯 처리 비율이 높을수록 지상부 무게, 엽수, 당도가 감소
- 토양의 pH는 감소하는 경향을 보였으며, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation이 증가하는 경향을 보임
- 전체적으로 EC가 과도하게 증가하였음, 이는 바이오숯 제조 시 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

표 71. 바이오차 제형 및 함량에 따른 부추 생육 특성

Treatment	Shoot		Number of leaves (per plant)	Leaf length	Leaf width (cm)	Stem diameter	Weight per leaf (g/ea)	Sweetness (Brix)	
	Weight (g)	Water content (%)							
Control	13.4±2.9a	92.0±0.8bc	19.6±10.3a	41.3±1.5ab	2.4±0.1a	0.3±0.06a	0.9±0.6a	4.7±0.6b	
Bead	2%	15.3±0.2a	90.5±0.2a	24.6±6.6a	41.1±1.1ab	2.5±0.4a	0.3±0.05a	0.6±0.2a	4.4±0.2ab
	5%	14.1±1.4a	91.2±0.5ab	19.0±4.9a	40.3±1.5ab	2.4±0.3a	0.3±0.02a	0.8±0.3a	4.4±0.2ab
Pellet	2%	23.4±0.1b	92.3±0.1c	26.3±4.5a	43.3±3.2b	2.7±0.3a	0.3±0.02a	0.6±0.6a	3.8±0.1a
	5%	18.5±4.9ab	90.7±0.4a	22.0±6.9a	39.1±0.7a	2.9±0.1a	0.3±0.07a	1.0±0.6a	3.6±0.3a

표 72. 부추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Control	7.8±0.0	0.37±0.23	174.8±4.4	5.4±0.6	0.6±0.1	0.93	9.00	0.15±0.01	8.1±0.3	0.66±0.04	0.50±0.02	
Bead	2%	7.1±0.1	2.88±0.99	185.1±9.6	7.9±2.0	0.8±0.1	1.36	9.88	0.22±0.03	11.7±0.2	0.52±0.05	0.66±0.13
	5%	7.0±0.1	5.56±1.91	199.5±0.9	9.5±0.4	0.9±0.1	1.64	10.56	0.20±0.03	13.2±3.5	0.45±0.05	0.53±0.03
Pellet	2%	7.0±0.0	6.17±0.99	166.6±2.6	12.0±0.6	0.8±0.1	2.07	15.00	0.14±0.02	13.6±0.0	0.47±0.11	0.64±0.12
	5%	6.7±0.1	10.00±1.06	199.8±3.3	17.3±3.5	0.9±0.2	2.98	57.67	0.20±0.03	22.4±2.8	0.64±0.08	0.59±0.04



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 72. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 부추 생육



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 73. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 부추 지상부 생육

- 바이오슬릿을 처리하여 재배한 상추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 상추 생체중, 엽수, 엽장, 엽폭, 엽당 무게, 수분함량은 무처리에서 가장 높았음
- 비드 바이오슬릿 처리는 상추 생육을 불량하였으나, 당도와 엽록소 함량은 가장 높았음
- 토양의 pH는 감소하는 경향을 보였으며, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation이 증가하는 경향을 보임
- 전체적으로 EC가 과도하게 증가하였음, 이는 바이오슬릿 제조 시 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

표 73. 바이오차 제형 및 함량에 따른 상추 생육 특성

Treatment	Shoot		Number of leaves (per plant)	Leaf length (cm)	Leaf width	Weight per leaf (g/ea)	Sweetness (Brix)	Chlorophyll (SPAD)
	Weight (g)	Water content (%)						
Control	24.0±2.5b	93.2±0.7c	14.5±1.2b	22.4±1.3c	10.6±0.5c	1.66±0.25b	2.8±0.2a	22.0±1.3a
Bead	2%	5.3±1.6a	91.1±1.9ab	10.2±2.8a	10.7±1.2ab	0.53±0.16a	5.0±1.5b	29.3±1.4b
	5%	3.3±0.6a	91.4±1.9ab	8.7±1.2a	8.4±1.2a	0.38±0.05a	8.2±2.0c	32.1±8.2b
Pellet	2%	21.5±5.0b	88.2±1.8b	14.2±2.5b	15.0±5.7b	1.50±0.15b	3.0±0.1a	20.0±2.9a
	5%	21.9±0.8b	74.3±3.5a	13.5±1.2b	16.1±6.7b	1.63±0.16b	2.9±0.5a	20.5±2.7a

표 74. 상추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Control	7.4±0.0	1.89±1.12	188.9±11.1	5.6±0.4	0.5±0.1	0.97	11.20	0.15±0.02	10.4±1.4	0.98±0.21	0.55±0.08	
Bead	2%	6.9±0.0	7.08±1.34	200.3±9.6	6.1±0.5	0.8±0.1	1.05	7.63	0.26±0.04	15.5±1.5	1.02±0.20	0.56±0.06
	5%	6.1±0.1	17.18±1.51	183.4±2.7	8.3±3.7	1.5±0.2	1.43	5.53	0.43±0.03	24.4±2.4	1.67±0.06	0.76±0.04
Pellet	2%	6.9±0.1	7.50±1.66	206.4±0.1	11.6±3.6	0.7±0.1	2.00	16.57	0.20±0.07	16.0±2.6	0.99±0.15	0.57±0.06
	5%	6.5±0.5	11.27±0.23	198.5±2.2	13.5±4.5	0.6±0.1	2.33	22.50	0.17±0.03	33.6±4.3	1.12±0.11	0.62±0.06



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 74. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 상추 생육



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 75. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 상추 지상부 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 배추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 배추 생체중, 엽수, 엽장, 엽폭, 엽당 무게, 엽록소 함량은 비드 바이오숯 2% 처리구에서 가장 높았음
- 비드 바이오숯 5% 처리구는 배추의 생체중, 엽주, 엽장, 엽폭, 엽당 무게를 감소시켰음
- 바이오숯 처리 비율이 높을수록 생체중, 엽수, 엽폭, 엽록소 함량이 감소하는 경향을 보임
- 토양의 pH는 감소하는 경향을 보였으며, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation이 증가하는 경향을 보임
- 전체적으로 EC가 과도하게 증가하였음, 이는 바이오숯 제조 시 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

표 75. 바이오차 제형 및 함량에 따른 배추 생육 특성

Treatment	Shoot weight	Number of leaves	Leaf length	Leaf width	Weight of each leaf	Sweetness	Chlorophyll
	(g)	(per plant)	(cm)	(cm)	(g/ea)	(Brix)	(SPAD)
Control	138.5±30.7b	28.0±5.2a	27.2±0.9bc	12.7±1.3bc	4.9±0.2b	3.6±0.9a	30.1±3.1a
Bead	2%	149.4±19.4b	30.3±2.0a	29.5±0.3b	13.7±0.5c	4.9±0.5b	40.5±3.6b
	5%	57.1±10.4a	25.0±2.0a	20.0±1.1a	8.5±0.1a	2.9±0.4a	36.2±3.5ab
Pellet	2%	138.0±6.6b	29.6±3.2a	24.7±3.0b	12.0±1.0ab	4.6±0.5b	31.9±3.1a
	5%	137.2±6.9b	28.6±2.0a	26.8±1.1bc	11.7±0.7ab	4.8±0.4b	30.4±6.5a

표 76. 배추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)		Na ⁺	
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺		
Control	7.2±0.0	0.50±0.01	175.5±3.8	5.0±0.4	0.5±0.0	0.86	10.00	0.15±0.00	9.9±0.3	0.98±0.03	0.53±0.02	
Bead	2%	6.9±0.5	5.68±0.74	202.5±7.0	6.0±0.2	0.6±0.1	1.03	10.00	0.15±0.01	14.7±0.4	0.97±0.02	0.51±0.03
	5%	6.7±0.6	9.57±1.23	232.8±1.7	8.4±0.9	0.9±0.2	1.45	9.33	0.36±0.02	21.0±0.4	0.90±0.04	0.52±0.02
Pellet	2%	6.9±0.4	7.43±0.92	190.2±2.0	11.1±1.6	0.6±0.1	1.91	18.50	0.12±0.01	22.5±2.6	1.13±0.16	0.64±0.09
	5%	6.7±0.2	11.08±0.32	216.7±14.2	24.2±4.3	0.9±0.0	4.17	26.89	0.13±0.03	31.7±1.3	1.34±0.13	0.77±0.09



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 76. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 배추 생육



Control(Biochar 0)



Bead biochar 2%



Bead biochar 5%



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 5%

그림 77. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 배추 지상부 생육

5) 결론

- 비드, 펠렛 바이오숯 제형을 이용한 작물 재배 실험
- 작물에 따라 최적의 제형 및 처리 함량은 각기 다른 것으로 판단됨
 - 가지: 비드 바이오숯 2% 처리구
 - 방울토마토: 비드 바이오숯 5% 처리구
 - 고추: 비드 바이오숯 2% 처리구
 - 부추: 펠렛 바이오숯 2% 처리구
 - 상추: 무처리구
 - 배추: 비드 바이오숯 2% 처리구
- 전체적으로 비드 바이오숯에서 좋은 생육을 보였으며, 바이오숯 처리량은 2% 처리시에 좋은 생육을 보임
- 바이오숯의 효과는 사용된 바이오매스 원료, 생산 조건뿐만 아니라 제형에 따라 작물 생육에 미치는 영향이 다르기 때문에 생산 조건과 부자재 혼합비율의 조건을 확립하는 것이 중요 할 것으로 판단
- 바이오숯 유기질 비료의 제조 및 생산을 위해서는 유기질비료 규격에 맞게 바이오숯과 부자재의 혼합 제조 하는 것이 중요 할 것으로 판단된다.
- 모든 바이오숯 처리구에서 EC가 과도하게 증가하였는데, 이는 석고의 첨가로 인한 것으로 판단됨

차. 시제품 현장실증(2차)

1. 현장실증준비

- 1연차 실험결과를 바탕으로 개발된 바이오숯 기반 시제품 2종의 현장 실증을 진행함

1) 재료 및 방법

- 실험 농가는 지난 1연차 현장실증 실험에 사용했던 충남 청양군 대치면에 위치한 농장에서 진행함
- 1차년도 실험의 영향을 줄이기 위하여 실험 종료 후 비닐온실의 비닐을 제거하여 약 6개월간 비를 맞춤



그림 78 시험 온실 비닐 제거

- 시험에 사용한 시제품은 (주)포이엔에서 제작한 시제품 2종(pellet, bead)를 사용하였음
- 시험구 구성은 별도의 처리가 없는 대조구 및 시제품 2종(pellet, bead)을 각각 토양 무게대비 2, 5% 처리하였음
- 따라서 본 실험의 공시작물은 6종으로 고추, 상추, 배추, 토마토 가지, 양파이며 구체적인 시험구 조성은 아래와 같음

A. 고추

B. 상추

C. 배추

① 기존 토양	대조구	① 기존 토양	대조구	① 기존 토양
② 시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	② 시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	② 시제품 pellet 2% 처리
③ 시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③ 시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③ 시제품 pellet 5% 처리
④ 시제품 bead 2% 처리	실험구3그룹	④ 시제품 bead 2% 처리	실험구3그룹	④ 시제품 bead 2% 처리
⑤ 시제품 bead 5% 처리	실험구4그룹	⑤ 시제품 bead 5% 처리	실험구4그룹	⑤ 시제품 bead 5% 처리

D. 토마토

E. 가지

F. 양파

① 기존 토양	대조구	① 기존 토양	대조구	① 기존 토양
② 시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	② 시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	② 시제품 pellet 2% 처리
③ 시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③ 시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③ 시제품 pellet 5% 처리
④ 시제품 bead 2% 처리	실험구3그룹	④ 시제품 bead 2% 처리	실험구3그룹	④ 시제품 bead 2% 처리
⑤ 시제품 bead 5% 처리	실험구4그룹	⑤ 시제품 bead 5% 처리	실험구4그룹	⑤ 시제품 bead 5% 처리

- 온실 내부 모식도는 아래 모식도와 같으며 1 시험구당 6종의 작물을 각각 10개체씩 정식하였음(실제 작물은 1열로 정식함)

	고추 (10개체)	상추 (10개체)	배추 (10개체)	가지 (10개체)	토마토 (10개체)	양파 (10개체)
대조구	A ① A ① A ① A ① A ①	B ① B ① B ① B ① B ①	C ① C ① C ① C ① C ①	D ① D ① D ① D ① D ①	E ① E ① E ① E ① E ①	F ① F ① F ① F ① F ①
	A ① A ① A ① A ① A ①	B ① B ① B ① B ① B ①	C ① C ① C ① C ① C ①	D ① D ① D ① D ① D ①	E ① E ① E ① E ① E ①	F ① F ① F ① F ① F ①
실험구 1그룹	A ② A ② A ② A ② A ②	B ② B ② B ② B ② B ②	C ② C ② C ② C ② C ②	D ② D ② D ② D ② D ②	E ② E ② E ② E ② E ②	F ② F ② F ② F ② F ②
	A ② A ② A ② A ② A ②	B ② B ② B ② B ② B ②	C ② C ② C ② C ② C ②	D ② D ② D ② D ② D ②	E ② E ② E ② E ② E ②	F ② F ② F ② F ② F ②
실험구 2그룹	A ③ A ③ A ③ A ③ A ③	B ③ B ③ B ③ B ③ B ③	C ③ C ③ C ③ C ③ C ③	D ③ D ③ D ③ D ③ D ③	E ③ E ③ E ③ E ③ E ③	F ③ F ③ F ③ F ③ F ③
	A ③ A ③ A ③ A ③ A ③	B ③ B ③ B ③ B ③ B ③	C ③ C ③ C ③ C ③ C ③	D ③ D ③ D ③ D ③ D ③	E ③ E ③ E ③ E ③ E ③	F ③ F ③ F ③ F ③ F ③
실험구 3그룹	A ④ A ④ A ④ A ④ A ④	B ④ B ④ B ④ B ④ B ④	C ④ C ④ C ④ C ④ C ④	D ④ D ④ D ④ D ④ D ④	E ④ E ④ E ④ E ④ E ④	F ④ F ④ F ④ F ④ F ④
	A ④ A ④ A ④ A ④ A ④	B ④ B ④ B ④ B ④ B ④	C ④ C ④ C ④ C ④ C ④	D ④ D ④ D ④ D ④ D ④	E ④ E ④ E ④ E ④ E ④	F ④ F ④ F ④ F ④ F ④
실험구 4그룹	A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤	B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤	C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤	D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤	E ⑤ E ⑤ E ⑤ F ⑤ F ⑤	F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤
	A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤	B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤	C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤	D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤	F ⑤ F ⑤ F ⑤ E ⑤ E ⑤	F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤

- 현장실증 실험 준비는 아래와 같이 진행함



시험구별 시제품 처리



토양 및 시제품 혼합



두둑 작업



비닐 작업



꽃말 설치



작물 정식

그림 79. 시험구 조성

- 작물 정식 후 약 2개월간 진행되었으며 2개월 후 시험구별 토양 및 식물체를 채취하여 아래와 같이 분석 및 조사함

① 식물체 생육조사

- 배추: 엽수, 최대엽, 엽록소, 결구중, 결구횡, 결구중, 생체중, 건물중
- 상추: 엽장, 엽폭, 엽록소, 생체중, 건물중
- 가지: 초장, 중경장, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
- 고추: 초장, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
- 토마토: 초장, 엽장, 엽폭, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
- 양파: 초장, 엽장, 엽폭, 엽수, 구직경, 생구중

② 식물체 주원소 분석

- 질소전량, 인산전량, 가리전량, 칼슘전량, 고토전량

③ 토양 이화학성 분석

- pH, EC, 질소전량, 유기물, 유효인산, 교환성양이온(K, Ca, Mg, Na), CEC, 토성

2. 현장실증 실험 결과

1) 토양분석 결과

- 실험 종료 후 채취한 토양의 이화학성 분석결과는 아래 표와 같음
- 시험에 사용한 토양은 모래와 점토함량이 높은 사질식양토였으며 1차년도 시험 이후 EC가 11.5dS/m에서 0.9dS/m로 감소한 것을 확인할 수 있었음
- 시제품 처리 후 토양의 pH는 대조구보다 낮아졌으며 bead 5% 시험구의 pH가 5.5로 가장 낮았음
- 토양 EC는 시제품 처리 후 상당히 높아져 작물 재배 적정 EC인 2.0dS/m를 초과하였으며 특히 bead 시험구는 2, 5% 시험구에서 각각 5.4, 14.0dS/m로 가장 높았음
- 토양 중 질소 함량은 대조구 0.26%에서 시제품 처리 후 0.1% 이상 상승하였고 bead 5% 시험구에서 0.50%로 가장 높았음
- 토양 양분 중 가장 변화량이 큰 항목은 유기물로 대조구 4.4%에서 pellet 2% 처리 후 8.5%로 약 2배 증가하였음
- Pellet 2% 외 pellet 5%, bead 시험구 또한 유기물 함량이 상당히 증가한 것을 확인할 수 있었음
- 토양 중 유효인산 함량은 시제품 처리 후 모두 증가하였으며 pellet 2% 시험구가 832.48mg/kg으로 가장 높았음
- Na를 제외한 교환성 양이온 함량 또한 시제품 처리 후 상당히 증가한 것을 확인할 수 있었으며 특히 K, Ca의 증가량이 높았음

표 77. 시험전 밭 토양의 기본 분석 결과

분석 항목	대조구	pellet 2%	pellet 5%	bead 2%	bead 5%	단위	
pH	7.3	6.8	6.6	6.4	5.5	-	
EC	0.9	3.8	5.7	5.4	14.0	dS/m	
질소전량	0.26	0.38	0.36	0.38	0.50	%	
유기물	4.4	8.5	7.6	7.1	6.9		
유효인산	626.46	832.48	795.86	779.26	766.17	mg/kg	
교환성 양이온	K ⁺	0.52	0.88	1.21	1.01	1.15	mg/kg
	Ca ²⁺	18.33	26.57	27.36	24.66	37.15	
	Mg ²⁺	3.63	2.86	3.13	3.02	4.66	
	Na ⁺	0.27	0.28	0.30	0.28	0.40	
CEC	19.16	20.2	18.07	18.84	19.29	cmol+/kg	
토성	sand	50.0	47.5	47.5	47.5	52.5	%
	silt	27.5	27.5	27.5	30	25.0	
	clay	22.5	25	25	22.5	22.5	
	토성	사질식양토	사질식양토	사질식양토	양토	사질식양토	

2) 식물체 생육조사 결과

- 시험 종료 후 수확한 시험구별 배추 생육조사 결과는 아래 표와 같음
- 배추의 엽수는 pellet 5% 시험구가 외엽, 내엽이 각각 31, 56장을 가장 많았음
- 배추 잎의 크기는 시험구별 큰 차이는 없었으나 잎의 엽록소 함량은 bead 2% 시험구의 배추가 $4.47\text{mg}/100\text{cm}^2$ 로 가장 높았음
- 배추의 생체중 및 건물중은 bead 2% 시험구 배추가 각각 5.22kg, 453.3g으로 가장 높았음

표 78. 시험구별 배추 생육조사 결과

	엽수		최대엽		엽록소	결구중	결구형	결구중	생체중	건물중
	외엽	내엽	엽장	엽폭						
	ea		cm		mg/100cm ²	cm		kg/주		g/주
대조구	26	35	50.0	28.00	2.83	22.5	7.8	0.25	2.12	192.8
pellet 2%	27	45	56.9	39.00	3.37	26.0	11.5	0.77	3.88	291.3
pellet 5%	31	56	62.0	39.50	3.79	26.0	12.5	1.05	4.79	376.7
bead 2%	31	53	62.9	44.30	4.47	25.4	12.3	0.95	5.22	453.3
bead 5%	28	41	55.0	31.40	3.25	20.0	10.1	0.28	2.86	258.9

- 상추 생육 조사결과는 아래 표와 같으며 상추 잎의 크기는 시험구별 큰 차이가 없었음
- 상추 잎의 엽록소는 배추와 동일하게 bead 2% 시험구의 배추가 3.6mg/100cm²로 가장 높았음
- 상추의 생체중은 pellet 5%와 bead 5%가 동일한 수준으로 조사되었으나 건물중은 pellet 5%가 49.8g으로 가장 높았음

표 79. 시험구별 상추 생육조사 결과

	최대엽		엽록소	생체중	건물중
	엽장	엽폭			
	----- cm -----	-----	mg/100cm ²	----- g/주 -----	-----
대조구	26.2	18.0	3.3	625	44.4
pellet 2%	27.5	18.5	3.3	630	45.1
pellet 5%	29.0	20.5	3.5	650	49.8
bead 2%	28.5	19.2	3.6	650	45.4
bead 5%	26.7	18.0	3.2	620	44.2

- 가지 생육 조사 결과는 아래 표와 같으며 가지의 초장은 bead 5%를 제외하고 비슷한 수준이었으며 bead 5%는 가장 낮은 53.0cm였음
- 가지 잎의 엽록소 함량은 배추, 상추 결과와 동일하게 bead 2%가 6.58mg/100cm²으로 가장 높았으며 이리 pellet 5%가 6.18mg/100cm²로 높았음

표 80. 시험구별 가지 생육조사 결과

	초장 ----- cm -----	중경장 -----	경경 mm	엽록소 mg/100cm ²
대조구	62.5	20.0	11.6	5.79
pellet 2%	64.5	21.5	12.39	5.77
pellet 5%	67.0	21.0	14.64	6.18
bead 2%	69.0	23.5	14.48	6.58
bead 5%	53.0	16.5	12.11	5.89

- 고추의 생육조사 결과는 아래 표와 같으며 고추의 초장은 시제품 처리 후 대조구보다 높았으며 bead 2% 고추가 94cm로 가장 컸음
- 고추 잎의 엽록소 함량은 대조구가 5.81mg/100cm²으로 가장 낮았으며 pellet 2, 5%, bead 2%가 각각 6.61, 6.63, 6.63mg/100cm²으로 높았음
- 고추 1주당 과실의 수도 엽록소와 비슷한 결과로 pellet 2, 5%, bead 2% 1주당 8개로 가장 많았음

표 81. 시험구별 고추 생육조사 결과

	초장 cm	경경 mm	엽록소 mg/100cm ²	과장 ----- mm -----	과경	과수 ea/주	과중 g/주
대조구	75	11.91	5.81	12.5	12.88	4	44.87
pellet 2%	80	12.04	6.61	16.0	16.09	8	64.37
pellet 5%	85	12.64	6.63	10.0	16.39	8	72.13
bead 2%	94	14.15	6.63	17.3	16.78	8	72.62
bead 5%	80	11.75	6.01	13.0	13.81	6	53.16

- 시험구별 토마토 생육조사 결과는 아래 표와 같음
- 토마토 1주당 평균 초장의 크기는 pellet 5%, bead 2%가 115cm로 가장 컸음
- 토마토 잎의 크기는 시험구별 큰 차이는 없었으나 대조구보다 컸으며 bead 2% 시험구의 엽장 및 엽폭이 각각 17.5, 8.5cm로 가장 컸음

표 82. 시험구별 토마토 생육조사 결과

	초장 ----- cm -----	최대엽		경경 mm	엽록소 mg/100cm ²
		엽장	엽폭		
대조구	110	14.6	8.1	11.7	6.1
pellet 2%	113	16.6	8.3	12.6	6.7
pellet 5%	115	17.3	8.4	13.7	7.3
bead 2%	115	17.5	8.5	13.6	7.2
bead 5%	110	15.2	8.3	12.7	6.5

- 양파의 생육조사 결과는 아래 표와 같으며
- 양파의 초장은 bead 2% 시험구에서 82.0cm로 가장 컸으며 이어 bead 5%, pellet 5%, pellet 2%, 대조구 순이었음
- 양파 잎의 크기도 초장결과와 동일하게 bead 2%가 엽장 및 엽폭이 73.5 2.8cm로 가장 컸으며 이어 bead 5%, pellet 5%, 대조구, pellet 2% 순이었음
- 양파 잎의 수 또한 bead 2% 시험구 양파가 11장으로 가장 많았으며 대조구의 2배 수준이었음
- 양파의 크기 및 무게 또한 bead 2% 시험구의 양파가 각각 84.4 250.6g으로 가장 좋았으며 생구중은 대조구에 약 5배 수준이었음

표 83. 시험구별 양파 생육조사 결과

	초장	엽장	엽폭	엽수	구직경	생구중
	----- cm -----			ea/주	----- g/주 -----	
대조구	44.5	40.0	1.4	5	46.6	58.8
pellet 2%	52.1	48.7	1.3	6	55.0	90.5
pellet 5%	63.0	59.0	2.0	9	67.5	130.1
bead 2%	82.0	73.5	2.8	11	84.4	250.6
bead 5%	70.6	62.0	1.5	7	53.5	122.8

3) 식물체 성분분석 결과

- 시험구별 식물체 성분분석결과는 아래 표와 같음
- 식물체 내 질소함량은 모든 작물에서 시제품을 처리한 시험구가 대조구보다 좋았음
- 특히 상추와 가지의 질소함량은 시제품 처리 후 상당히 증가한 것을 확인할 수 있었음

표 84. 식물체내 성분분석결과

		질소전량	인산전량	가리전량	칼슘전량	고토전량
		----- % -----				
배추	대조구	3.81	0.57	1.51	0.84	0.18
	pellet 2%	4.99	0.76	2.11	0.87	0.19
	pellet 5%	4.92	0.71	2.14	0.1.61	0.23
	bead 2%	4.37	0.44	2.11	3.25	0.39
	bead 5%	5.48	0.79	3.10	1.04	0.20
상추	대조구	3.48	0.54	2.20	1.69	0.48
	pellet 2%	5.15	0.80	2.79	1.26	0.34
	pellet 5%	5.36	0.81	2.65	1.44	0.36
	bead 2%	6.00	0.75	2.75	1.02	0.33
	bead 5%	5.74	0.79	2.29	1.40	0.38
가지	대조구	3.73	0.50	2.10	2.48	0.65
	pellet 2%	5.40	0.47	1.84	2.18	0.41
	pellet 5%	5.06	0.56	2.12	2.62	0.41
	bead 2%	5.84	0.45	2.03	2.17	0.38
	bead 5%	5.53	0.45	2.57	2.65	0.35
고추	대조구	5.01	0.30	2.74	2.09	0.63
	pellet 2%	5.23	0.28	2.81	1.71	0.56
	pellet 5%	5.39	0.29	3.15	1.83	0.56
	bead 2%	5.18	0.35	3.95	2.35	0.72
	bead 5%	5.12	0.33	2.41	2.17	0.63
토마토	대조구	2.25	0.43	2.20	5.16	0.85
	pellet 2%	2.56	0.45	1.98	5.53	0.89
	pellet 5%	2.77	0.52	1.62	7.45	1.00
	bead 2%	2.48	0.46	1.96	5.28	0.80
	bead 5%	2.65	0.51	1.92	5.91	0.92
파	대조구	2.58	0.56	2.43	1.89	0.48
	pellet 2%	3.44	1.02	2.63	2.13	0.33
	pellet 5%	3.05	0.64	2.24	2.10	0.26
	bead 2%	3.10	0.48	2.66	2.58	0.25
	bead 5%	3.08	0.73	1.93	1.93	0.27

카. 바이오 숯 기반 시제품의 개량

1. 시제품 개량

1) 목적

- 2연차 시제품은 석고 함량의 과다로 인하여 낮은 pH 및 높은 EC 문제가 있음을 확인하였음
- 또한 본 과제의 목표 중 하나는 바이오숯 기반 제품 3종의 개발로 2연차에 개발한 2종에 1종을 추가함
- 따라서 상기의 문제를 해결하고 추가 1종의 시제품을 개발하고자 본 실험을 진행함

2) 시제품의 컨셉

- 본 과제의 목표 중 하나인 시제품 3종을 개발하기 위하여 컨셉을 아래와 같이 설정함
- ① 유기질비료(pellet): 바이오 숯이 첨가된 식물성 유기질비료로 목표 spec은 아래와 같음
 - 질소, 인산, 가리 3종의 합이 7% 이상
 - 유기물함량 60% 이상
 - 바이오 숯 30% 이상
 - pellet 형태
- ② Ca 비료(bead): Ca-Alginate 제형법으로 제작한 구슬형태의 비료
- ③ 퇴비(powder): 퇴비와 바이오 숯을 혼합한 동물성 유기질 비료로 목표 spec은 아래와 같음
 - 유기물 30% 이상
 - C/N율 45% 이하

3) 시제품 배합비

- 목표 spec 및 컨셉에 만족하는 시제품을 제작하기 위하여 원료 선정 및 배합을 진행함
- 회의를 통해 결정된 시제품의 배합비는 아래 표와 같음
- 시제품 pellet은 목표 spec(혼합 유기질비료 기준)에 맞추기 위하여 예비실험을 통해 얻은 결과임
- 유기질비료에 많이 사용되는 아주까리 유박 및 미강과 인산 함량이 높은 커피박을 혼합하기로 함

표 85. 혼합 유기질비료 컨셉 시제품 pellet의 배합비

	바이오 숯	아주까리 유박	커피박	미강
	----- %(v/v) -----			
pellet	30	50	10	10

- Ca비료 컨셉인 시제품 bead는 2연차 개발한 bead 혼합 시제품에서 bead만 사용하여 시제품으로 개발함
- Bead 제작 조성은 아래 표와 같으며 Ca 및 질소의 공급원으로 사용이 가능할 것으로 예상됨
- Bead의 제작 방법은 2연차와 동일함

표 86. Ca 비료 컨셉 시제품 bead의 조성비

	바이오 숯	Sodium alginate	Ca(NO ₃) ₂
	----- %(v/v) -----		
bead	40.0	1.5	1.0

- 퇴비 컨셉의 시제품 powder는 주로 사용되는 퇴비 배합에 바이오 숯 20%를 혼합하여 제작함
- 바이오 숯의 미생물 활성 증진을 통한 부숙 촉진 및 용존유기탄소(DOC)의 용출 저감 효과 등이 예상됨

표 87. 퇴비 컨셉 시제품 powder의 배합비

	바이오 숯	계분	돈분	수피
	----- %(v/v) -----			
powder	20	8	32	40

4) 시제품 제작

- 상기 배합비로 제작한 시제품 3종의 생산 결과는 아래 사진과 같음
- 시제품 pellet은 직경 약 6mm에 길이 평균 3cm로 성형되었으며 지난 2연차 펠릿보다 직경이 작고 길이가 길음
- 2연차 펠릿은 강도가 너무 강하고 두께가 두꺼워 단기간에 시제품의 효과를 보기 어려웠음
- 따라서 본 실험에는 직경을 줄여 강도를 조절하였으며 보다 효과가 좋을 것으로 판단됨

- 시제품 bead는 2~3mm로 2연차와 동일하며 높은 EC를 조절하기 위하여 세척을 3회 진행하였음
- 또한 bead 시제품은 2연차와 다르게 석고, 피트모스 등 부가 원료가 첨가되지 않은 구슬형태로 토양의 물리성 개선에도 영향을 미칠 것으로 사료됨
- 시제품 powder는 사진과 같이 분상형태로 입자의 크기는 0.5mm~1.0mm로 화학적 반응이 빠를 것으로 판단됨



시제품 pellet



시제품 bead



시제품 powder

그림 80. 시제품 3종

5) 시제품 분석 결과

- 시제품 3종의 비료 특성 및 중금속 분석결과는 아래 표와 같음
- 시제품 pellet의 pH는 7.7로 산성 토양의 pH 개량 효과가 있을 것으로 사료되며 EC는 15.6dS/m으로 지난 2연차와 비슷한 수준이었음
- 유기물 함량은 83.7%로 목표였던 60%를 초과하였으며 질소, 인산, 칼리는 예상보다 약간 낮은 수준이었음
- 시제품 bead의 pH는 8.5로 상당히 높았으며 토양 중 중금속 저감효과에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단됨
- EC는 10.2dS/m로 지난 2연차 bead 시제품보다 상당히 낮은 수준으로 작물 생육에 악영향을 미칠 수준은 아니었음
- 유기물 함량은 68.7%로 바이오 숯의 함량이 높아 별도의 유기물이 첨가되지 않아도 높게 측정된 것으로 판단됨
- 질소함량은 0.68%로 bead 성형시 첨가되는 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 의 영향으로 예상치 1.0%보다 낮았음
- 시제품 powder의 pH는 6.9%로 pH가 낮은 퇴비의 특성을 바이오 숯이 개량하여 적절한 수준으로 조절되었음
- EC는 53.1dS/m로 시제품 중 가장 높은 EC를 나타내었으며 첨가된 바이오 숯보다 계분, 돈분 등의 영향으로 판단됨

- 퇴비의 질소, 인산, 가리 함량 중 인산의 함량이 2.03%로 가장 높았으며 질소, 인산, 가리 모두 공급이 가능한 수준이었음

표 88. 시제품 3종의 비료 특성 분석 결과

	pH	EC	유기물	질소	인산	칼리	CEC
	-	dS/m	%	- - - - - % - - - - -	- - - - - % - - - - -	- - - - -	cmol ⁺ /kg
시제품 pellet	7.7	15.6	83.7	3.44	1.33	1.15	18.3
시제품 bead	8.5	10.2	68.7	0.68	0.19	0.46	19.57
시제품 powder	6.9	53.1	51.2	1.91	2.03	1.25	27.02

- 시제품 pellet의 중금속 함량은 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’ 기준 혼합 유기질비료 기준을 모두 만족하였음
- 시제품 powder의 중금속 함량은 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’ 기준 퇴비 기준을 모두 만족하였음

표 89. 시제품 3종의 중금속 함량 분석 결과

	As	Cd	Hg	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	- - - - - mg/kg - - - - -							
시제품 pellet	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.1	n.d.	n.d.	49
시제품 bead	n.d.	n.d.	n.d.	3.91	25.6	1.78	n.d.	36
시제품 powder	*n.d.	n.d.	n.d.	4.72	154	3.01	n.d.	436
**혼합유기질비료 기준	20	2	1	90	120	20	50	400
***퇴비 기준	45	5	2	200	360	45	130	900

*n.d.: not detected

**혼합유기질비료 기준: *기준: 농촌진흥청 고시 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’ 혼합유기질비료 기준

***퇴비 기준: 농촌진흥청 고시 ‘비료관리법’ ‘비료 공정규격설정 및 지정’ 퇴비 기준

타. 시제품 토양 영향 평가 2차(Lab Scale)

1. 토양 중 양분 변화

1) 목적

- 시제품 3종이 토양 중 양분에 미치는 영향을 알아보기 위하여 본 실험을 진행함
- 본 과제의 목적은 바이오 숯을 이용한 비료의 개발로 탄소 격리 및 비료의 효과를 구명해야함

2) 재료 및 방법

- 본 실험은 (주)포이엔 소유의 일산 창고 인근 노지에서 진행함
- 시험에 사용한 토양은 일반 농가의 밭 토양을 사용하였으며 토양의 기본 분석 결과는 아래와 같음
- 토양은 sand함량이 높은 사양토였으며 우리나라 일반 밭 토양의 토성을 나타냄
- 토양의 pH는 7.16로 일반 밭 토양 수준으로 조사되었으며 EC는 0.3dS/m로 양분이 적은 토양임
- 질소, 유기물 및 유효인산은 상당히 부족한 상태였으며 교환성 양이온의 함량 또한 부족하였음

표 90. 시험전 밭 토양의 기본 분석 결과

분석 항목		시험전 토양	단위
pH		7.16	-
EC		0.3	dS/m
질소전량		0.06	%
유기물		0.22	
유효인산		27.5	mg/kg
교환성 양이온	K ⁺	0.04	mg/kg
	Ca ²⁺	7.43	
	Mg ²⁺	2.05	
	Na ⁺	0.16	
CEC		4.92	cmol+/kg
토성	sand	80	%
	silt	12.5	
	clay	7.5	
	토성	양질사토	-

- 시험구의 조성은 아래 표와 같이 대조구, 타사 퇴비, 시제품 3종 2, 5wt%이며 3 반복으로 구성되었음

대조구 - 1	대조구 -2	대조구 -3
타사 퇴비 2% -1	타사 퇴비 2% -2	타사 퇴비 2% -3
타사 퇴비 5% -1	타사 퇴비 5% -2	타사 퇴비 5% -3
시제품 powder 2% -1	시제품 powder 2% -2	시제품 powder 2% -3
시제품 powder 5% -1	시제품 powder 5% -2	시제품 powder 5% -3
시제품 pellet 2% -1	시제품 pellet 2% -2	시제품 pellet 2% -3
시제품 pellet 5% -1	시제품 pellet 5% -2	시제품 pellet 5% -3
시제품 bead 2% -1	시제품 bead 2% -2	시제품 bead 2% -3
시제품 bead 5% -1	시제품 bead 5% -2	시제품 bead 5% -3

- 시험구 조성을 위한 시제품 처리 방법은 다음과 같이 진행함

- ①준비된 토양 15kg에 시제품(powder, pellet, bead)을 토양무게비로 각각 2, 5wt% 혼합함
- ②토양과 시제품을 균일하게 혼합한 뒤 5kg씩 pot에 옮겨 담음
- ③약 600ml의 물을 각 pot에 관수한 뒤 48시간동안 방치하여 안정화함



그림 81. 3연차 시험구 셋팅

- 관수는 1일 1회 아침에 동일한 양을 각 포트에 관수하였으며 약 1개월간 작물 재배 실험을 진행함
- 실험 종료 후 채취한 토양은 다음의 항목을 분석함
 - ① 토양 화학성: pH, EC, 유기물, 유효인산 CEC, 교환성 양이온(K, Ca, Mg, Na)
 - ② 토양 미생물 활성: 토양 호흡
 - ③ 토양 탄소 분획

3) 토양 분석 결과

- 대조구 토양의 pH는 7.16이었으며 타사제품 및 시제품을 처리한 시험구의 pH는 8.2~9.0으로 증가하였음
- pH 상승률은 시제품 bead 시험구 토양의 pH가 가장 높았으며 pH 상승률이 가장 낮은 시험구는 타사 퇴비 제품이었음
- 대조구 토양의 EC는 0.30dS/m로 상당히 낮은 수준이었으며 타사 제품 처리 후 0.65, 0.70dS/m까지 증가하였음
- 시제품 처리 후 EC상승률이 가장 좋았던 시험구는 powder 시제품이었으며 1.20, 1.95dS/m까지 증가하였음
- 토양 중 질소의 함량은 시제품 powder 5% 시험구가 0.25%로 가장 높았으며 bead 2% 시험구는 0.05%로 대조구보다 낮았음
- 토양 중 유기물 함량은 제품 처리 후 대조구보다 모두 증가하였으며 bead 5% 시험구의 유기물함량이 3.71%로 가장 높았음
- Ca 비료 컨셉인 bead를 처리한 시험구에서 Ca 함량이 15.32mg/kg로 대조구 대비 약 2배로 증가하였음

표 91. 토양 중 양분 변화 실험 토양 분석결과(3연차)

	pH	EC	질소	유기물	유효인산	K	Ca	Mg	Na	CEC
	-	dS/m	%		- - - - -	mg/kg	- - - - -			cmol/kg
대조구	7.2	0.30	0.06	0.22	27.50	0.04	7.43	2.05	0.16	4.92
타사 퇴비 2%	8.2	0.65	0.1	0.95	462.43	0.07	8.19	2.65	0.16	6.80
타사 퇴비 5%	8.4	0.70	0.44	2.29	1196.25	0.14	8.00	3.37	0.21	7.03
powder 2%	8.3	1.20	0.13	1.62	474.40	0.05	8.72	2.58	0.32	6.41
powder 5%	8.2	1.95	0.25	2.21	852.44	0.11	9.75	3.35	0.48	6.98
pellet 2%	8.6	1.05	0.15	1.26	95.84	0.05	6.24	1.55	0.13	5.83
pellet 5%	8.7	0.85	0.11	3.56	255.45	0.19	10.01	2.38	0.13	5.39
bead 2%	8.8	0.60	0.05	1.68	43.79	0.04	12.68	1.8	0.12	5.19
bead 5%	9.0	0.60	0.11	3.71	44.42	0.06	15.32	1.89	0.13	5.60

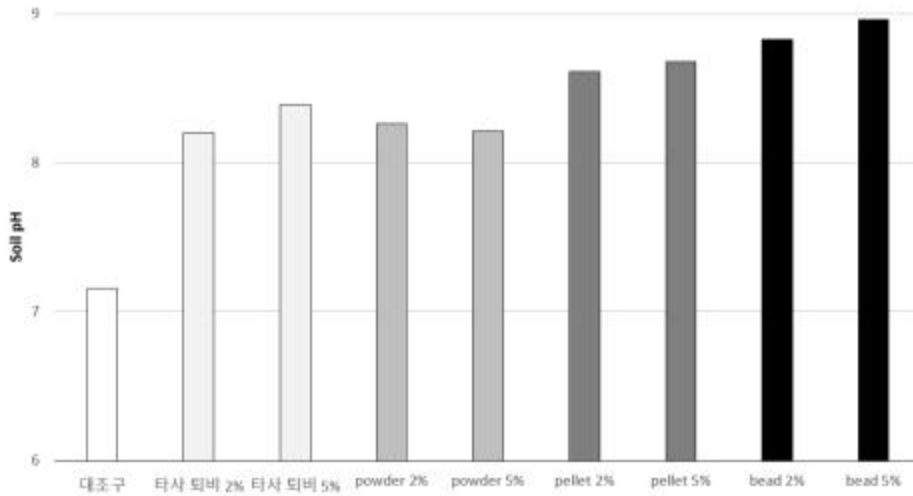


그림 82. 시험구별 토양 pH

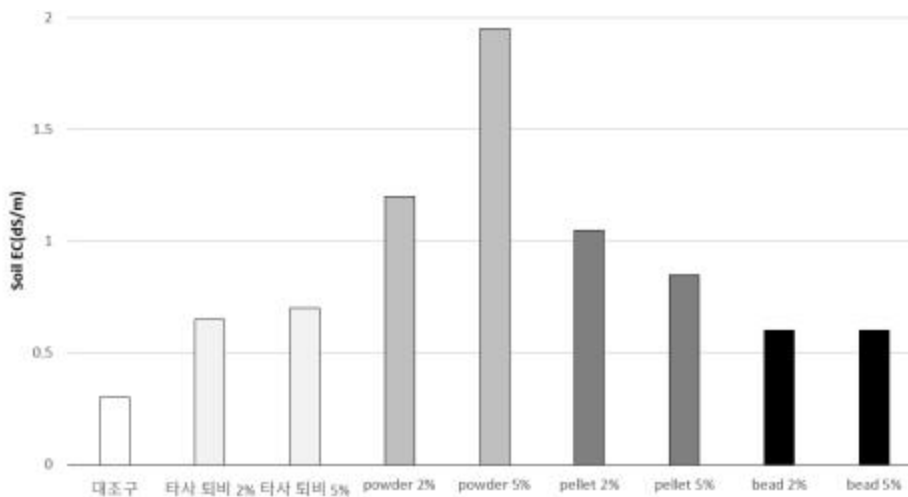


그림 83. 시험구별 토양 EC

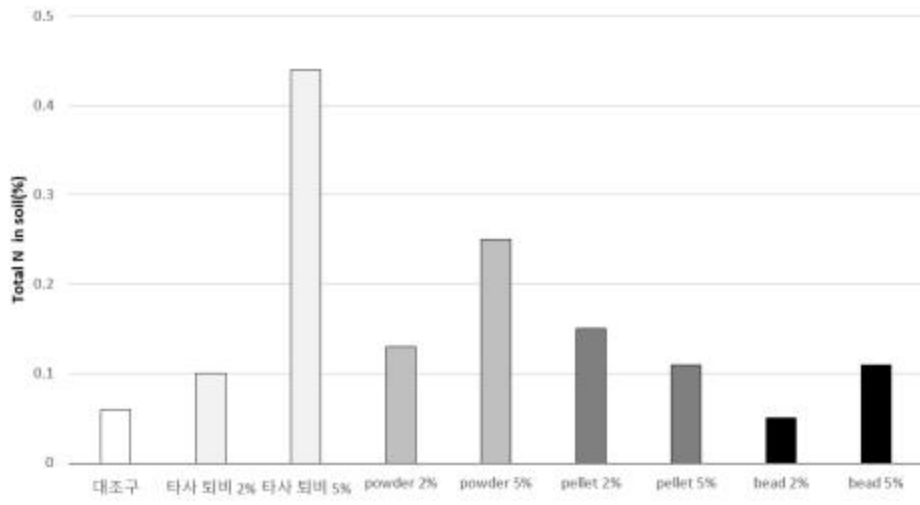


그림 84. 시험구별 토양 중 총 질소

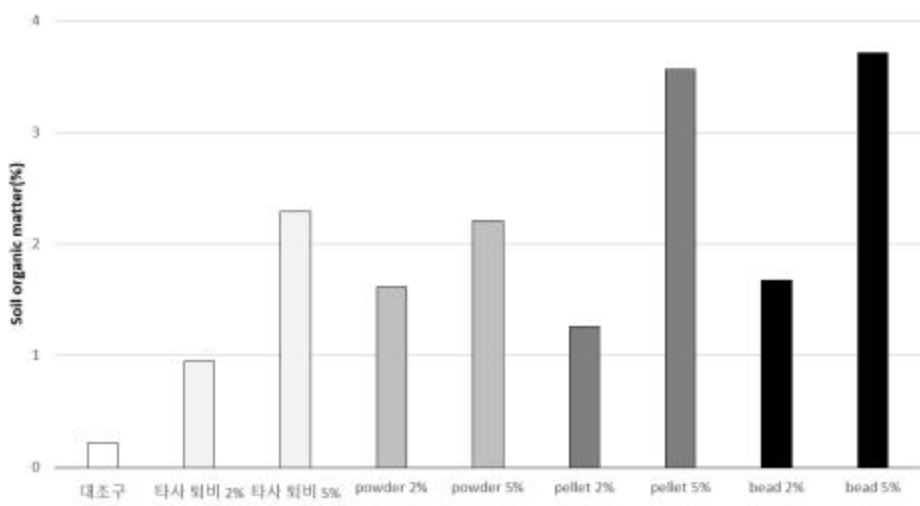


그림 85. 시험구별 토양 중 유기물 함량

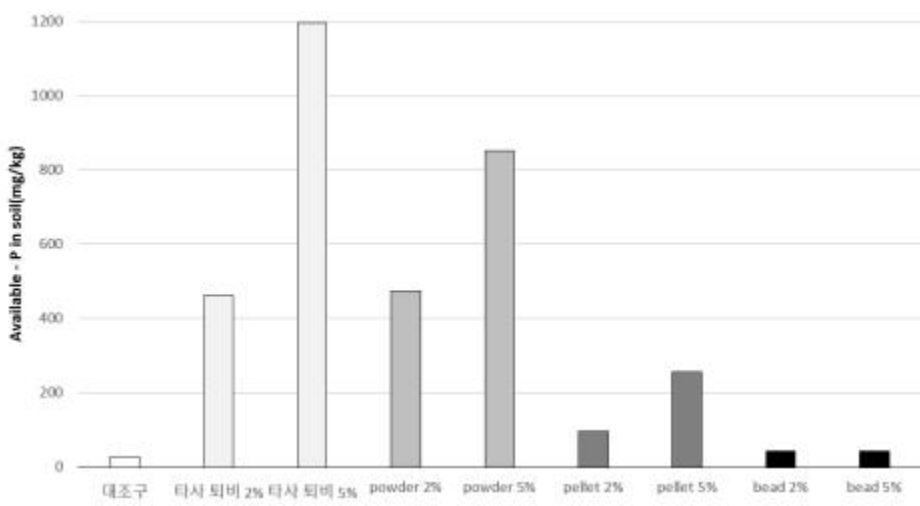


그림 86. 시험구별 토양 중 유효인산 함량

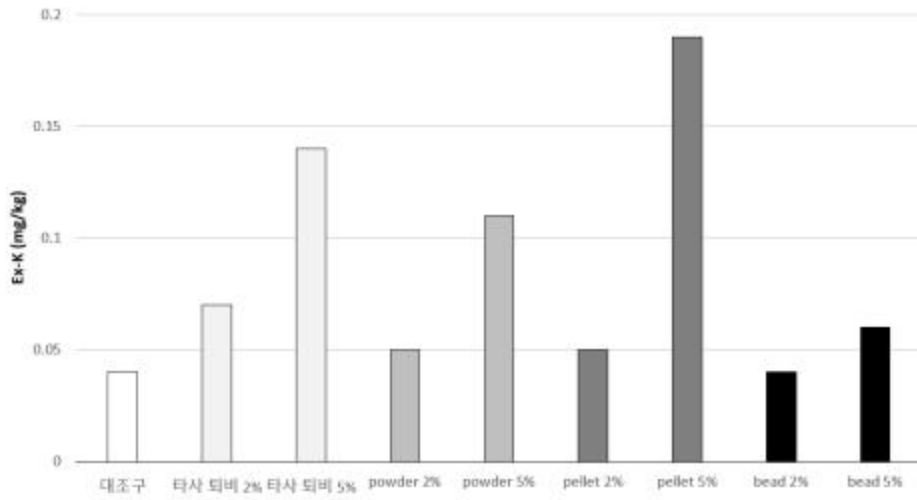


그림 87. 시험구별 토양 중 교환성 칼륨 함량

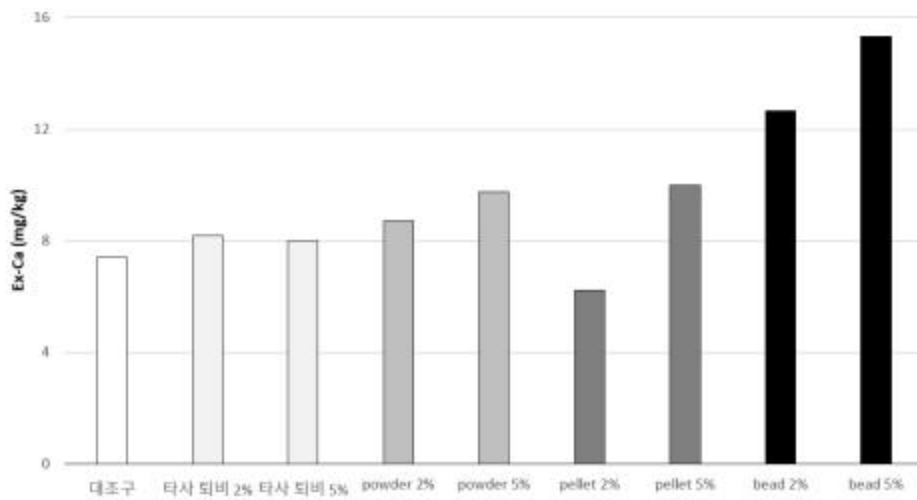


그림 88. 시험구별 토양 중 교환성 칼슘 함량

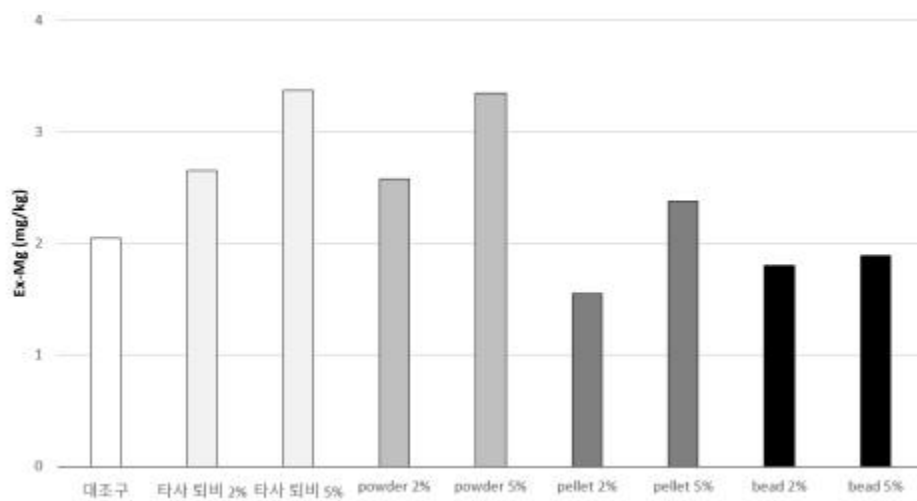


그림 89. 시험구별 토양 중 교환성 마그네슘 함량

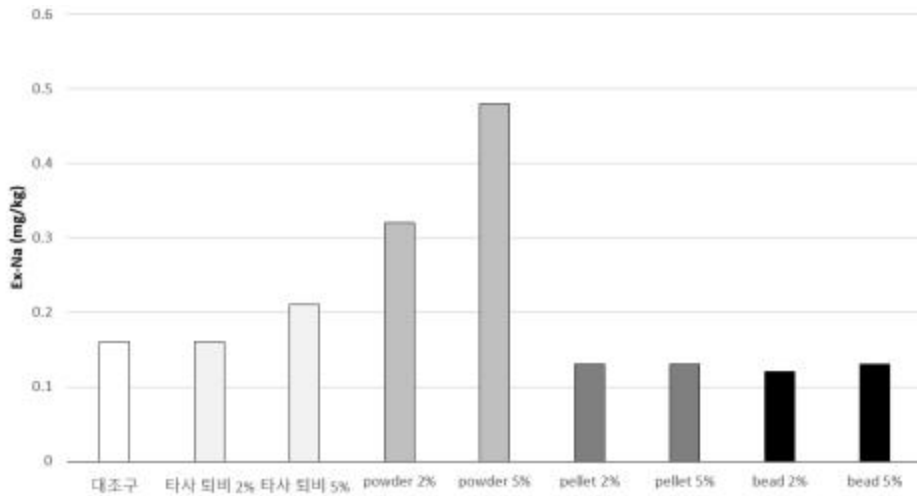


그림 90. 시험구별 토양 중 교환성 나트륨 함량

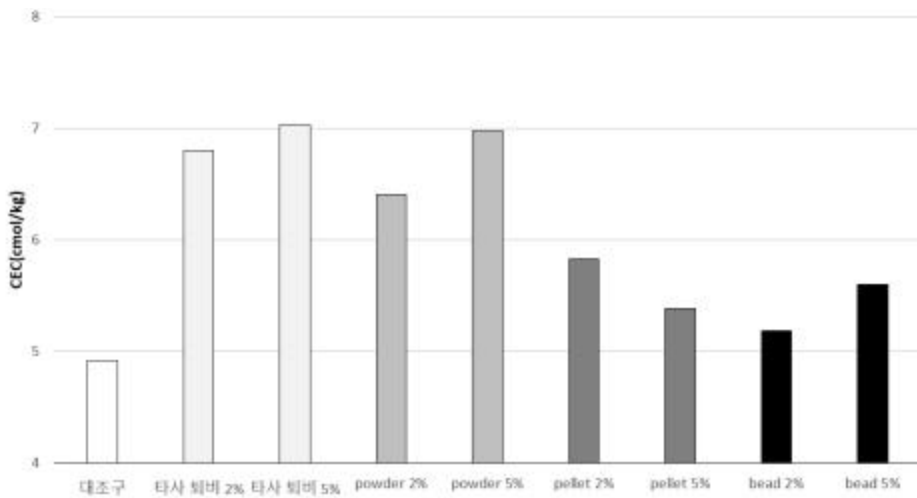
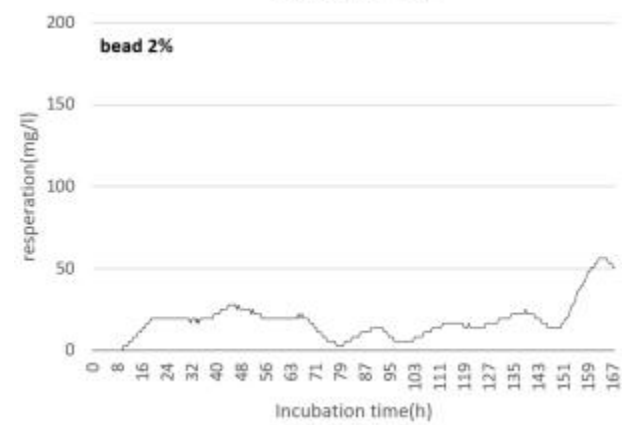
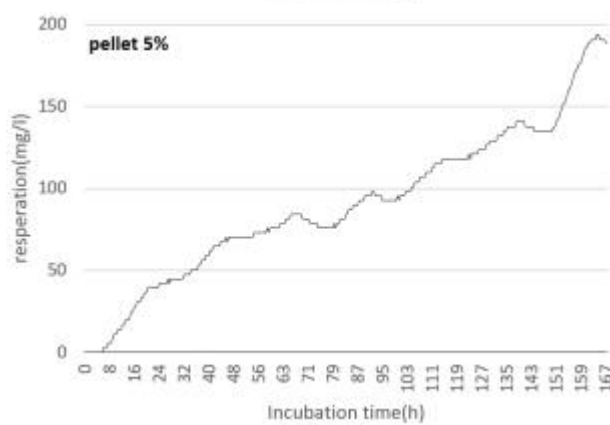
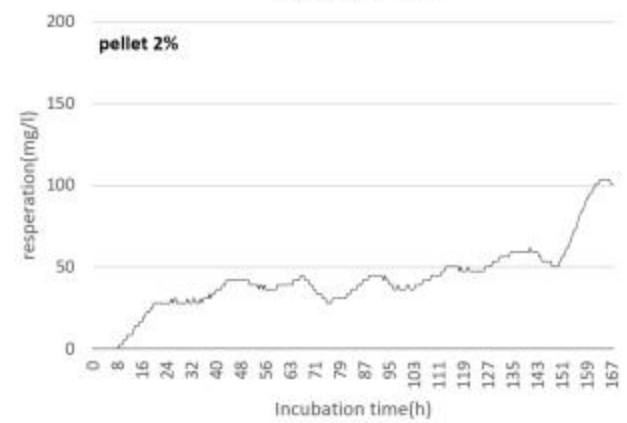
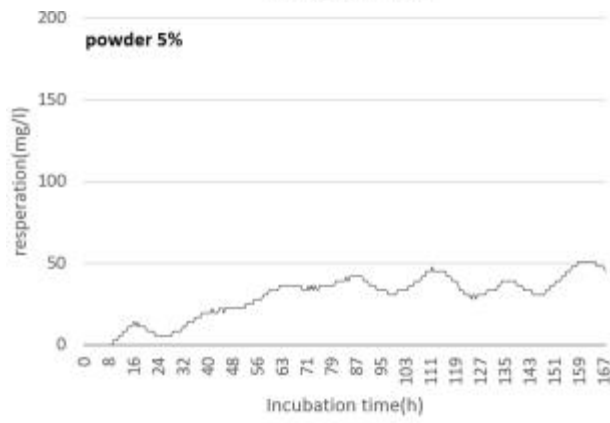
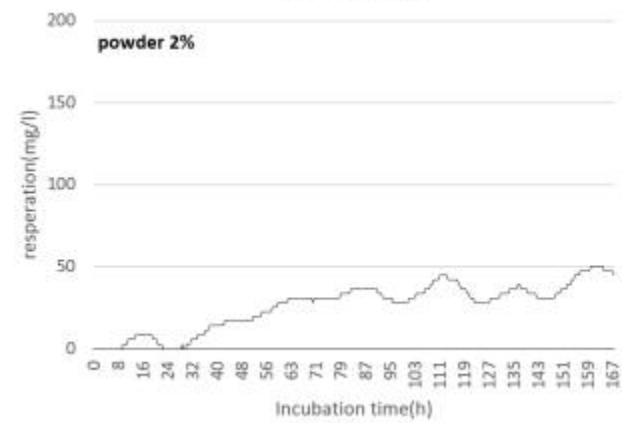
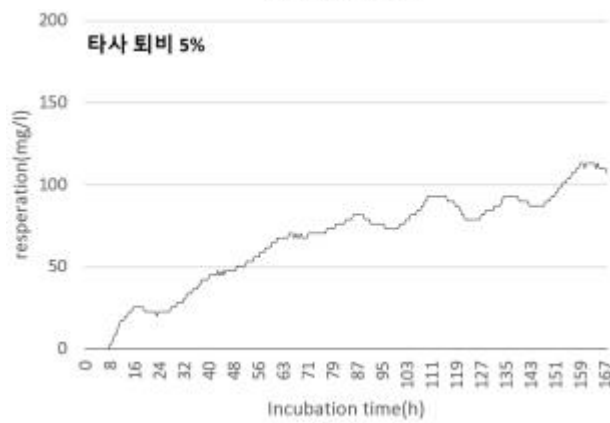
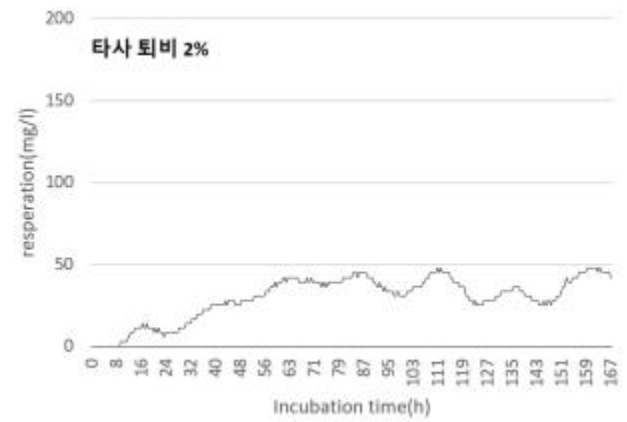
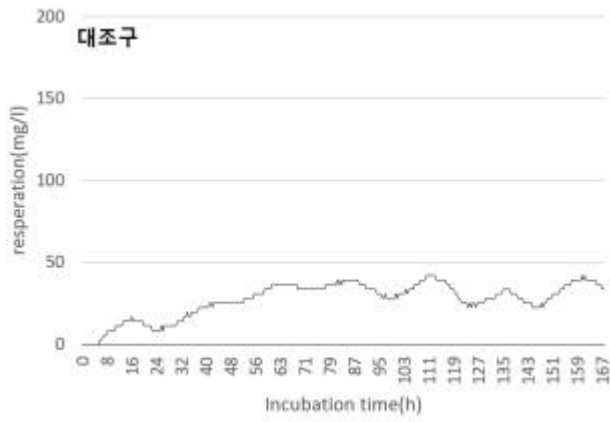


그림 91. 시험구별 토양의 양이온 교환 능력(CEC)

- 토양 중 양분 변화 실험 토양의 토양 호흡 분석 결과는 아래 표와 같음
- 제품의 처리량이 많을수록 최대호흡량 및 평균 호흡량이 증가하였으며 일부 시험구에서는 대조구보다 낮게 측정됨
- 최대 호흡량은 pellet 5%가 194.0mg/l로 가장 높았으며 이어 타사 퇴비 5% 시험구가 113.0mg/l로 높았음
- 대조구는 42.2mg/l로 호흡량이 거의 없었으며 타사 퇴비 2%도 비슷한 수준이었음
- 평균 호흡량도 pellet 5% 시험구가 90.3mg/l로 가장 높았으며 powder 2%, bead 2%는 대조구보다 낮은 26.1, 17.7mg/l였음
- 질소, 인산, 가리 함량이 낮은 bead 시험구는 미생물에 영양공급이 어려워 호흡량이 낮게 측정된 것으로 사료됨

표 92. 토양 평균 호흡량 및 최대 호흡량

	대조구	타사 퇴비 2%	타사 퇴비 5%	powder 2%	powder 5%	pellet 2%	pellet 5%	bead 2%	bead 5%
	----- mg/l -----								
최대 호흡량	42.2	47.8	113.0	50.6	50.6	104.0	194.0	56.3	81.6
평균 호흡량	27.3	29.9	65.5	26.1	29.2	42.3	90.3	17.7	28.5



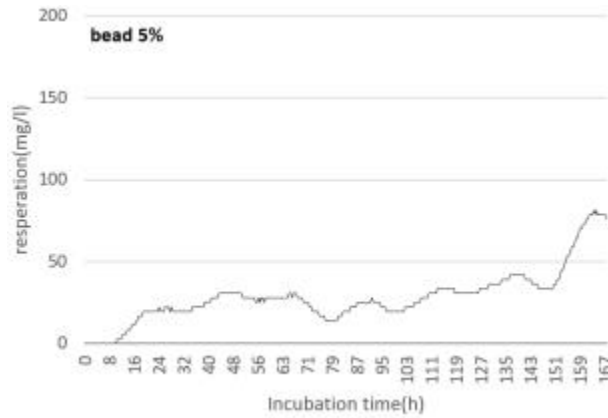


그림 92. 토양 중 양분 변화 실험 토양 호흡 결과

2. 토양 중 중금속 저감 효과

1) 목적

- 시제품 3종의 토양 중 중금속 안정화 효과를 구명하기 위하여 본 실험을 진행함

2) 재료 및 방법

- 본 실험은 (주)포이엔 소유의 일산 창고 인근 노지에서 진행함
- 시험에 사용한 토양은 일반 농가의 밭 토양에 중금속 시약을 처리하여 인위적 오염토양을 제작(Spiking)하여 사용하였으며 토양 spiking 방법 2연차 실험과 동일하게 진행함
- Spiking 전·후토양의 기본 특성은 아래 표와 같음
- 토양은 sand함량이 높은 양질사토였으며 우리나라 일반 산 토양의 토성을 나타냄
- Spiking 후 토양의 pH는 4.82로 spiking 후 pH가 감소하였으며 EC는 spiking 전 0.3dS/m에서 spiking 후 7.2로 증가함
- 질소, 유기물 및 유효인산 등 양분의 변화는 크게 없었음

표 93. 시험전 밭 토양의 기본 분석 결과

분석 항목		spiking 전	spiking 후	단위
	pH	7.16	4.82	-
	EC	0.3	7.2	dS/m
	질소전량	0.06	0.08	%
	유기물	0.22	0.8	
	유효인산	27.5	-	mg/kg
교환성 양이온	K ⁺	0.04	0.02	mg/kg
	Ca ²⁺	7.43	7.88	
	Mg ²⁺	2.05	2.28	
	Na ⁺	0.16	0.19	
	CEC	4.92	5.21	cmol+/kg
토성	sand	80.0	78.8	%
	silt	12.5	13.8	
	clay	7.5	7.5	
	토성	양질사토	양질사토	

- 토양 오염 Spiking 후 토양 중 중금속 함량은 아래 표와 같음
- Spiking 전 총 중금속 함량은 ‘토양오염우려기준’에 미치지 못하였으며 spiking 후 ‘토양오염우려기준’을 초과하였음
- 당초 spiking 목표 농도는 토양오염우려기준의 2배였으며 Cd를 제외하고 Cu, Ni, Pb, Zn은 우려기준의 2배를 초과함
- 유효태 중금속함량은 spiking 아연만 검출되었으나 spiking 후 상당량 검출되어 본 실험에 적합한 토양이 되었음

표 94. Spiking 전·후 토양 중 중금속 함량

분석 항목	spiking 전	spiking 후	*기준	목표	단위
총 중금속	Cd	n.d.	6.71	4	8
	Cu	21.97	436.96	150	300
	Ni	7.02	279.38	100	200
	Pb	n.d.	484.59	200	400
	Zn	62.16	788.68	300	600
***유효태 중금속	Cd	n.d.	6.31	-	-
	Cu	n.d.	250.03	-	-
	Ni	n.d.	234.01	-	-
	Pb	n.d.	269.23	-	-
	Zn	0.43	631.23	-	-

mg/kg

*기준: 환경부 고시 '토양환경보전법'의 '토양오염우려기준' 중 '1지역' 기준

**n.d: not detected

***유효태 중금속: NH₄NO₃ extract 중금속 함량

- 시험구의 조성은 대조구, 타사 퇴비 2, 5wt%, 시제품 3종 2, 5wt%를 3반복으로 진행함

대조구 - 1	대조구 -2	대조구 -3
타사 퇴비 2% -1	타사 퇴비 2% -2	타사 퇴비 2% -3
타사 퇴비 5% -1	타사 퇴비 5% -2	타사 퇴비 5% -3
시제품 powder 2% -1	시제품 powder 2% -2	시제품 powder 2% -3
시제품 powder 5% -1	시제품 powder 5% -2	시제품 powder 5% -3
시제품 pellet 2% -1	시제품 pellet 2% -2	시제품 pellet 2% -3
시제품 pellet 5% -1	시제품 pellet 5% -2	시제품 pellet 5% -3
시제품 bead 2% -1	시제품 bead 2% -2	시제품 bead 2% -3
시제품 bead 5% -1	시제품 bead 5% -2	시제품 bead 5% -3

- 시험구 조성을 위한 시제품 처리 방법은 다음과 같이 진행함

- ① 준비된 토양 15kg에 시제품(powder, pellet, bead)을 토양무게비로 각각 2, 5wt% 혼합함
- ② 토양과 시제품을 균일하게 혼합한 뒤 5kg씩 pot에 옮겨 담음
- ③ 약 600ml의 물을 각 pot에 관수한 뒤 48시간동안 방치하여 안정화함



그림 93. 3년차 시험구 셋팅

- 관수는 1일 1회 아침에 동일한 양을 각 포트에 관수하였으며 약 1개월간 작물 재배 실험을 진행함
- 실험 종료 후 채취한 토양은 다음의 항목을 분석함
 - ① 토양 화학성: pH, 유기물
 - ② 토양 중 유효태 중금속 함량

3) 토양 분석 결과

- 토양 중 중금속 저감 효과 구명 실험 종료 후 채취한 토양의 화학성 및 유효태 중금속 분석결과는 아래 표와 같음
- 토양의 pH는 타사 제품 및 시제품 처리 후 상승하였으며 bead 2, 5% 시험구 pH가 7.5, 7.6으로 가장 높았음
- 반면 타사 퇴비 2% 시험구의 pH는 5.0으로 대조구와 동일하였으며 타사 퇴비 5% 시험구는 5.9로 시제품을 처리한 시험구보다 낮았음
- 토양 pH의 상승은 토양 중 양이온성 중금속의 이동성을 낮추어 지하수 및 식물 체로의 이동을 저감할 수 있음
- 토양 중 유기물 함량은 타사제품 및 시제품 처리 후 상승하였으며 시제품 powder 2, 5% 시험구의 유기물함량이 1.70, 2.82%로 동일 처리량 간에 가장 높았음
- 토양 중 유효태 중금속 함량은 시제품 처리 후 감소하여 토양 중 중금속의 이동이 저감된 것을 확인 할 수 있었음
- 유효태 Cd 농도는 powder 5% 시험구에서 0.54mg/kg(저감률 89.8%)으로 가장 낮게 측정되었으며 pellet 2% 시험구에서 4.54mg/kg(저감률 14.3%)으로 대조구를 제외한 시험구 중 가장 높았음
- 유효태 Cu 농도는 powder 5% 시험구에서 0.54mg/kg(저감률 96.0%)으로 가장 낮

았으며 pellet 5% 시험구에서 34.0mg/kg(저감률 77.3%)으로 대조구를 제외하고 가장 높았음

- 유효태 Ni은 다른 중금속 원소들 보다 저감률이 낮았으며 가장 저감효과가 없었던 시험구는 타사 퇴비 2%로 대조구대비 26.7% 저감되었음
- 반면 유효태 Pb는 가장 저감효과가 좋았으며 모든 5% 처리 시험구에서 불검출 되었으며 powder 2% 시험구에서는 99.5%까지 저감되었음
- 유효태 Zn은 pellet 5%, bead 5% 시험구에서 저감 효과가 좋았으며 각각 24.2 (저감률 94.6%), 25.4mg/kg(저감률 94.4%) 검출되었음

표 95. 토양 화학성 및 토양 중 유효태 중금속 함량

	pH	유기물 %	NH ₄ NO ₃ extract heavy metal					CEC cmol/kg
			Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
	-	%	mg/kg					
대조구	5.0	0.03	5.3	149.4	159.8	229.1	449.6	5.11
타사 퇴비 2%	5.0	1.57	2.46	14.1	117.1	2.3	265.9	6.31
타사 퇴비 5%	5.9	2.59	0.65	6.5	69.8	*n.d.	77.9	6.32
powder 2%	6.5	1.70	2.42	12.9	102.4	1.1	228.9	5.71
powder 5%	6.2	2.82	0.54	6.0	47.8	n.d.	55.1	6.24
pellet 2%	6.8	1.43	4.54	21.6	100.4	5.7	275.5	5.32
pellet 5%	6.4	2.89	1.52	34.0	25.7	n.d.	24.2	5.37
bead 2%	7.5	1.00	2.63	13.8	96.2	3.1	201.6	5.41
bead 5%	7.6	2.28	0.88	10.7	32.8	n.d.	25.4	5.31

*n.d.: not detected

표 96. 대조구 대비 시험구별 유효태 중금속 저감량

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
	%				
타사 퇴비 2%	53.6	90.6	26.7	99.0	40.9
타사 퇴비 5%	87.7	95.7	56.3	100.0	82.7
powder 2%	54.3	91.4	35.9	99.5	49.1
powder 5%	89.8	96.0	70.1	100.0	87.7
pellet 2%	14.3	85.5	37.2	97.5	38.7
pellet 5%	71.3	77.3	83.9	100.0	94.6
bead 2%	50.4	90.8	39.8	98.6	55.2
bead 5%	83.4	92.8	79.5	100.0	94.4

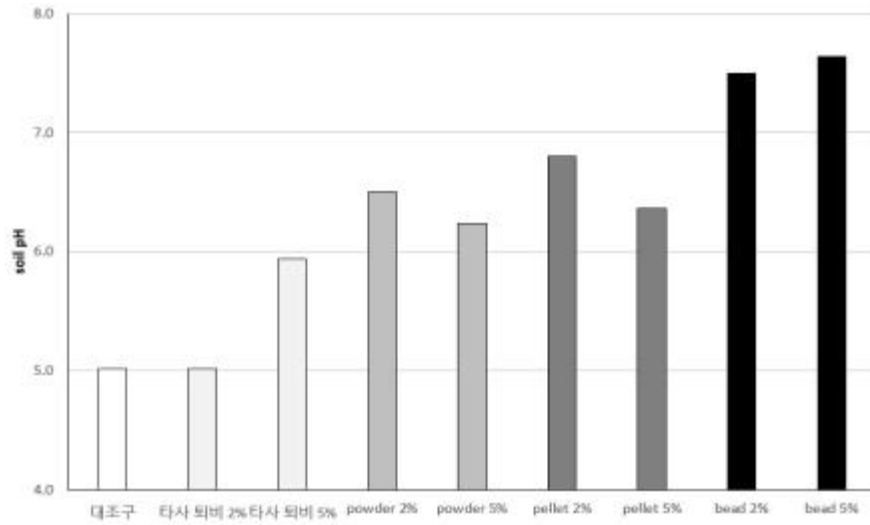


그림 94. 시험구별 토양 pH

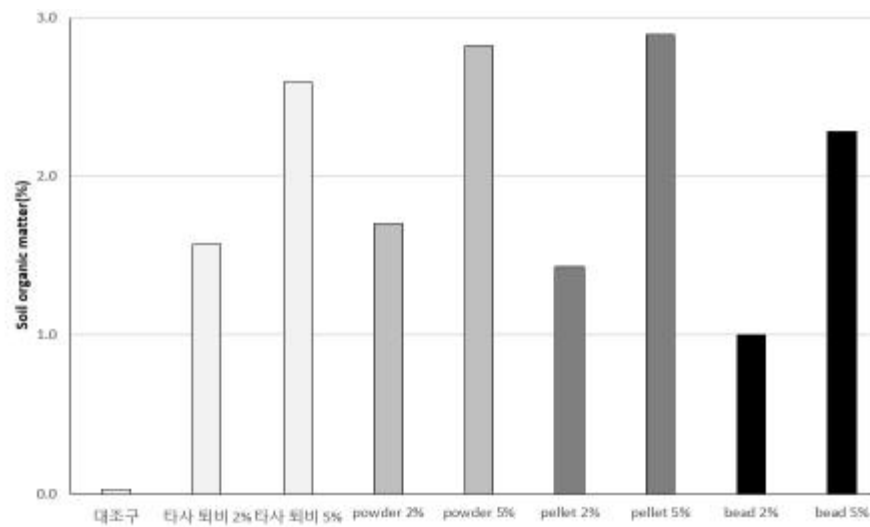


그림 95. 시험구별 토양 유기물 함량

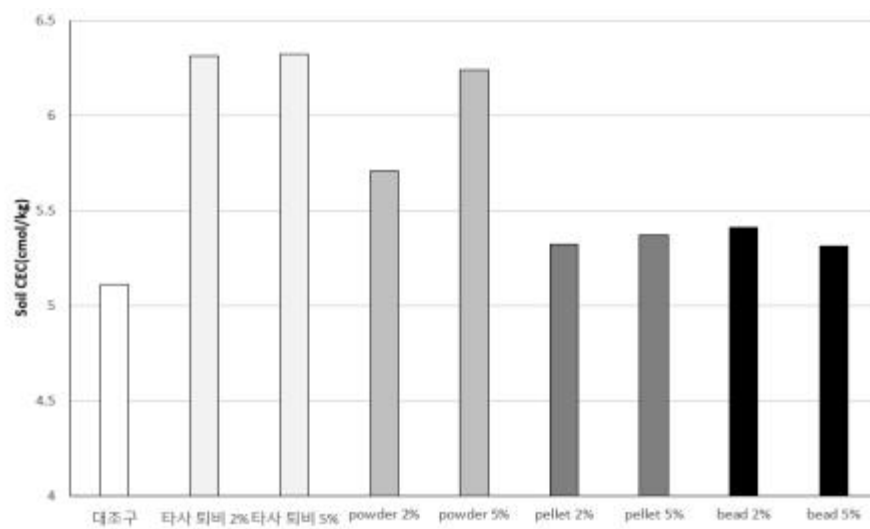


그림 96. 시험구별 토양 CEC

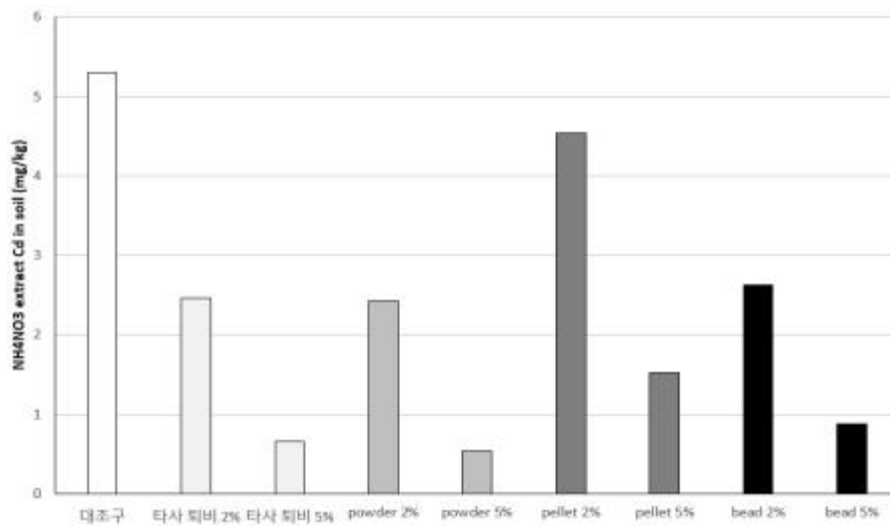


그림 97. 시험구별 토양 중 유효태 Cd 함량

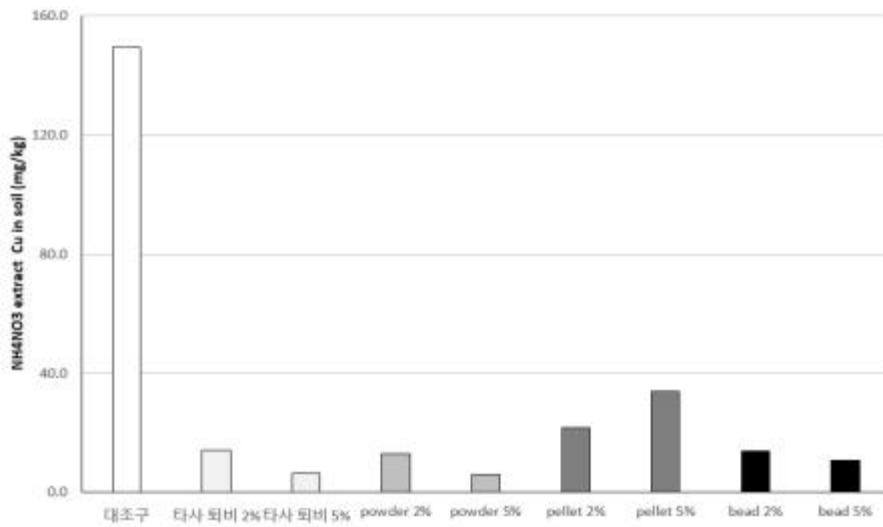


그림 98. 시험구별 토양 중 유효태 Cu 함량

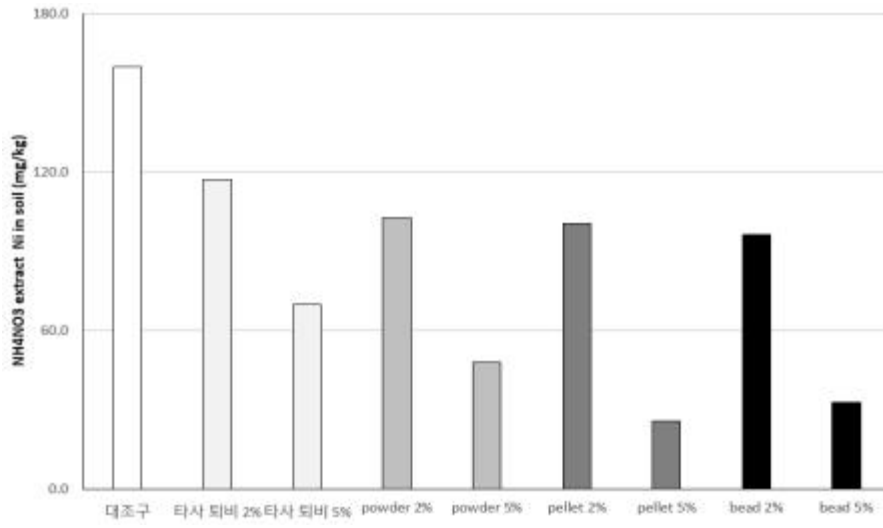


그림 99. 시험구별 토양 중 유효태 Ni 함량

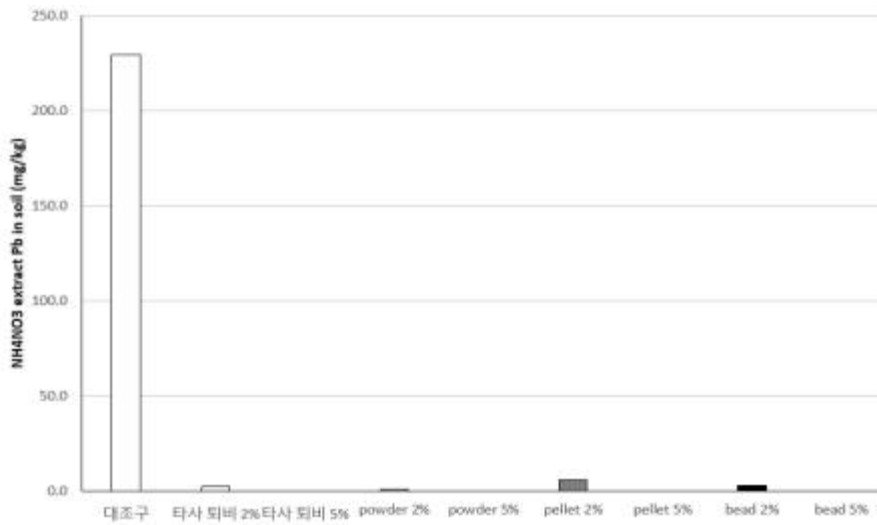


그림 100. 시험구별 토양 중 유효태 Pb 함량

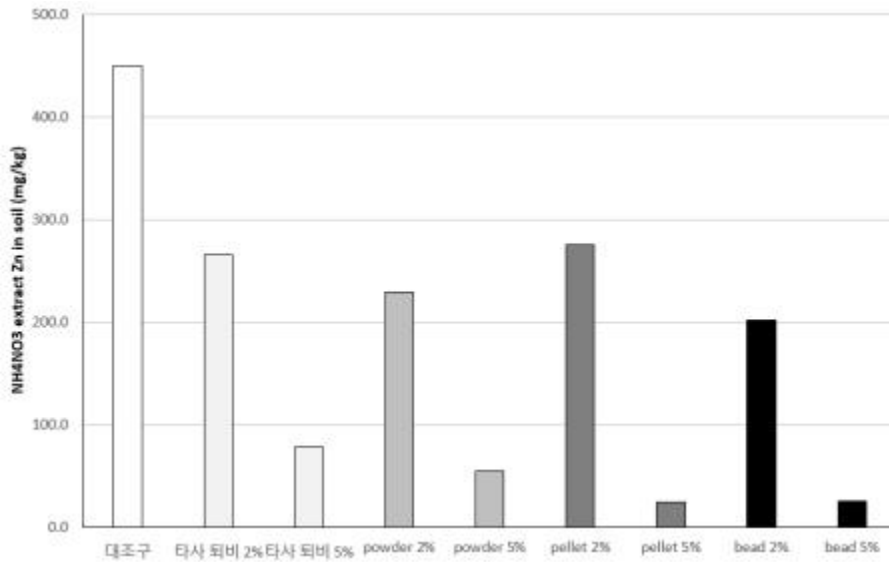


그림 101. 시험구별 토양 중 유효태 Zn 함량

파. 바이오숯 시제품 2차 평가(Lab Scale)

1. 바이오숯 시용 온실 재배 실험

1) 개요

- 2연차에 실험결과를 바탕으로 개량된 시제품 2종에 대한 작물 생육 평가를 수행함

2) 재료 및 방법

- 장소: 충남대학교 농업생명과학대학 온실
- 작물: 가지(PPS흑미인가지), 방울토마토(원홍5호), 고추(슈퍼마니파), 부추(슈퍼그린벨트), 상추(홍빛적치마), 배추(대통)
- 실험 기간: 2018.04. ~ 2018.07.
- 바이오차 성상: 분말, 펠릿(포이엔 제공)
- 바이오차 처리조건: 제형별 각각 0%(무처리), 0%(N-P-K), 2%, 2% + N-P-K(w/w)
 - ①전년도 바이오숯에 대한 작물 생육 평가 시 바이오숯 처리비율 2%에서 높은 생육을 보였음
 - ②바이오숯 유기질 비료 생산 및 제조를 위해 바이오숯 처리구와 바이오숯+NPK처리구를 분리하여 실험 실시
- 시비량: 농촌진흥청 작물별 표준시비량에 따라 시비
- 작물 재배 배지: 토양(참그로 제공)
- 실험 작물: 작물의 선정조건은 시설재배 채소분류별, 국내 소비량과 재배면적 비율,

작물별 CO₂ 방출량, 농업부산물 배출량 등을 고려하여 6개 작물을 선정

표 97. 작물 후보군의 재배 특성

분류	작물	최적 토양 조건			표준시비량 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) kg 10a ⁻¹
		pH	토성	유기물 g kg ⁻¹	
과채류	가지	6.0~6.5	사양토~식양토	20~30	19.3-8.7-11.2
	방울토마토	6.0~6.5	미사질식양토	25~35	22.6-10.6-11.9
조미채소	고추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	19.0-6.4-10.1
	부추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	24.3-3.0-8.3
엽채류	상추	6.5~7.0	사양토~식양토	20~30	7.0-3.0-3.6
	배추	6.0~6.5	사양토~식양토	25~35	17.8-3.0-7.3

※ 출처: 작물별 시비처방기준(농촌진흥청 국립농업과학원)

표 98. 작물별 파종 및 육묘기간

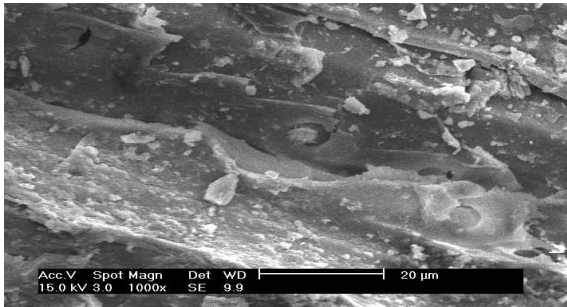
작물	품종	제조사	이식일	생육조사	육묘기간	평균 육묘기간
가지	흑원경	피피에스	2018.02.20	2018.04.30	2018.06.21	80일
방울토마토	원홍 5호	다농	2018.03.02	2018.04.30	2018.06.21	70일
고추	슈퍼마니따	농우바이오	2018.02.20	2018.04.30	2018.06.21	90일
부추	슈퍼그린벨트	아시아 종묘	2018.02.20	2018.04.30	2018.06.21	80일
상추	홍빛 5호	다농	2018.03.30	2018.04.30	2018.06.21	30일
배추	대통	농우바이오	2018.03.30	2018.06.28	2018.07.23	60일

표 99. 제형별 바이오차의 제조 배합 비율

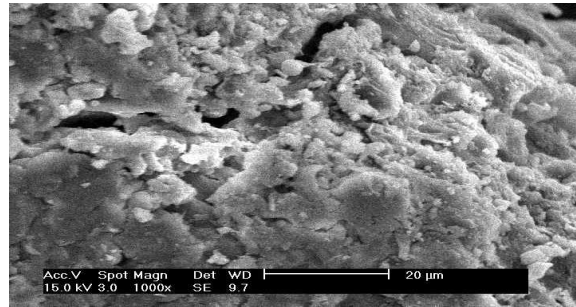
	Oak biochar	Coffee sludge	Castor pomace	Rice bran	Livestock manure
	----- %(v/v) -----				
Powder	20	-	-	-	80
Pellet	30	10	50	10	-



그림 102. 제형별 바이오차 제조기기



Powder biochar



Pellet biochar

그림 102. 전자현미경(SEM)을 이용해 촬영한 제형별 바이오차

3) 재배실험 전 토양 및 제형별 바이오차의 기초분석 결과

- 재배 실험용 토양의 pH는 6.4로 약산성을 띠었음
- EC는 0.16 ds m^{-1} 였으며, 토양 내 유기물 함량은 0.11%로 조사됨
- 분말 및 펠릿 바이오차의 pH는 각각 7.2와 7.4로 조사됨
- 바이오차 각각의 탄소함량은 $392.0, 504.0 \text{ g kg}^{-1}$ 이었으며, 유기물함량은 67.5, 86.8 %로 조사됨

표 100. 실험 토양 기초분석

Sample	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation (cmolc kg ⁻¹)		
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Soil	6.4±0.0	0.16±0.01	12.3±1.04	0.7±0.1	0.6±0.0	0.11	1.15	0.18±0.02	6.6±0.3	11.0±0.5	0.21±0.05

표 101. 바이오차의 기초분석

Sample	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ₂ O	CaO	MgO (%)	Na ₂ O
				T-C	T-N						
Powder	7.2±0.0	32.1±2.4	190.0±7.0	392.0±50.0	27.0±1.0	67.5	14.5	0.16±0.00	0.35±0.05	0.11±0.00	0.01±0.00
Pellet	7.4±0.0	11.4±0.4	90±5.0	504.0±9.0	52.0±3.0	86.8	9.6	0.28±0.04	0.65±0.22	0.29±0.01	0.06±0.04

- 바이오숯을 처리하여 재배한 가지의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 가지 작물 높이, 경직경, 지상부 생체중은 펠릿 바이오숯 2%+NPK처리구에서 가장 높았음
- 가지 열매 개수, 열매 총 무게, 열매 길이 및 직경은 분말 바이오숯 2%+NPK처리구에서 가장 높았음
- 바이오숯 단독 처리구에 비해 바이오차 + NPK처리구가 더 좋은 작물 생육이 좋아지는 경향을 보임
- 재배 후 토양 분석 결과, 바이오숯 처리 후 토양 pH, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation은 증가하는 경향을 보임
- 전년도 바이오숯의 배합에서 석고를 제거하여 EC는 작물재배 최적 조건인 2.0이하를 만족함

표 102. 바이오차 제형 및 함량에 따른 가지 생육 특성(아래계속)

Treatment	Height (cm)	Stem diameter (cm)	Fresh Weight		Chlorophyll (SPAD)	
			Shoot	Root		
Control	33.1±1.1a	0.71±0.08a	27.3±2.7a	15.8±3.6ab	37.9±4.5a	
N-P-K	56.6±3.6c	0.76±0.11a	103.2±9.4cd	23.7±5.8bc	48.1±6.6ab	
Powder	2%	42.3±4.0ab	0.79±0.09a	44.1±9.6a	27.7±5.6cd	43.0±4.6a
	2% + N-P-K	54.0±5.2c	0.87±0.09ab	109.5±10.5cd	37.1±6.1d	63.6±4.5c
Pellet	2%	50.0±17.3bc	0.84±0.25ab	77.3±42.7bc	10.2±9.5a	39.5±0.2ab
	2% + N-P-K	58.3±2.0c	1.02±0.09b	117.2±22.9d	12.8±2.9a	53.6±8.1ab

표 103. 바이오차 제형 및 함량에 따른 가지 생육 특성

Treatment	Number of fruits (per plant)	Total fruit weight (g)	Length (cm)	Diameter (cm)	Sweetness (Brix)	
						Control
N-P-K	1.2±0.5c	82.5±33.9b	17.0±4.0c	3.6±0.3cd	3.2±0.2b	
Powder	2%	1.0±0.0ab	44.9±30.0a	14.0±2.6abc	3.6±0.2cd	2.8±0.3ab
	2% + N-P-K	2.0±0.0d	102.7±26.2b	15.4±3.3bc	4.2±0.9d	2.4±0.8ab
Pellet	2%	0.3±0.4a	26.69±0.0a	11.80±0.0ab	2.6±0.0b	5.1±0.0c
	2% + N-P-K	0.3±0.4a	13.89±0.0a	10.10±0.0a	1.9±0.0a	3.2±0.0ab

표 104. 가지 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
										cmolc kg ⁻¹		
Control	6.4±0.3	0.22±0.14	32.3±1.2	0.5±0.1	0.4±0.1	0.09	1.21	0.07±0.01	5.9±0.1	2.2±0.2	0.08±0.02	
N-P-K	6.0±0.2	0.23±0.03	33.6±1.6	0.5±0.1	0.5±0.0	0.09	1.11	0.09±0.03	6.3±0.4	2.2±0.1	0.16±0.16	
Powder	2%	7.8±0.1	273.8±7.3	4.0±1.3	0.5±0.2	0.70	7.80	0.08±0.03	8.7±1.2	2.9±0.1	0.50±0.20	
	2% + N-P-K	7.6±0.0	298.0±23.7	3.9±0.5	0.7±0.2	0.67	5.52	0.08±0.03	8.8±0.2	3.0±0.2	0.62±0.34	
Pellet	2%	7.1±0.1	89.8±59.1	6.5±0.7	0.9±0.0	1.12	7.57	0.11±0.05	8.6±0.6	2.7±0.0	4.26±3.37	
	2% + N-P-K	6.8±0.2	1.08±0.15	128.4±1.6	6.0±.07	0.9±0.0	1.03	6.53	0.14±0.04	8.9±1.5	2.7±0.2	0.25±0.12



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 103. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지의 생육



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 104. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 가지 열매의 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 방울토마토의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 방울토마토 생체중, 엽록소함량, 총 열매수, 총열매 무게가 분말 바이오숯 2%+NPK처리구에서 가장 높았음
- 바이오숯 단독 처리구에 비해 바이오차 + NPK처리구가 더 좋은 작물 생육이 좋아지는 경향을 보임
- 재배 후 토양 분석 결과, 바이오숯 처리 후 토양 pH, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation은 증가하는 경향을 보임
- 전년도 바이오숯의 배합에서 석고를 제거하여 EC는 작물재배 최적 조건인 2.0 이하를 만족함

표 105. 바이오차 제형 및 함량에 따른 방울토마토 생육 특성(아래계속)

Treatment	Height (cm)	Stem diameter	Fresh Weight		Chlorophyll (SPAD)	
			Shoot	Root		
Control	64.0±11.0a	0.93±0.0a	44.2±10.0a	10.6±3.4a	26.5±9.7a	
N-P-K	105.8±21.3b	0.93±0.0a	142.4±58.3b	13.1±6.0a	57.1±20.4b	
Powder	2%	111.6±12.7b	0.93±0.0a	155.2±35.2b	23.2±6.34b	44.2±6.5ab
	2% + N-P-K	100.0±3.6b	0.93±0.0a	276.4±30.9c	28.7±11.5b	59.3±12.4b
Pellet	2%	115.3±41.2b	0.93±0.0a	235.7±46.7b	5.9±3.5a	46.9±7.4ab
	2% + N-P-K	117.0±6.2b	0.93±0.0a	183.9±34.0b	8.5±3.4a	51.0±5.8b

표 106. 바이오차 제형 및 함량에 따른 방울토마토 생육 특성

Treatment	Number of fruits (per plant)	Total fruit weight (g)	Length (cm)	Diameter	Sweetness (Brix)	
						Control
N-P-K	35.5±21.9c	114.9±83.1a	1.9±0.3a	1.9±0.3a	5.5±0.6a	
powder	2%	27.3±10.9bc	84.9±47.1a	1.8±0.4a	2.1±0.2a	5.6±0.7a
	2% + N-P-K	49.3±32.3d	276.4±30.9b	2.0±0.2a	2.1±0.2a	4.9±0.8a
Pellet	2%	16±9.8abc	62.6±30.1a	2.0±0.3a	2.2±0.2a	5.0±0.8a
	2% + N-P-K	5.6±0.5a	76.4±72.0a	1.8±0.1a	1.9±0.1a	4.0±0.5a

표 107. 방울토마토 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation		Na ⁺	
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺ cmolc kg ⁻¹		
Control	6.7±0.2	0.14±0.04	32.3±4.9	0.6±0.0	0.4±0.0	0.11	1.38	0.10±0.02	5.3±0.2	2.1±0.1	0.22±0.04	
N-P-K	6.3±0.1	0.15±0.02	31.5±4.5	0.5±0.0	0.4±0.1	0.09	1.30	0.14±0.09	5.7±0.7	2.3±0.1	0.27±0.06	
Powder	2%	7.6±0.1	0.62±0.11	271.0±44.3	3.1±0.1	0.7±0.0	0.53	4.68	0.08±0.01	6.5±0.3	2.7±0.1	0.29±0.06
	2% + N-P-K	7.7±0.1	0.66±0.09	249.0±22.6	4.6±0.8	0.7±0.1	0.79	6.56	0.09±0.01	7.1±0.4	3.0±0.2	0.38±0.12
Pellet	2%	7.2±0.4	0.81±0.14	97.2±9.4	5.0±0.1	0.9±0.0	0.87	5.52	0.12±0.06	5.2±0.5	2.2±0.1	0.16±0.12
	2% + N-P-K	7.1±0.1	1.02±0.13	132.3±14.5	5.5±2.1	0.9±0.1	0.95	6.12	0.16±0.06	6.5±0.6	2.4±0.1	0.27±0.04



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 105. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 방울토마토 생육



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 106. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 방울토마토 열매 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 고추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 고추 작물의 생육은 펠렛 바이오숯, 펠렛 바이오숯+NPK 처리구에서 높았음
- 고추 총 열매의 무게는 분말 바이오숯 2%+NPK처리구에서 가장 높았으며, 바이오숯 단독 처리구에 비해 NPK를 추가한 처리구에서 열매 무게가 높아지는 경향을 보임
- 재배 후 토양 분석 결과, 바이오숯 처리 후 토양 pH, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation이 증가하는 경향을 보임
- 전년도 바이오숯의 배합에서 석고를 제거하여 EC는 작물재배 최적 조건인 2.0 이하를 만족함

표 108. 바이오차 제형 및 함량에 따른 고추 생육 특성(아래계속)

Treatment	Height (cm)	Stem diameter	Fresh Weight		Chlorophyll (SPAD)	
			Shoot	Root		
Control	49.6±5.5a	0.89±0.07a	21.9±2.6a	14.8±3.2b	33.8±4.5a	
N-P-K	59.3±12.7ab	0.80±0.13a	42.2±15.2ab	11.9±3.4ab	69.0±11.1b	
Powder	2%	68.3±21.3ab	0.89±0.07a	40.4±4.4ab	14.5±0.6ab	56.0±6.2b
	2% + N-P-K	55.3±3.7ab	0.87±0.07a	70.5±26.4b	12.2±1.3ab	66.9±4.8b
Pellet	2%	71.9±17.2ab	0.82±0.00a	76.0±33.1b	11.9±5.5ab	64.3±13.0b
	2% + N-P-K	75.0±19.2b	0.78±0.05a	71.6±42.2b	8.6±3.8a	67.2±1.9b

표 109. 바이오차 제형 및 함량에 따른 고추 생육 특성

Treatment	Number of fruits (per plant)	Total fruit weight (g)	Length (cm)	Diameter	Sweetness (Brix)	
						Control
N-P-K	6.2±1.5b	63.0±10.1b	10.1±1.3a	1.5±0.1a	4.0±0.5a	
powder	2%	7.6±0.5bc	70.5±16.4b	9.1±0.5a	1.6±0.1a	3.8±0.9a
	2% + N-P-K	9.0±3.0cd	81.6±10.0c	8.7±3.1a	1.4±0.3a	4.1±1.0a
Pellet	2%	11.0±2.8d	31.3±1.9a	9.8±2.6a	1.4±0.3a	4.3±0.4a
	2% + N-P-K	7.0±1.4bc	62.2±10.2b	8.8±1.3a	1.5±0.0a	3.7±1.5a

표 110. 고추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Element content (g kg ⁻¹)		OM (%)	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation		Na ⁺	
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺ (cmolc kg ⁻¹)		
Control	6.5±0.1	0.21±0.04	28.7±1.6	0.6±0.1	0.4±0.0	0.10	1.39	0.08±0.02	6.2±0.5	2.2±0.2	0.17±0.11	
N-P-K	6.2±0.2	0.37±0.07	29.0±2.1	0.5±0.0	0.5±0.1	0.09	1.14	0.08±0.00	6.3±0.7	2.1±0.1	0.21±0.20	
Powder	2%	7.8±0.1	0.80±0.11	270.4±34.1	3.2±0.0	0.6±0.0	0.55	5.78	0.04±0.02	8.2±0.9	2.9±0.3	0.21±0.02
	2% + N-P-K	7.7±0.0	0.87±0.08	302.9±62.8	3.9±1.1	0.7±0.1	0.68	5.65	0.09±0.00	8.5±0.6	3.0±0.1	0.30±0.05
Pellet	2%	7.6±0.2	1.08±0.16	117.4±26.2	5.6±1.9	0.8±0.1	0.97	6.73	0.09±0.03	7.4±0.2	2.7±0.2	0.14±0.03
	2% + N-P-K	7.4±0.1	1.50±0.07	128.9±5.8	5.1±1.6	1.0±0.1	0.88	5.36	0.10±0.03	7.6±0.2	2.6±0.1	0.15±0.03



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 107. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 고추 생육



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 108. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 고추 열매 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 부추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 부추 지상부 및 지하부 생체중, 총 엽수, 엽장, 엽폭, 엽당 무게, 엽록소 함량은 분말 바이오숯 2%+NPK 처리구에서 가장 높았음
- 분말 바이오숯은 NPK 추가 처리구에서 생육이 더 좋아지는 결과를 보였지만, 펠렛 처리구는 NPK 추가 시 생육이 불량해짐
- 재배 후 토양 분석 결과, 바이오숯 처리 후 토양 pH, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation이 증가하는 경향을 보임
- 전년도 바이오숯의 배합에서 석고를 제거하여 EC는 작물재배 최적 조건인 2.0 이하를 만족함

표 111. 바이오차 제형 및 함량에 따른 부추 생육 특성

Treatment	Fresh Weight		Leaf length	Leaf width	Number of leaves	Weight per leaf	Sweetness	Chlorophyll	
	Shoot	Root							
	(g)		(cm)		(per plant)	(g/ea)	(Brix)	(SPAD)	
Control	8.7±2.2a	10.7±3.0b	24.9±2.3b	0.16±0.05a	118.5±18.1a	0.07±0.01a	2.9±0.5a	11.2±2.8a	
N-P-K	9.6±3.2a	6.4±2.6a	21.0±3.2a	0.18±0.04a	126.1±27.9a	0.07±0.01a	3.9±0.7a	12.9±3.9a	
Powder	2%	11.0±0.6a	11.2±2.3b	26.1±1.1b	0.16±0.04a	119.0±6.5a	0.09±0.01a	2.8±0.7a	26.8±4.0b
	2% + N-P-K	26.1±0.5c	17.9±0.5c	32.5±2.1c	0.23±0.05a	152.6±19.5c	0.17±0.02c	3.2±0.5a	50.1±1.4c
Pellet	2%	22.0±2.4b	13.1±0.9b	30.3±1.5c	0.23±0.05a	153.3±8.3ab	0.14±0.01b	3.0±0.3a	46.2±9.7c
	2% + N-P-K	11.3±3.3a	5.7±1.9a	26.6±1.3b	0.20±0.00a	125.0±18.7ab	0.09±0.02a	3.8±0.6a	42.6±8.1c

표 112. 부추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH	EC	Avail. P ₂ O ₅	Element content		OM	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
	(1:5)	(ds m ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(%)		(cmolc kg ⁻¹)				
Control	6.5±0.2	0.15±0.04	34.2±3.4	0.5±0.1	0.3±0.1	0.09	1.61	0.08±0.01	5.9±0.3	2.1±0.1	0.07±0.02	
N-P-K	6.0±0.2	0.48±0.00	34.2±1.7	0.9±0.7	0.7±0.2	0.15	1.35	0.11±0.01	6.0±0.1	2.2±0.0	0.08±0.00	
Powder	2%	8.2±0.1	0.50±0.07	272.2±25.4	3.5±0.9	0.5±0.0	0.60	6.57	0.06±0.01	7.2±0.1	2.5±0.0	0.17±0.07
	2% + N-P-K	8.0±0.1	0.87±0.13	325.0±22.8	3.9±0.3	0.7±0.0	0.67	5.80	0.08±0.02	8.1±0.7	2.8±0.3	0.19±0.04
Pellet	2%	7.6±0.1	1.18±0.21	174.2±35.0	6.0±1.4	0.9±0.0	1.03	6.77	0.12±0.02	7.2±0.5	2.5±0.0	0.05±0.01
	2% + N-P-K	7.6±0.1	1.45±0.39	143.7±15.8	6.3±0.4	0.9±0.2	1.08	6.58	0.16±0.01	6.1±0.1	2.3±0.1	0.39±0.03



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K

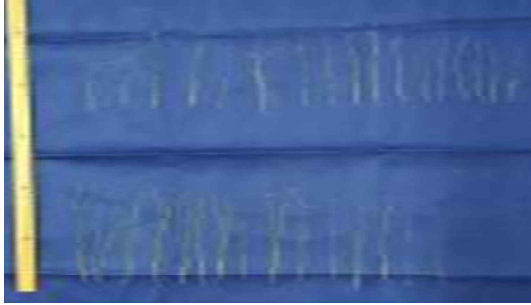


Pellet biochar 2%

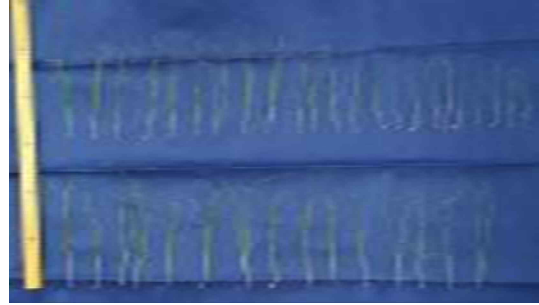


Pellet biochar 2% + N-P-K

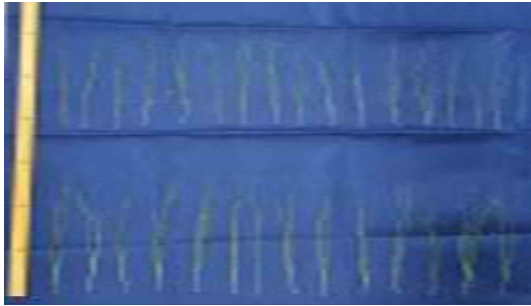
그림 109. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 부추 생육



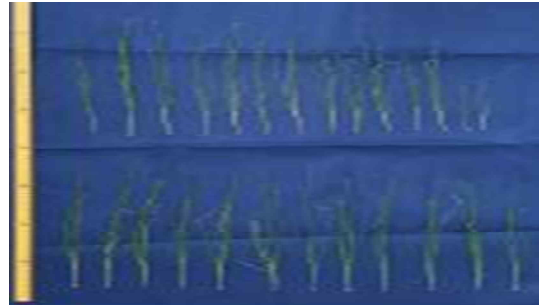
Control(Biochar 0%)



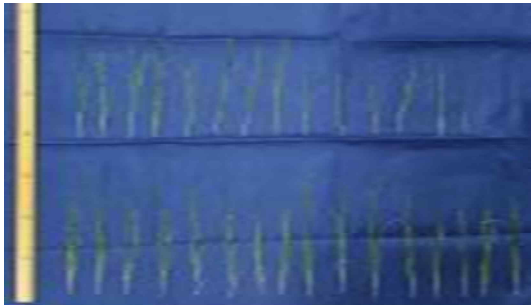
N-P-K



Bead biochar 2%



Bead biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 110. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 부추 지상부 생육

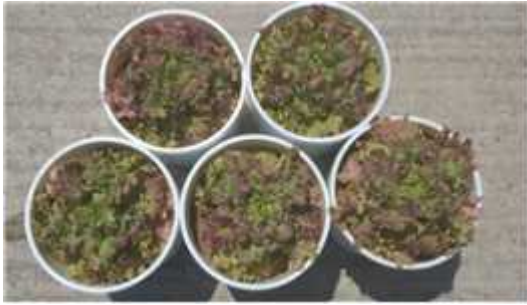
- 바이오숯을 처리하여 재배한 상추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 상추 지상부 및 지하부 생체중, 총 엽수, 엽장, 엽폭, 엽당 무게가 분말 바이오숯 2%+NPK 처리구에서 가장 높았음
- 분말 바이오숯 처리구는 NPK를 추가한 처리구에서 생육이 더 좋아지는 결과를 보였지만, 펠렛 바이오숯 처리구는 NPK 추가 시 유의적인 차이는 없음
- 재배 후 토양 분석 결과, 바이오숯 처리 후 토양 pH, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation은 증가하는 경향을 보임
- 전년도 바이오숯의 배합에서 석고를 제거하여 EC는 작물재배 최적 조건인 2.0 이하를 만족

표 113. 바이오차 제형 및 함량에 따른 상추 생육 특성

Treatment	Fresh Weight		Leaf length	Leaf width	Number of leaves	Weight per leaf	Sweetness	Chlorophyll	
	Shoot	Root							
	(g)		(cm)		(per plant)	(g/ea)	(Brix)	(SPAD)	
Control	73.1±2.5a	12.5±0.8b	14.3±0.5a	14.7±0.7a	18.4±1.9a	4.0±0.5a	4.8±0.1c	17.3±4.8a	
N-P-K	119.8±39.0b	14.9±4.0b	15.1±1.2ab	15.2±1.5a	19.6±3.5ab	6.0±1.5bc	3.7±0.6b	27.4±6.1b	
Powder	2%	135.2±35.4bc	15.2±2.9b	15.8±0.7b	16.4±1.1ab	26.0±4.7cd	5.1±0.8ab	2.9±0.1a	18.8±0.9a
	2% + N-P-K	195.0±16.1d	15.7±1.4b	18.3±0.8c	19.6±1.6c	29.2±1.3d	6.6±0.2c	4.0±0.2b	22.7±1.4ab
Pellet	2%	160.7±24.5c	7.4±1.5a	15.4±1.4ab	17.2±1.1b	22.6±1.5bc	6.6±1.5c	3.1±0.2a	22.6±4.8ab
	2% + N-P-K	163.7±13.2cd	7.5±0.8a	15.2±0.4ab	17.1±1.0b	27.6±1.5d	5.9±0.5bc	3.6±0.7b	26.0±3.7b

표 114. 상추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH	EC	Avail. P ₂ O ₅	Element content		OM	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
	(1:5)	(ds m ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(%)		(cmolc kg ⁻¹)				
Control	6.2±0.2	0.17±0.03	35.61±0.6	0.5±0.1	0.4±0.0	0.08	1.36	0.10±0.02	6.4±0.4	2.3±0.1	0.13±0.04	
N-P-K	6.3±0.1	0.17±0.02	32.71±1.5	0.6±0.0	0.4±0.0	0.10	1.40	0.09±0.05	6.1±0.1	2.3±0.1	0.18±0.06	
Powder	2%	7.7±0.1	0.90±0.10	281.0±17.1	4.5±0.5	0.6±0.1	0.77	6.90	0.10±0.02	7.5±0.2	2.8±0.1	0.31±0.06
	2% + N-P-K	7.7±0.0	0.80±0.00	284.5±17.5	4.3±0.9	0.6±0.1	0.74	7.06	0.14±0.04	8.0±0.2	2.9±0.1	0.47±0.11
Pellet	2%	7.5±0.1	1.50±0.10	144.7±43.1	4.1±0.2	0.9±0.2	0.71	4.50	0.16±0.01	7.1±0.7	2.7±0.1	0.22±0.12
	2% + N-P-K	7.3±0.1	1.67±0.02	147.2±23.5	5.5±1.5	1.0±0.0	0.95	5.64	0.15±0.03	7.2±0.4	2.7±0.1	0.13±0.09



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 111. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 상추 생육



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 112. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 상추 지상부 생육

- 바이오숯을 처리하여 재배한 배추의 생육 조사 결과는 아래와 같음
- 배추 지상부 생체중, 지하부 생체중, 엽장, 엽폭, 엽당 무게가 분말 바이오숯 2% + NPK처리구에서 가장 높았음
- 분말 바이오숯 처리구는 NPK를 추가한 처리구에서 생육이 더 좋아지는 결과를 보였지만, 펠렛 바이오숯 처리구는 NPK 추가 시 유의적인 차이는 없음
- 재배 후 토양 분석 결과, 바이오숯 처리 후 토양 pH, EC, 유효인산, T-C, T-N, OM, Ex. cation은 증가하는 경향을 보임
- 전년도 바이오숯의 배합에서 석고를 제거하여 EC는 작물재배 최적 조건인 2.0 이하를 만족

표 115. 바이오차 제형 및 함량에 따른 배추 생육 특성

Treatment	Fresh Weight		Leaf length	Leaf width	Number of leaves	Weight per leaf	Sweetness	Chlorophyll	
	Shoot	Root							
	(g)		(cm)		(per plant)	(g/ea)	(Brix)	(SPAD)	
Control	6.6±1.6a	3.3±1.6a	8.0±0.1a	4.9±0.2a	4.3±1.5a	1.7±1.0a	8.7±2.1c	57.6±4.9a	
N-P-K	128.9±51.4bc	15.6±5.5b	24.5±2.3c	14.8±1.5d	19.7±6.8d	6.4±0.9b	5.5±2.1ab	60.0±13.5ab	
Powder	2%	80.8±22.9b	13.4±2.1b	20.9±2.7b	12.4±0.5bc	15.6±2.5cd	5.2±1.3b	7.7±2.6bc	75.9±17.6b
	2% + N-P-K	226.3±51.2c	17.6±5.5b	31.9±1.4d	20.0±0.5e	18.4±2.8d	12.2±1.1c	4.1±0.3a	66.4±11.4ab
Pellet	2%	61.5±14.0b	6.8±0.8a	13.8±1.7b	13.3±1.1c	12.0±2.1bc	5.1±0.7b	4.8±1.3a	56.5±9.4a
	2% + N-P-K	37.2±15.5ab	7.7±3.3a	18.7±2.1b	11.4±1.3b	7.6±3.2ab	5.0±1.4b	5.7±1.1ab	68.7±7.4ab

표 116. 배추 재배 후 토양 분석

Treatment	pH	EC	Avail. P ₂ O ₅	Element content		OM	C/N ratio	K ⁺	Ex. cation			
				T-C	T-N				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
	(1:5)	(ds m ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(%)		(cmolc kg ⁻¹)				
Control	6.1±0.1	0.08±0.01	24.4±1.1	0.4±0.1	0.5±0.0	0.08	0.96	0.20±0.10	6.0±0.2	1.9±0.1	0.43±0.15	
N-P-K	5.3±0.1	0.37±0.12	25.1±3.2	0.5±0.1	0.5±0.0	0.09	1.01	0.18±0.05	6.6±1.0	1.9±0.1	0.39±0.20	
Powder	2%	7.5±0.1	347.9±65.6	4.0±2.8	0.8±0.2	0.69	5.18	0.18±0.09	6.8±0.4	2.5±0.1	0.45±0.14	
	2% + N-P-K	7.3±0.2	0.45±0.12	311.4±31.4	4.4±2.9	0.9±0.1	0.76	4.87	0.16±0.04	6.4±0.3	2.2±0.1	0.33±0.08
Pellet	2%	6.8±0.1	0.72±0.22	124.0±29.3	6.6±3.2	1.0±0.0	1.14	6.95	0.17±0.10	5.9±0.3	2.0±0.1	0.28±0.30
	2% + N-P-K	6.8±0.1	0.92±0.25	110.7±28.2	6.3±0.6	1.0±0.0	1.09	6.38	0.18±0.02	6.1±0.60	2.1±0.2	0.35±0.47



Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder Biochar 2%



Powder Biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%

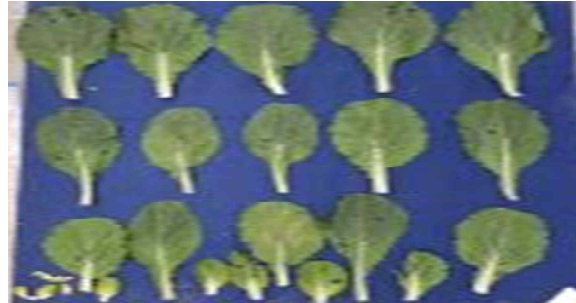


Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 113. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 배추 생육



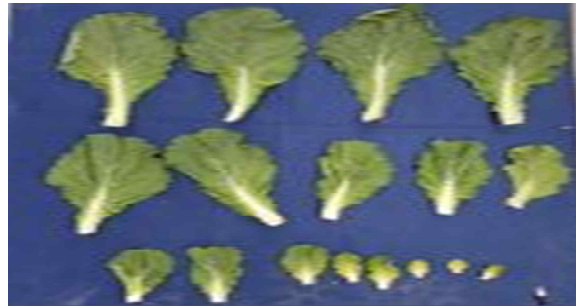
Control(Biochar 0%)



N-P-K



Powder biochar 2%



Powder biochar 2% + N-P-K



Pellet biochar 2%



Pellet biochar 2% + N-P-K

그림 114. 바이오숯 제형 및 함량에 따른 배추 지상부 생육

4) 6개 작물 온실 재배 실험 결론

- 분말, 펠렛 바이오숯 제형을 이용한 작물 재배 실험
- 작물에 따라 최적의 제형 및 처리 함량은 같은 것으로 판단됨
 - 6개 작물 전체적으로 분말 바이오숯 2% + NPK 처리구에서 좋은 생육을 보임
- 분말 바이오숯 토양 처리 시 NPK를 첨가하여 처리하는 것이 작물에 좋은 영향을 줄 수 있을 것으로 판단됨
- 분말 바이오숯 제조 시 가축분퇴비의 혼합으로 인하여 작물의 생육이 좋은 것으로 판단됨
- 전년도 실험 결과 EC의 과도한 증가는 석고에 의한 것으로 판단되며, 이번 실험용 바이오 숯은 석고가 혼합되지 않아 작물생육 최적 EC인 2.0dS/m이하를 만족함

하. 시제품 현장실증(3차)

1. 현장실증준비

- 2연차 실험결과를 바탕으로 개선된 바이오숯 기반 시제품 2종의 현장 실증을 진행함
 - 1) 재료 및 방법
 - 실험 농가는 지난 1, 2연차 현장실증 실험에 사용했던 충남 청양군 대치면에 위치한 농장에서 진행함
 - 2차년도 실험의 영향을 줄이기 위하여 실험 종료 후 비닐온실의 비닐을 제거하여 약 6개월간 비를 맞춤
 - 시험에 사용한 시제품은 (주)포이엔에서 제작한 시제품 2종(pellet, powder)를 사용하였음
 - 시험구 구성은 별도의 처리가 없는 대조구 및 시제품 2종(pellet, powder)을 각각 토양 무게대비 2, 5% 처리하였음
 - 따라서 본 실험의 공시작물은 6종으로 고추, 상추, 배추, 토마토 가지, 양파이며 구체적인 시험구 조성은 아래와 같음



그림 115. (주)포이엔에서 제작한 시제품 2종(pellet, powder)

A. 고추

B. 상추

C. 배추

①기존 토양	대조구	①기존 토양	대조구	①기존 토양
②시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	②시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	②시제품 pellet 2% 처리
③시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③시제품 pellet 5% 처리
④시제품 powder 2% 처리	실험구3그룹	④시제품 powder 2% 처리	실험구3그룹	④시제품 powder 2% 처리
⑤시제품 powder 5% 처리	실험구4그룹	⑤시제품 powder 5% 처리	실험구4그룹	⑤시제품 powder 5% 처리

D. 토마토

E. 가지

F. 양파

①기존 토양	대조구	①기존 토양	대조구	①기존 토양
②시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	②시제품 pellet 2% 처리	실험구1그룹	②시제품 pellet 2% 처리
③시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③시제품 pellet 5% 처리	실험구2그룹	③시제품 pellet 5% 처리
④시제품 powder 2% 처리	실험구3그룹	④시제품 powder 2% 처리	실험구3그룹	④시제품 powder 2% 처리
⑤시제품 powder 5% 처리	실험구4그룹	⑤시제품 powder 5% 처리	실험구4그룹	⑤시제품 powder 5% 처리

- 온실 내부 모식도는 아래 모식도와 같으며 1 시험구당 6종의 작물을 각각 10개체씩 정식하였음(실제 작물은 1열로 정식함)

	고추 (10개체)	상추 (10개체)	배추 (10개체)	가지 (10개체)	토마토 (10개체)	양파 (10개체)
대조구	A ① A ① A ① A ① A ①	B ① B ① B ① B ① B ①	C ① C ① C ① C ① C ①	D ① D ① D ① D ① D ①	E ① E ① E ① E ① E ①	F ① F ① F ① F ① F ①
	A ① A ① A ① A ① A ①	B ① B ① B ① B ① B ①	C ① C ① C ① C ① C ①	D ① D ① D ① D ① D ①	E ① E ① E ① E ① E ①	F ① F ① F ① F ① F ①
실험구 1그룹	A ② A ② A ② A ② A ②	B ② B ② B ② B ② B ②	C ② C ② C ② C ② C ②	D ② D ② D ② D ② D ②	E ② E ② E ② E ② E ②	F ② F ② F ② F ② F ②
	A ② A ② A ② A ② A ②	B ② B ② B ② B ② B ②	C ② C ② C ② C ② C ②	D ② D ② D ② D ② D ②	E ② E ② E ② E ② E ②	F ② F ② F ② F ② F ②
실험구 2그룹	A ③ A ③ A ③ A ③ A ③	B ③ B ③ B ③ B ③ B ③	C ③ C ③ C ③ C ③ C ③	D ③ D ③ D ③ D ③ D ③	E ③ E ③ E ③ E ③ E ③	F ③ F ③ F ③ F ③ F ③
	A ③ A ③ A ③ A ③ A ③	B ③ B ③ B ③ B ③ B ③	C ③ C ③ C ③ C ③ C ③	D ③ D ③ D ③ D ③ D ③	E ③ E ③ E ③ E ③ E ③	F ③ F ③ F ③ F ③ F ③
실험구 3그룹	A ④ A ④ A ④ A ④ A ④	B ④ B ④ B ④ B ④ B ④	C ④ C ④ C ④ C ④ C ④	D ④ D ④ D ④ D ④ D ④	E ④ E ④ E ④ E ④ E ④	F ④ F ④ F ④ F ④ F ④
	A ④ A ④ A ④ A ④ A ④	B ④ B ④ B ④ B ④ B ④	C ④ C ④ C ④ C ④ C ④	D ④ D ④ D ④ D ④ D ④	E ④ E ④ E ④ E ④ E ④	F ④ F ④ F ④ F ④ F ④
실험구 4그룹	A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤	B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤	C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤	D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤	E ⑤ E ⑤ E ⑤ F ⑤ F ⑤	F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤
	A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤ A ⑤	B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤ B ⑤	C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤ C ⑤	D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤ D ⑤	F ⑤ F ⑤ F ⑤ E ⑤ E ⑤	F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤ F ⑤

- 시제품 처리 및 시험구 조성은 1, 2연차와 동일하게 진행함
- 작물 정식 후 약 2개월간 진행되었으며 2개월 후 시험구별 토양 및 식물체를 채취하여 아래와 같이 분석 및 조사함
 - ① 식물체 생육조사
 - 배추: 엽수, 최대엽, 엽록소, 결구중, 결구횡, 결구중, 생체중, 건물중
 - 상추: 엽장, 엽폭, 엽록소, 생체중, 건물중
 - 가지: 초장, 중경장, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
 - 고추: 초장, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
 - 토마토: 초장, 엽장, 엽폭, 경경, 엽록소, 과장, 과경, 과수, 과중
 - 양파: 초장, 엽장, 엽폭, 엽수, 구직경, 생구중
 - ② 식물체 주원소 분석
 - 질소전량, 인산전량,加里전량, 칼슘전량, 고토전량
 - ③ 토양 이화학성 분석
 - pH, EC, 질소전량, 유기물, 유효인산, 교환성양이온(K, Ca, Mg, Na), CEC, 토성

2. 현장실증 실험 결과

1) 토양분석 결과

- 실험 종료 후 채취한 토양의 이화학성 분석결과는 아래 표와 같음
- 실험에 사용된 토양은 모래와 점토함량이 높은 사질식양토로 작물재배에 적합한 토양임
- 시제품 처리 후 토양의 pH는 상승하였으며 최대 6.4까지 상승된 것을 확인 할 수 있었음
- 토양의 EC는 2연차 시험 후 14.0dS/m까지 상승하였으나 2연차 실험 종료 후 비를 맞춰 EC가 적정수준까지 감소하였음
- 시제품 처리 후 토양의 EC는 powder 5% 시험구에서 1.7dS/m로 가장 높았으며 작물 생육 적정 EC인 2.0dS/m를 초과한 시험구는 없었음
- 토양 중 질소함량은 powder 시험구 처리 후 상승하였으나 pellet 시험구는 대조구와 차이가 없었음
- 유효인산 및 교환성 양이온의 함량 또한 시제품 처리 후 큰 변화는 없었음

표 117. 시험전·후 발 토양의 기본 분석 결과

분석 항목	대조구	pellet 2%	pellet 5%	powder 2%	powder 5%	단위
pH	5.9	6.4	5.9	6.0	6.1	-
EC	0.3	0.8	1.3	1.5	1.7	dS/m
질소전량	0.09	0.09	0.09	0.12	0.13	%
유기물	0.5	0.6	0.6	1.1	0.6	
유효인산	12.15	10.83	12.82	12.33	11.68	mg/kg
교환성 양이온	K ⁺	0.04	0.04	0.08	0.11	0.04
	Ca ²⁺	1.78	2.53	1.98	1.60	1.61
	Mg ²⁺	1.39	1.16	0.90	0.86	0.83
	Na ⁺	*n.d.	0.02	0.01	0.02	0.03
CEC	13.23	13.67	12.78	13.65	16.54	cmol+/kg
토성	sand	50.0	47.5	42.5	40.0	35.0
	silt	20.0	20.0	22.5	22.5	30.0
	clay	30.0	32.5	35.0	37.5	35.0
	토성	사질식양토	사질식양토	식양토	식양토	식양토

*n.d.: not detected

2) 식물체 생육조사 결과

- 배추의 생육 조사 결과는 아래 표와 같음
- 시제품 처리 후 배추의 엽수는 powder 시험구의 상추가 외엽, 내엽이 각각 33, 67장으로 가장 많았으며 대조구가 28, 43장으로 가장 적었음
- 잎의 크기 또한 powder 5% 시험구의 상추가 엽장, 엽폭이 각각 53.0, 26.0cm로 가장 컸으며 대조구가 가장 작았음
- 상추의 생체중은 시제품을 처리한 시험구 모두 대조구보다 좋았으며 pellet 5% 시험구의 상추가 1주당 평균 3.69kg으로 가장 좋았음

표 118. 시험구별 배추 생육조사 결과

	엽수		최대엽		엽록소 mg/100cm ²	결구중 cm	결구횡 cm	결구중 kg/주	생체중 kg/주	건물중 g/주
	외엽	내엽	엽장	엽폭						
	----- ea -----	----- ea -----	----- cm -----	----- cm -----						
대조구	28	43	38.5	18.1	2.9	21.3	9.1	0.53	2.36	235.52
pellet 2%	29	50	43.8	22.2	3.2	28.0	13.5	1.85	3.55	299.69
pellet 5%	31	55	47.0	24.0	3.4	30.5	15.5	2.20	3.69	282.61
powder 2%	25	65	52.0	25.0	4.0	28.0	16.5	1.65	3.24	275.41
powder 5%	33	67	53.0	26.0	4.5	29.0	18.0	2.01	3.60	234.13

- 시험 종료 후 상추의 생육 조사 결과는 아래 표와 같음
- 상추 잎의 크기는 시제품을 처리한 시험구 모두 대조구보다 컸으며 엽장은 pellet 5% 시험구의 상추가 28.5cm로 엽폭은 powder 5% 시험구가 19.9cm로 가장 컸음
- 상추 잎의 엽록소함량은 powder 5% 시험구의 상추가 4.18mg/cm²으로 가장 높았음
- 상추 1주의 평균 생체중 및 건물중은 시제품 처리 후 모두 높아졌으며 생체중은 powder 5% 시험구가 1.64g으로 건물중은 pellet 5% 시험구가 95.5g으로 가장 좋았음

표 119. 시험구별 상추 생육조사 결과

	최대엽		엽록소 mg/100cm ²	생체중 g/주	건물중
	엽장 cm	엽폭			
대조구	24.5	18.0	3.81	1.33	92.7
pellet 2%	27.0	18.7	3.86	1.46	93.1
pellet 5%	28.5	19.1	4.04	1.59	95.5
powder 2%	26.0	19.4	4.01	1.58	91.1
powder 5%	26.8	19.9	4.18	1.64	93.5

- 시험 종료 후 가지의 생육 조사 결과는 아래 표와 같음
- 가지의 초장 및 중경장은 시제품을 처리한 시험구 모두 대조구보다 컸으며 powder 5% 시험구 가지의 초장 및 중경장이 각각 150, 42cm로 가장 컸음
- 시제품 처리 후 가지 잎의 엽록소 함량은 모두 증가하였으며 특히 pellet 시제품을 처리한 시험구에서 가장 좋은 효과를 보였음
- 가지 과수의 크기는 powder 시제품을 처리한 시험구가 가장 좋았으며 powder 5% 시험구 가지의 과장 및 과경은 각각 29.0, 42.3cm 였음
- 가지 1주당 과수의 수는 대조구 3개 pellet 2, 5%, powder 2% 각각 4개씩이었으며 powder 5% 시험구가 5개로 가장 많았음
- 주당 과수의 중량은 주당 과수의 수가 가장 많았던 powder 5% 시험구가 536.4g으로 가장 좋았으나 과수의 평균 무게는 powder 2% 시험구가 117.4g으로 가장 좋았으며 이어 대조구가 114.9g으로 좋았음

표 120. 시험구별 가지 생육조사 결과

	초장 ----- cm -----	중경장 -----	경경 mm	엽록소 mg/100cm ²	과장 cm	과경 cm	과수 ea/주	과중 g/주
대조구	100.5	30.3	16.14	4.86	22.5	32.3	3	344.8
pellet 2%	129.0	35.5	17.73	5.41	26.0	33.8	4	384.0
pellet 5%	144.0	37.0	19.11	5.67	29.0	37.3	4	423.0
powder 2%	139.0	40.0	17.28	5.27	26.0	41.6	4	469.6
powder 5%	150.0	42.0	22.63	5.41	29.0	42.3	5	536.4

- 시험 종료 후 고추의 생육 조사 결과는 아래 표와 같으며 고추의 초장은 시제품을 처리한 시험구 모두 대조구보다 컸으며 특히 pellet 5% 시험구가 147cm로 가장 컸음
- 고추 과실의 크기는 pellet 5% 시험구의 고추의 과장 및 과경이 각각 16.2, 23.0mm로 가장 좋았음

- 고추 1주당 과수의 수 또한 pellet 5% 시험구에서 40개로 가장 많았으며 대조구는 1주당 21개로 약 2배 차이가 낮음
- 고추 1주당 과실의 중량은 주당 과수의 수가 가장 많았던 pellet 5%가 814.0g으로 가장 높았으며 과실 1개의 평균 무게도 20.4g으로 가장 좋았음

표 121. 시험구별 고추 생육조사 결과

	초장 cm	경경 mm	엽록소 mg/100cm ²	과장 ----- mm -----	과경 -----	과수 ea/주	과중 g/주
대조구	100	28	5.81	14.0	19.6	21	373.7
pellet 2%	143	33	6.08	15.0	21.0	34	645.0
pellet 5%	147	38	6.20	16.2	23.0	40	814.0
powder 2%	128	35	5.85	15.0	16.6	33	661.5
powder 5%	132	38	6.24	15.6	20.8	39	749.1

- 시험 종료 후 토마토의 생육 조사 결과는 아래 표와 같으며 토마토의 초장은 pellet, powder 5% 시험구에서 각각 249.0, 248.0cm로 가장 좋았음
- 토마토 과실의 크기 또한 pellet, powder 5% 시험구에서 가장 좋았으며 주당 과수의 수는 powder 5% 시험구 47개, pellet 5% 시험구 44개로 차이가 있었음
- 토마토의 당도도 pellet, powder 5%에서 각각 9.1, 9.2brix로 대조구 8.4brix보다 0.7, 0.8brix 차이였음

표 122. 시험구별 토마토 생육조사 결과

	초장	최대엽		경경	엽록소	과장	과경	과수	과중	당도
	----- cm	엽장	엽폭							
대조구	234.0	13.0	7.2	14.4	5.6	42.8	28.9	35	537.7	8.4
pellet 2%	243.0	14.3	7.8	15.4	5.7	43.6	29.4	41	653.2	8.7
pellet 5%	249.0	14.6	8.0	15.7	5.8	44.1	30.0	44	689.3	9.1
powder 2%	241.0	14.2	7.9	15.2	5.7	43.2	29.0	40	621.5	8.9
powder 5%	248.0	14.7	8.1	16.2	6.0	44.6	30.2	47	701.5	9.2

- 시험 종료 후 양파의 생육 조사 결과는 아래 표와 같으며 양파의 초장은 시제품을 처리한 시험구 모두 대조구보다 좋았으며 powder 2% 시험구에서 87cm로 가장 좋았음
- 반면 양파의 크기 및 생체중은 pellet 2%가 각각 83.9, 272.4g으로 가장 좋았음

표 123. 시험구별 양파 생육조사 결과

	초장	엽장	엽폭	엽수	구직경	생구중
	----- cm	----- cm	----- cm	ea/주	----- g/주	----- g
대조구	70.5	61.5	1.8	8	66.2	145.1
pellet 2%	83.0	74.1	2.6	9	83.9	272.4
pellet 5%	82.0	73.0	2.0	10	72.3	200.2
powder 2%	87.0	67.6	2.2	8	75.7	209.5
powder 5%	80.0	71.0	2.1	9	75.1	181.2

- 각 시험구별 작물의 수확량은 아래표와 같음
- 상추, 가지, 토마토의 수확량은 powder 5% 시험구가 가장 좋았으며 특히 가지는 대조구대비 2배 이상 차이를 보임
- 배추는 pellet 2%(36.9kg) 시험구의 수확량이 가장 좋았으나 powder 5%(36.0kg)와 큰 차이는 없었음
- 고추는 pellet 5%에서 325.6kg으로 가장 높았으며 대조구대비 약 5배가량 높았음

표 124. 시험구별 작물 수확량

	배추	상추	가지	고추	토마토	양파
	----- kg -----					
대조구	23.6	13.3	10.3	78.5	188.2	1.5
pellet 2%	35.5	14.6	15.4	219.3	267.8	2.7
pellet 5%	36.9	15.9	16.9	325.6	303.3	2.0
powder 2%	32.4	15.8	18.8	218.3	248.6	2.1
powder 5%	36.0	16.4	26.8	292.2	329.7	1.8

- 시험 종료 후 식물체의 성분 분석 결과는 아래 표와 같음
- 식물체 내 질소 함량은 시제품 처리 후 상승하는 경향을 보인 시험구가 많았으나 양파 내 질소함량은 감소하였음
- 인산함량은 대조구와 큰 차이를 보이는 시험구가 없었음
- 시제품 처리 후 가리함량은 질소와 동일하게 상승하는 경향을 보였으나 양파 내 가리함량은 반대로 감소하였음
- 칼슘 함량은 엽채류인 상추, 배추는 시제품 처리구가 대조구보다 높았으나 과채류인 고추, 가지는 감소하는 경향을 보임

표 125. 식물체내 성분분석결과

		질소전량	인산전량	加里전량	칼슘전량	고토전량
		----- % -----				
배추	대조구	2.98	0.38	2.19	1.53	0.23
	pellet 2%	3.38	0.40	2.76	0.48	0.13
	pellet 5%	4.94	0.29	2.74	3.54	0.40
	powder 2%	4.12	0.30	2.15	4.27	0.47
	powder 5%	4.87	0.28	1.63	4.43	0.43
상추	대조구	4.43	0.26	2.03	0.71	0.19
	pellet 2%	4.79	0.39	2.83	1.52	0.30
	pellet 5%	4.54	0.41	3.02	1.66	0.27
	powder 2%	4.13	0.34	3.53	0.85	0.27
	powder 5%	5.19	0.42	3.43	1.79	0.35
가지	대조구	2.71	0.23	1.26	4.41	0.52
	pellet 2%	3.42	0.26	1.95	3.47	0.43
	pellet 5%	3.58	0.26	1.90	3.43	0.50
	powder 2%	3.47	0.22	1.74	3.67	0.55
	powder 5%	4.31	0.21	2.41	3.83	0.52
고추	대조구	4.31	0.27	3.58	3.69	0.91
	pellet 2%	4.64	0.18	4.52	3.35	0.45
	pellet 5%	4.82	0.15	4.47	3.51	0.55
	powder 2%	5.55	0.16	4.94	1.94	0.34
	powder 5%	5.57	0.21	4.53	2.36	0.49
토마토	대조구	2.30	0.24	1.13	6.33	0.63
	pellet 2%	2.50	0.24	1.41	7.65	0.67
	pellet 5%	2.91	0.22	1.59	7.66	0.59
	powder 2%	2.51	0.21	1.81	7.91	0.62
	powder 5%	2.91	0.21	2.02	7.01	0.74
양파	대조구	3.57	0.18	3.06	1.43	0.27
	pellet 2%	3.31	0.15	3.18	2.80	0.28
	pellet 5%	3.47	0.20	3.49	1.97	0.15
	powder 2%	3.32	0.16	2.34	0.94	0.15
	powder 5%	3.66	0.18	2.38	0.91	0.12

I. CO₂ flux chamber system을 활용한 저탄소 농법의 탄소 저감량 연구

- 바이오차와 같은 탄소성분이 풍부한 물질의 분해 동태는 CO₂로의 무기화가 일반적인 메커니즘이기 때문에, 토양에 시용된 바이오차의 분해 과정 및 동태를 파악함에 있어서 시간 경과에 따른 토양 CO₂ 배출의 정량화가 적합한 실험방법으로 간

주됨(Sagrilo et al. 2014)

- 따라서 토양에 시용된 바이오차의 분해 연구에서 대부분의 연구는 정치 배양을 사용하였음(Zavalloni et al. 2011; Bruun et al. 2012).
- 최근의 연구에서는 지속적인 공기순환 시스템 장치를 사용하여 토양과 바이오차의 혼합물로부터의 CO₂ 배출을 측정하는 방법이 제시되었음(Bai et al. 2013, Farrell et al. 2015, Lanza et al. 2015)
- 이러한 방법은 야외의 환경조건에서 직접 측정이 가능할 뿐만 아니라 분해 동태의 정량적 평가에 있어 매우 중요한 측정데이터의 수집, 시간분해능 및 샘플부피를 증가시킬 수 있음(Lanza et al. 2015)
- 또한 Case 등(2014)은 에디 공분산과 같은 방법이 바이오차 시용에 따른 순생태계 교환(NEE, net ecosystem exchange) 평가를 가능하게 하여 토양/작물과 대기 사이의 CO₂ 교환수지에 대한 바이오차 시용 효과에 관한 더 많은 정보를 제공할 수 있을 것이라고 제안함
- 본 연구에서는 상추 경작지를 모의한 야외 실험장에서, 비근권토양의 바이오차 무시용구(S구)와 시용구(SB구), 상추재배토양의 바이오차 무시용구(CS구)와 시용구(CSB구)의 4처리구를 배치하고, 자동 연속 다채널 챔버 시스템(automated multi-chamber system; Joo et al. 2012)을 구축, 연속 운용함
- 목질 바이오차 시용 후 한 작물시기 동안 토양(비근권)의 호흡, 작물(상추)의 순광합성 및 토양/작물과 대기 사이의 CO₂ 교환수지(생태계호흡, ecosystem respiration)를 연속 측정하고, 바이오차 시용에 따른 농생태계(토양-작물-대기)의 CO₂ 교환수지를 정량적으로 평가하여 바이오차의 탄소저감 효과와 그 기여도를 종합적으로 고찰함

1) 바이오차 적용 CO₂ flux 야외 실험사이트 조성

- 충청남도 홍성군 광천읍 신진리에 위치한 (주)참그로 부설연구소(N 36°30'56.1", E 126°37'38.0", 해발고도 30 m) 부지 내에 연구자의 접근과 관리가 용이하고 외부의 인위적인 교란이 적은 남향야외 현장 CO₂ flux 모니터링 실험사이트를 선정함
- 2016년 5월에 밭 포장을 모의한 야외 실험장을 구축하고(그림 116) 사각형 프레임(10 m x 4 m x 1.5 m)의 실험장에 산림토를 채워 기초 토양을 조성하고 비가림 및 차광막(약 50% 차광율)을 설치함(그림 116).



그림 116. 야외 현장 적용 바이오차 처리구 및 대조구 특별 실험사이트 구축

- 본 야외 실험사이트 면적 내에 바이오차 적용 처리구 및 대조구 농작물 재배지의 조성 목적에 따라 방수재질의 사각형 프레임 타입(10 m x 4 m x 1.5 m)으로 전체 16개의 분할 프레임을 연속 배열한 야외 실험장 내에 4개의 처리구(5 m x 1.5 m)를 배치함
- 비근권토양의 바이오차 무시용구(S구), 비근권토양의 바이오차 시용구(SB구), 상추재배토양의 바이오차 무시용구(CS구) 및 상추재배토양의 바이오차 시용구(CSB구). 각 처리구에 4개의 소조사구(0.9 m x 0.9 m x 0.3 m)를 배치함
- 작물 재배시 주기적인 관수를 용이하게 하고자 프레임 바닥 밑면에 배수관을 제작하고 또한 야외 실험 및 농작물 관리가 편리하도록 실험재배지 가운데를 통과하는 배수로 및 이동 통로를 만들어 전체적으로 관수 및 강우시 배수가 용이하도록 함(그림 116).
- 사각형 프레임 설치 및 제작에 앞서서, 우선적으로 바이오차 적용 처리구 및 대조구의 작물 재배용 토양시료 준비를 하였으며 토양의 주요 재질은 양토(산림토)에 유기물(부엽토 및 상토)을 혼합하여 우리나라 관행농법 기준에 적합한 따른 경작지 토양 시비로 배합하고 야외실험 처리구의 토양에 5% 바이오차와 입

자형태(직경 약 2-3 mm의 비드 형상)를 결정하여 정량적으로 계량된 양을 투여함

- 야외 현장 CO₂ flux 모니터링 실험사이트 내의 바이오차 적용 처리구 및 대조구의 토양시비와 프레임 설치를 마친 후, 초기한달 정도의 토양의 안정화가 이루어진 다음 추가적으로 16기의 CO₂ flux 측정용 자동 멀티 챔버 시스템을 설치함
- 본 실험 대상 작물인 상추(청상추 및 적상추)는 파종시기에 맞추어 챔버 내에 이식함
- 2016년 6월 10일, 각 소조사구(총 16개 소조사구)의 토양을 일구고, 바이오차 시용구(SB구와 CSB구)의 각 소조사구에 비드 형상의 목질 바이오차를 12.15 L(건조중량 4.28kg 상당) 첨가하여 토양과 완전히 혼합함
- 6월 14일, 상추 재배구(CS구와 CSB구)의 각 소조사구에 적상추 모종(파종 1개월)을 2주씩 정식하였고 관행농법에 따라 물을 공급하고 재배 42일에 상추 잎을 1차 수확하고 재배 56일에 완전히 수확함
- 2018년 4월초, 전년도의 토양을 완전히 제거하고 산림토와 부엽토를 혼합하여 기초 토양을 조성한 후, 4월 20일에 각 소조사구의 토양을 일구고, 바이오차 시용구인 SB구와 CSB구의 각 소조사구에 비드 형상의 참나무 바이오차를 12.15 L(건조중량 4.28kg 상당) 첨가하여 토양과 완전히 혼합함
- 4월 25일, 상추 재배구(CS구와 CSB구)의 각 소조사구에 청상추 모종(파종 1개월)을 9주씩 정식하였고 관행농법에 따라 물을 공급하였고 재배 52일에 완전히 수확함

2) CO₂ flux 측정용 automated multi-chamber system 특성 및 모니터링 운용

- 농생태계(토양-농작물-대기)의 CO₂ flux 측정용 자동 멀티 챔버 시스템은(AMCS, automated multi-chamber system) 토양미생물의 호흡을 포함한 토양호흡과 작물의 광합성 및 호흡을 포함한 생태계호흡속도(ecosystem respiration rate) 또는 CO₂ 교환수지(-NEE = NEP)를 야외 현장에서 직접 시계열에 따른 연속 측정을 수행하고자 개발 제작한 시스템장치이다(그림 117).
- 이 AMCS는 4가지의 주요 구성품으로 CO₂ 적외선분석기(IRGA, infrared gas analyzer; Li-820, Li-cor, Inc. Lincoln, USA), 다채널방식의 gas sampler, DC 12V main controller, 운영프로그램 입력 및 자료수집이 가능한 CR1000-datalogger (campbell scientific Inc., Utah, USA), 그리고 16개의 현장 측정용 챔버들로 이루어져 있음
- 또한 호흡측정 및 분석방법은 밀폐순환법(closed dynamic chamber approach)을 활용하여, CR1000-datalogger에 입력된 다채널 운용프로그램으로부터 측정 개시

명령을 받은 main controller에 의해 DC 12V의 전력공급 및 시간 분배를 제어 받고 순차적으로 16개의 gas sampler와 CO₂ flux 챔버를 작동시켜, 각 챔버당 225초의 간격으로 챔버 내부의 공기 샘플은 일정하게 순환 및 이동되어 CO₂ 적외선분석기를 거치며 CO₂ 농도 측정이 이루어지고 분석된 자료는 CR1000-datalogger와 보조 Note-PC에 자동 저장 및 수집됨(그림 117).

- CO₂ flux 챔버의 형태는 실린더 타입의 원통형(대형 챔버: 직경 70 cm, 높이 61 cm; 소형 챔버: 직경 30 cm, 높이 33 cm)으로 재질은 0.1 mm의 얇고 투명한 폴리카보네이트(polycarbonate)의 합성수지를 사용하여 챔버 내부의 광량 및 광도 투과율(97% 이상의 자연광 투과)이 좋고 온도 및 습도 변화에 의한 강도 변화가 적어 내열성과 내구성이 뛰어나며 유연성과 가공성이 매우 우수하여 외부 환경의 극심한 변화에도 안정적인 구조를 유지시키며 원활한 내부의 공기 순환과 샘플링에 효율적이며 현장 적용에 편리함을 가지고 있음
- Main controller의 CPU에서 CO₂ flux 챔버로 전기적인 측정개시 신호가 전달되면 야외 현장에 개방되어 있던 챔버의 뚜껑이 천천히 닫혀짐과 동시에 순간적으로 내부의 공기 혼합팬(KMFH-12, Nihon Blower, Japan)과 순환 에어펌프가 가동되어 외부의 대기와 동일한 조건으로 유지되도록 조절됨
- 이후, 상부의 뚜껑이 닫혀 완벽한 밀폐가 되면 공기 순환펌프(5 L min⁻¹, CM-50-12, Japan)에 의해 챔버 외벽의 공기 배출구로부터 20 m의 흡입 튜브를 거쳐 다채널 gas sampler의 공기 흡입 솔레노이드 밸브에 도달하고 가스 유량계와 공기 필터를 거친 다음 0.7-0.8 L min⁻¹ 유량의 샘플링 공기 일부를 CO₂ 적외선분석기에 흘려보내 연속적으로 CO₂ 농도를 1초 간격으로 측정하고 10초 평균값이 저장됨
- 그리고 CO₂ 농도 분석이 종료된 샘플링 공기는 챔버 내부로부터 흡입된 나머지의 샘플 공기와 혼합되어 초기 흡입량과 같은 공기 유량으로 20 m의 배출 튜브를 거쳐 챔버의 안쪽으로 다시 보내지고 측정이 끝나칠 때까지 계속해서 순환됨



그림 117. 자동 CO₂ Flux Chamber System 개발제작 및 야외 설치 운영

- CO₂ flux 챔버 측정이 완전히 종료되면 상부의 뚜껑이 천천히 열리면서 공기 혼합팬의 작동이 멈추어지고 다음 순번의 측정이 이루어 질 때까지 뚜껑이 개방된 상태로 유지시켜 자연의 강우, 바람, 먼지, 광량, 낙엽 등이 챔버의 내부로 유입 가능하며 외부의 대기 및 환경 조건과 동일한 상태로 지속됨
- 야외 현장에서 안정적인 CO₂ flux 측정 실험을 운영과 특히 강풍, 강우설, 물리적 충격 등의 외부 환경 교란으로부터 챔버의 내구성이 유지되도록 하단부에 핀과 벨트를 이용하여 고정함
- 또한 연속 측정기간 중에 유입되는 잡초, 낙엽낙지, 이물질 등을 제거하고 광투과성에 영향을 주지 않기 위하여 챔버의 내외 벽을 주기적으로 청소하여 측정 데이터 값이 과소과대 평가 받지 않도록 유의함
- 야외 실험현장의 토양 표면에 CO₂ flux 챔버들을 초기 설치 한 후, 약 1 달 정도의 안정화시기를 거쳐 연속적인 야외 실험 측정값을 구하고 데이터를 수집함
- 2016년과 2018년, 바이오차 시용 후 70일간의 실험기간 동안, 각 소조사구에 CO₂ flux chamber system을 설치하여 CO₂ flux와 기온, 토양온도, 토양수분 및 차광막 안과 밖의 PPFD 등의 환경요인을 연속 측정함(그림 118).
- 2016년에 사용한 CO₂ flux chamber system은 8개의 chamber(직경 30cm, 높이 33cm)로 구성되어 비근권토양(S구와 SB구)과 상추재배토양(CS구와 CSB구)에서 수일간 번갈아 운영되었으며 상추재배토양의 경우, chamber 안에 1주의 상추가 위치함

- 2018년에 사용한 CO₂ flux chamber system은 8개의 chamber(직경 70cm, 높이 61cm)를 추가 구성하여, 비근권토양(S구와 SB구)에서는 기존의 작은 chamber(직경 30cm, 높이 33cm)로, 상추재배토양(CS구와 CSB구)에서는 큰 chamber(직경 70cm, 높이 61cm)로 운영하였다. 상추재배토양의 경우, chamber 안에 5주의 상추가 위치함(그림 118).



그림 118. 2018년도 봄에 사용한 CO₂ flux chamber system에서 상추재배토양(CS구와 CSB구)의 경우, 8개의 대형 chamber(직경 70cm, 높이 61cm) 내부 안쪽에 5주의 청상추를 정식하여 재배함.

3) 야외 실험지에서 주요 환경인자(environmental factor)들의 연속 측정

- CO₂ flux 측정 야외 실험사이트 주변의 기온 및 상대습도를 측정하기 위해서 토양 지면으로부터 1.3 m 높이에 직사광선을 차단하기 위한 통풍형 쉘드를 소형 기상센서파이프에 고정하고 그 안쪽에 온습도계(CS215, campbell scientific Inc., Utah, USA) 센서를 설치하고 토양온도는 지표면으로부터 0-5 cm 깊이에 열전대(PT-type) 센서를 야외 실험사이트 내의 대조구 및 바이오차 처리구 챔버 내

에 각각 2곳에 설치하고 연속 측정함

- 또한 토양수분을 측정하기 위해서 야외 실험사이트의 대조구 및 바이오차 처리구 내에 각각 2곳에 0-20 cm 토양깊이로 TDR(CS616, campbell scientific Inc., Utah, USA)을 설치하고 연속 측정함
- 광량은 광량자속밀도(Li-190R, Li-cor, Inc. Lincoln, USA) 측정 센서를 지표면으로부터 1.3 m 높이의 기상센서 파이프 및 야외 실험사이트의 4 m 높이의 최상단의 고정파이프에 설치하고 연속 측정함
- 모든 주요 환경인자 관련 관측 데이터는 1초 간격으로 측정되어 10초 평균값으로 CR1000-datalogger(campbell scientific Inc., Utah, USA)에 기록되고 보조 note-PC에 저장됨

4) 상추 바이오매스와 토양 샘플 분석

- 2016년과 2018년, 수확한 상추는 잎, 줄기 및 뿌리로 분리하여 세척하고 공기 건조시킨 후 건조기(105°C, 3일)에서 건조하여 중량을 측정함
- 2016년과 2018년의 실험종료 후, 각 소조사구에서 표토샘플을 채취하여 건조기(105°C, 3일)에서 건조하여 중량을 측정하고, 처리구마다 4조사구의 표토샘플을 혼합하여 토양분석을 분석기관에 의뢰함
- 토양 분석 항목으로는 pH, EC, CEC, C, N, C/N ratio 등과 토성 분류임

5) 야외 실험지에서의 측정자료 분석 방법

- 밀폐순환법을 적용시킨 automated multi-chamber systems을 사용하여 야외 실험사이트의 바이오차 처리구 및 대조구에서 토양호흡과 작물의 광합성 및 호흡을 포함한 생태계호흡으로부터 배출/흡수되는 CO₂ flux의 측정값은 단위면적과 단위시간당 토양-농작물-대기 사이의 CO₂ 교환량(단위: mg CO₂ m⁻² h⁻¹)으로 나타내었으며 아래의 다음과 같은 계산식으로 산정함
- 토양호흡속도, 작물의 광합성/호흡속도, 생태계호흡속도(ER)의 계산식 :

$$ER(mg\ CO_2\ m^{-2}\ h^{-1}) = \left(\frac{\Delta c}{\Delta t}\right)\frac{V}{A} = \left(\frac{\Delta c}{\Delta t}\right)H$$

Δc : CO₂ concentrations increased in the chamber for measurement time period,

Δt : the measurement time period (sec),

V : the volume of chamber (m³),

A : the surface area covered by chamber (m²), H : the height of chamber (m).

- 야외 실험기간 동안에 연속적으로 얻어진 측정데이터로부터 산출된 각각의 CO₂

교환량에 대한 주요 환경인자들의 영향은 회귀분석을 이용하여 그 상관관계를 조사함

- 바이오차 처리구 및 대조구의 유의 수준은 $P < 0.05$, 모든 통계적인 분석과 그래프 표출은 SPSS ver. 12.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)와 SigmaPlot ver. 13.0(Systat software, Inc., USA)의 프로그램을 사용함

6) 야외 현장에서 바이오차 적용 처리구 및 대조구의 토양 및 바이오차 성분 분석

- 야외 실험에 사용한 토양은 점토함량이 낮은 양질사토(2016년)와 사양토(2018년)로 토양특성은 표 126과 같으며 2016년의 양질사토의 토양탄소함량은 약 2g kg^{-1} 로 비옥도가 매우 낮음
- 2016년과 2018년에 사용한 바이오차의 원료는 각각 목질과 참나무(쥬포이엔 생산)로, 참나무 바이오차가 목질 바이오차보다 탄소와 질소의 함량은 낮았으나 C/N비는 두 배 이상 높았음(표 126)

표 126. 2016, 2018년 실험에 사용한 토양의 이화학성

	Sand	Silt	Clay	Soil texture	Total C	Total N	C/N	pH	EC	CEC
	%			-	%	%	-	(1:5,H ₂ O)	dS m ⁻¹	cmol ⁺ kg ⁻¹
2016	82.5	12.0	2.5	Loamy sand	0.19	0.06	3.45	7.00	0.29	6.46
2018	72.5	20.0	7.5	Sandy loam	2.10	0.11	19.09	6.48	0.70	10.83

표 127. 2016, 2018년 실험에 사용한 바이오차의 특성

	Feedstock	Pyrolysis conditions	Type	Total C	Total N	C/N	pH	EC	CEC
	-	-	-	%	%	-	(1:5,H ₂ O)	dS m ⁻¹	cmol ⁺ kg ⁻¹
2016	Wood	300°C, 3h	Bead	50.36	5.02	10.03	7.2	6.53	-
2018	Oak	600°C, 3h	Bead	40.44	1.53	26.43	7.68	22.6	30.25

- 야외 실험에 사용한 토양은 점토함량이 낮은 양질사토(2016년)와 사양토(2018년)로 토양특성은 표 126과 같으며 2016년의 양질사토의 토양탄소함량은 약 2g kg^{-1} 로 비옥도가 매우 낮음
- 2016년과 2018년에 사용한 바이오차의 원료는 각각 목질과 참나무(쥬포이엔 생산)로, 참나무 바이오차가 목질 바이오차보다 탄소와 질소의 함량은 낮았으나 C/N비는 두 배 이상 높았음(표 127)

- 2016년과 2018년의 바이오차 시용량은 동일하게 53t ha⁻¹에 상당하는 양으로 상당히 높았음
- 따라서 2016년의 실험 조건에서, 즉 비옥도가 더 낮은 토양에서 탄소함량이 더 높은 바이오차를 시용함에 따라 토양탄소의 증가가 클 것으로 예측했으나 70일 간의 실험 종료 시점의 토양분석 결과(표 126), 2016년의 S구와 SB구 및 CS구와 CSB구 사이의 토양탄소함량의 증감은 각각 -5%, 11%로 낮았고, 2018년의 S구와 SB구 및 CS구와 CSB구 사이의 토양탄소함량의 변화는 각각 171%, 3%로 상추를 재배하지 않은 토양(비근계)에서만 유의하게 높았음
- 또한 2018년의 실험 종료 시점의 토양분석의 결과(표 126)는 다른 처리구에 비해 CS구에서 높아진 EC는 토양에 바이오차 시용 후 작물을 재배하지 않고 방치할 경우 염해에 약한 작물에 피해를 초래할 가능성이 있음을 시사함

표 128. 70일 재배 후 각 시험구별 토양의 특성

Year	Treatment	Total C %	Total N %	C/N -	pH (1:5,H ₂ O)	EC dS/m	CEC cmol ⁺ kg ⁻¹
2016	S	0.67	0.05	14.57	7.36	0.32	6.02
	SB	0.64	0.04	16.84	7.28	0.47	5.65
	CS	0.7	0.04	17.07	7.48	0.28	7
	CSB	0.78	0.06	12.19	7.36	0.35	7.25
2018	S	2.1	0.11	19.09	6.48	0.7	10.83
	SB	5.69	0.22	25.86	7.27	2.05	18.54
	CS	4.34	0.2	21.7	5.86	0.9	17.97
	CSB	4.46	0.21	21.24	6.41	1.05	16.69

7) 2016년 바이오차 적용 처리구와 대조구의 CO₂ flux 및 주요 환경요인의 시계열 변화

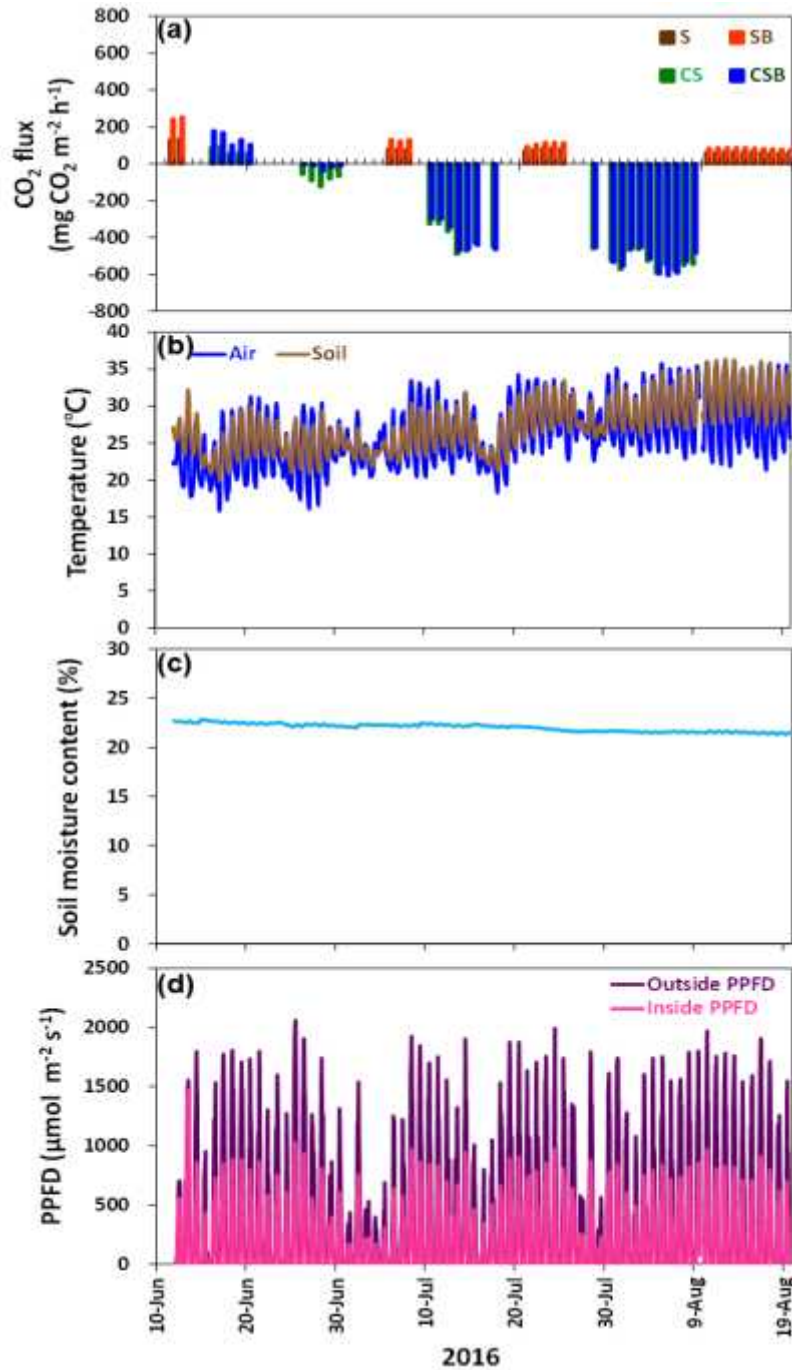


그림 119. Temporal variations of the observed (a) daily mean CO₂ fluxes (mg CO₂ m⁻² h⁻¹) at the S (soil), SB (soil + biochar), CS (crop + soil), and CSB (crop + soil + biochar) treatment plots, and hourly mean (b) air and soil temperatures (°C), (c) soil moisture contents (%), and (d) PPFDs (photosynthetically active photon flux density, μmol m⁻² s⁻¹) of the outside and inside rain proof at the filed site during the experimental period from June to August in 2016.

- (주)참그로 영내 부지의 야외 실험사이트 내에서 8개의 chamber로 구성된 CO₂

- flux system을 사용하여 2016년 6월 10일에 비근권토양인 S(토양)구와 SB(토양 + 바이오차)구과 상추재배토양인 CS(작물 + 토양)구와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)구의 4개의 처리구에서 수일 간격으로 번갈아 가며 토양(비근권)의 호흡, 작물의 순광합성 및 토양/작물과 대기 사이의 CO₂ 교환수지(생태계호흡)를 측정함
- 바이오차 실험구는 지름 2-3 mm의 비드 형상의 바이오차를 토양(산림토)에 5%의 비율로 혼합하여 조성하였고 이시기의 모든 실험 토양에는 전혀 부가적인 유기물, 비료, 퇴비 또는 부엽토 및 상토 등을 처리하지 않음
 - 이는 일반 토양(산림토)에 영향을 미치는 순수 바이오차 및 재배 작물의 효과를 보다 명확히 밝히고자 함
 - 토양을 안정시킨 후 2016년 6월 14일부터 챔버 내에 실험 대상 작물로 적상추(red leaf lettuce) 모종을 옮겨 심은 후, 각각의 처리구에서 CO₂ flux 자동 측정과 주요 환경요인(기온, 습도, 지온, 토양수분, 광량 등)을 측정함(그림 119).
 - 그 결과로 70일(2016년 6월 10일- 8월 20일) 간의 전 실험기간 동안에 주요 환경인자 기온과 지온은 각각 15.8-35.9°C와 19.9-36.4°C 사이의 범위에서 명확한 일변화를 나타내며 전체 일평균 기온과 지온은 각각 25.9°C와 27.2°C였음
 - 한편, 토양수분은 바이오차 처리구와 대조구의 양쪽 모두 21.3-22.8%의 범위 내에서 일정한 경향을 보였고 차광망 안과 밖의 광량(PPFD)은 각각 0-1471.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 0-1807.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 사이의 변화를 나타냄(그림 119b-d)
 - 적상추(red leaf lettuce) 모종을 정식 후, 2주째 되는 시기부터 상추재배토양인 CS(작물 + 토양)와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)의 처리구에서 낮 동안의 활발한 광합성 작용에 따른 CO₂ flux의 측정값이 음(-)의 방향으로 증가 되어지는 대기 중의 CO₂ 흡수 속도를 잘 반영하며 프레임 내에 정식된 상추 모종들이 안정적으로 생육시기에 들었음을 나타냄(그림 119a)
 - 초기 실험 결과, 바이오차를 시용한 SB구와 CBS구에서 측정된 생태계호흡은 바이오차를 시용하지 않은 각각의 S구와 CS구에서보다 더 높았으나 시간의 경과에 따라 그 차이는 작아지는 경향이 나타남
 - 이는 야외 현장에서 바이오차 시용에 따른 토양 입단 구조와 토양미생물 군집의 특성을 변화시킴으로써 탄소순환과 이산화탄소 배출에 영향을 미칠 수 있고 바이오차 성분 그 자체가 토양 속의 미생물에 의해 어느 정도 분해될 수도 있기 때문인 것으로 판단됨
 - 56일 재배 경과 후, 수확 종료 시기까지의 실험 기간 동안에 S(토양), SB(토양 + 바이오차), CS(작물 + 토양), 그리고 CSB(작물 + 토양 + 바이오차) 처리구의 전체 일평균 CO₂ flux 값은 각각 약 76, 113, -313, 그리고 -286 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 이었음(그림 119a)
 - 그림 120은 2016년 7월 31일에서 8월 2일 사이의 3일간의 특별 실험사이트 내

에서 자동 측정된 주요 환경인자와 CO₂ fluxes의 시간평균의 일변화 경향을 보여주고 있음

- 중점적인 여름철 시기인 이 기간 동안에 기온은 오후 2시에 34.9°C의 최고값과 오전 5시에 23.5°C의 최저값을 나타내고 지온은 오후 3시에 33.4°C의 최고값과 오전 6시에 26.5°C의 최저값을 보였음
- 기온과 지온의 정점 사이에 약 1시간의 지체 현상이 발생하였음을 알 수 있었으며 토양수분은 3일 동안에 21.5-21.7%으로 일정하고 변화가 없었음
- 실험사이트 차광막 안과 밖의 최고 광량은 각각 843.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 1741.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 정오 12시에 최고값을 나타냄(그림 120a-b)
- 이 여름철 기간에서 상추재배토양인 CS(작물 + 토양)구와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)구의 CO flux 시간 변화는 태양에너지와 광량(PPFD)이 +(양)값을 가지는 일출 후, 낮 동안에 -(하향)값을 나타내며 서서히 일몰에 따라 광량(PPFD)이 zero(0)값을 가지는 야간에 -(음)값을 나타냄
- 이는 낮 동안의 활발한 녹색 작물의 광합성 작용과 밤 시간대의 토양과 작물의 호흡 작용에 주로 기인되어 생태계호흡의 전반적인 균형을 조절하고 있음을 알 수 있었음
- 이 기간 CS(작물 + 토양) 처리구의 CO flux는 525 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 에서 -2190 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 사이의 일변화 범위에 있고 CSB(작물 + 토양 + 바이오차) 처리구의 CO flux는 580 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 에서 -2137 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 사이의 범위에서 일변동 하였으며 여기서 양쪽 모두 일출 후, 오전 9시에 최고값에 이르며 가장 높은 광합성 속도를 보였음
- 일반적으로 광량(PPFD)이 가장 충분한 시점인 정오 12시 이후 광합성 속도가 점차 증가하여 대기 중의 CO₂를 흡수율이 더욱 좋아질 것이라 예상됨
- 그러나 이 시기가 여름철 중심 시기여서 기온이 오전 10시 이후에, 30°C 이상으로 상승하고 재배 작물(적상추)의 열 스트레스 및 광저해에 의한 광합성의 효율과 활성이 급격히 감소되고 있음을 본 그래프 결과를 통하여 알 수 있었음(그림 120c)
- 2016년 순수 토양(산림토)에 부가적인 유기물, 비료, 부엽토, 상토 등을 혼합 및 투여하지 않은 실험 조건으로 이기간 동안의 CS(작물 + 토양)구와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)구의 생태계호흡(-NEE) = NEP 속도는 유의한 차이를 보이지 않았음

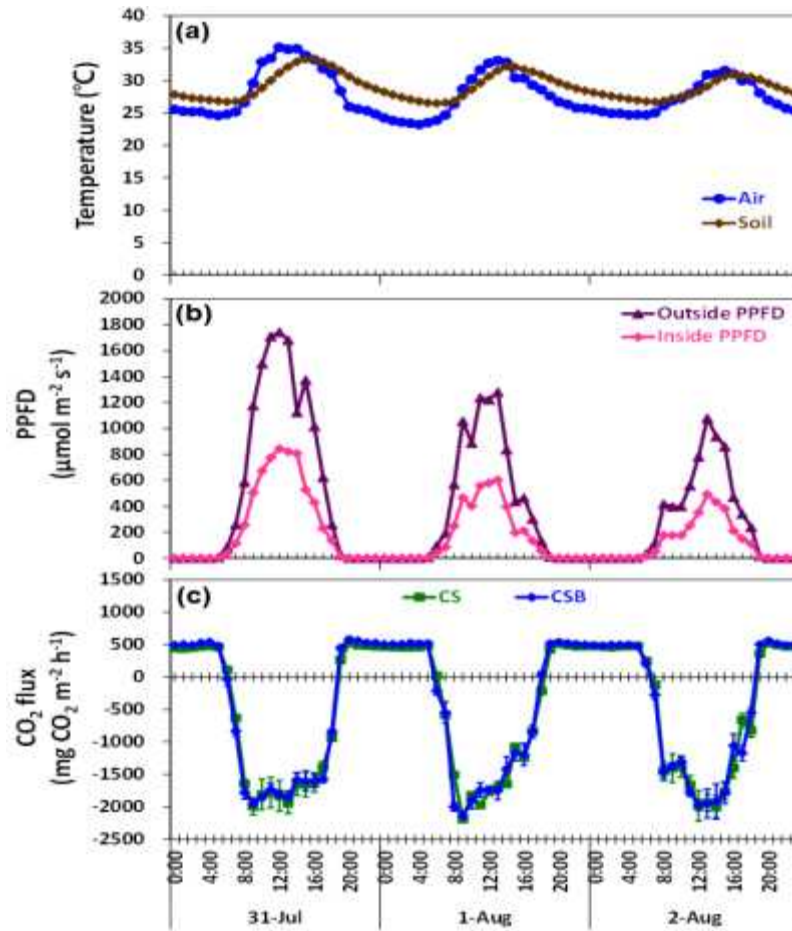


그림 120. Diurnal changes of (a) air and soil temperatures ($^{\circ}\text{C}$), (b) outside and inside PPFDs (photosynthetically active photon flux density, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) of the outside and inside rain proof, and (c) CO_2 fluxes at the CS (crop + soil), and CSB (crop + soil + biochar) treatment plots in the field site during the 3-day periods from 31 July to 2 August of 2016.

8) 2018년 바이오차 적용 처리구와 대조구의 CO_2 flux 및 주요 환경요인의 시계열 변화

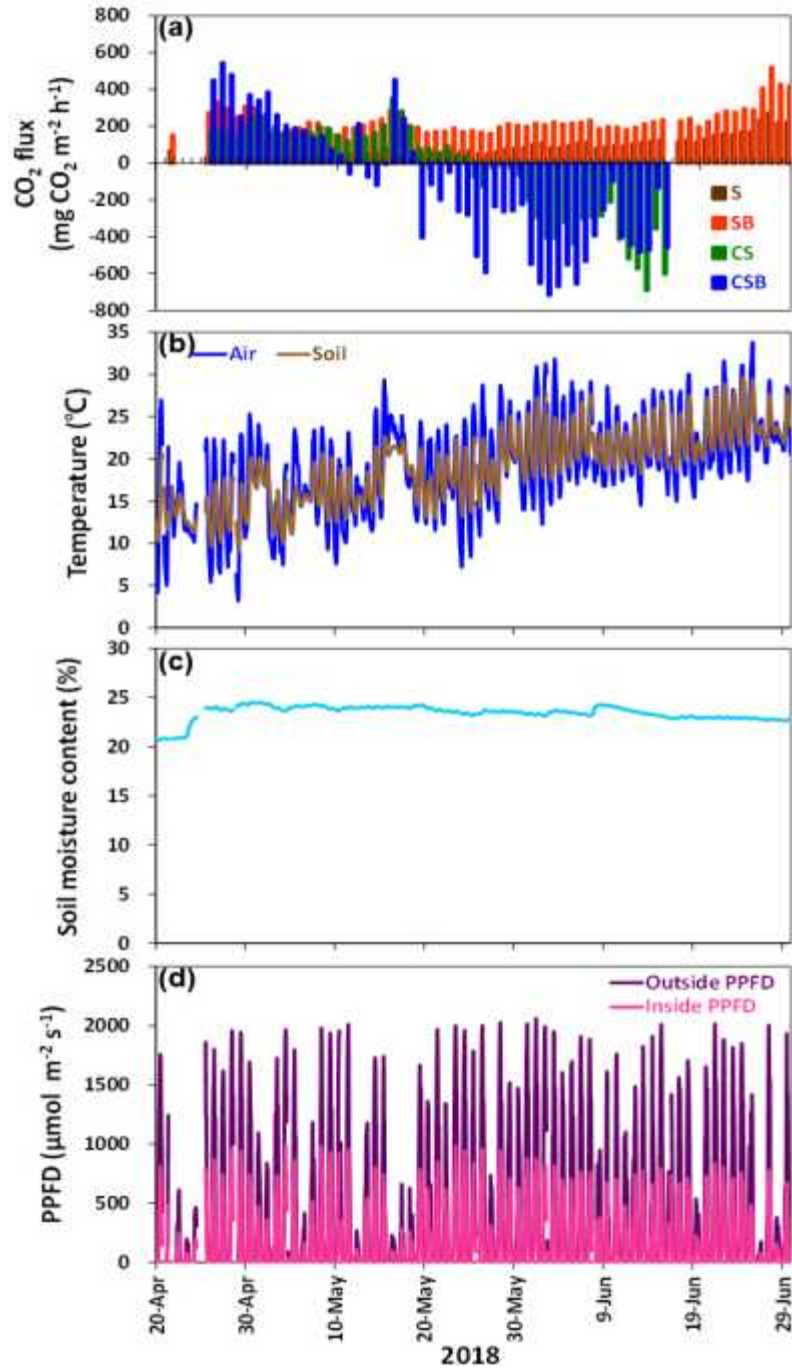


그림 121. Temporal variations of the observed (a) daily mean CO₂ fluxes (mg CO₂ m⁻² h⁻¹) at the S (soil), SB (soil + biochar), CS (crop + soil), and CSB (crop + soil + biochar) treatment plots, and hourly mean (b) air and soil temperatures (°C), (c) soil moisture contents (%), and (d) PPFDs (photosynthetically active photon flux density, μmol m⁻² s⁻¹) of the outside and inside rain proof at the filed site during the experimental period from April to June in 2018.

- 충남 홍성군 광천읍에 (주)참그로 부지의 야외 실험사이트 내에서 16개의 대형

- 및 중형 chamber로 구성된 CO₂ flux systems를 새로이 제작 설치하여 2018년 4월 20일에 비근권토양인 S(토양)구와 SB(토양 + 바이오차)구과 상추재배토양인 CS(작물 + 토양)구와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)구의 4개의 처리구에서 시계열에 따라서 연속적으로 토양(비근권)의 호흡, 작물의 순광합성 및 토양/작물과 대기 사이의 CO₂ 교환수지(생태계호흡(-NEE) = NEP)를 자동 측정함
- 바이오차 처리구는 지름 2-3 mm의 비드 형상타입의 바이오차를 토양(양토)에 5%의 비율로 혼합하여 조성하였고 우리나라 현행 기준에 맞춰서 바이오차 및 재배 작물의 효과를 규명하고자 2018년 실험 토양은 관행농법 시비기준에 맞추어 부엽토 및 상토를 처리함
 - 그런 다음 토양을 안정시킨 후, 2018년 4월 25일부터 챔버 내에 실험 대상 작물로 청상추(blue leaf lettuce) 모종을 옮겨 심은 후, 각각의 처리구에서 CO₂ flux 자동 측정과 주요 환경요인(기온, 습도, 지온, 토양수분, 광량 등)을 측정함(그림 121)
 - 그 결과, 70일 간의 전 실험기간(2018년 4월 20일-6월 29일) 동안에 주요 환경인자 기온과 지온은 각각 11.8-25.3°C와 12.8-25.4°C 사이의 범위에서 명확한 일변화를 나타내며 전체 일평균 기온과 지온은 각각 18.6°C와 18.4°C 이었음
 - 한편, 토양수분은 바이오차 처리구와 대조구의 양쪽 모두 21.4-24.0%의 범위 내에서 일정하였고 실험사이트 차광망 안과 밖의 광량(PPFD)은 각각 0-985.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 0-1802.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 사이의 변화를 나타냄(그림 121b-d)
 - 청상추(blue leaf lettuce) 모종을 정식한 후, 초기 한 달의 작물 재배시기 동안에 상추재배토양인 CS(작물 + 토양)와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차) 실험구의 양쪽 모두에 낮 시기 동안의 활발한 광합성 작용에 따른 CO₂ flux의 측정값이 음(-)의 방향으로 크게 증가되어지고 또한 높은 대기의 CO₂ 흡수율을 잘 반영하며 정식된 상추 모종들이 모두 안정적으로 성장하고 있음을 파악 할 수 있었음(그림 121a)
 - 전체적인 야외 실험 결과로 바이오차를 사용한 SB구와 CBS구의 생태계호흡은 바이오차를 사용하지 않은 S구와 CS구에서보다 더 높았고 점진적인 시간의 경과에 따라서 그 차이가 작아지는 경향을 보였음
 - 이 결과는 야외 현장에 바이오차 적용에 따른 토양 구조와 미생물 군집의 특성을 변화시켜 탄소순환과 이산화탄소 배출에 영향을 미칠 수 있고 바이오차의 성분 자체가 토양 중의 미생물에 의해 직접적으로 어느 정도 분해될 수도 있기 때문인 것으로 여겨짐
 - 52일 재배 경과 후, 수확 종료 시기까지의 실험 기간 동안에 S(토양), SB(토양 + 바이오차), CS(작물 + 토양), 그리고 CSB(작물 + 토양 + 바이오차) 처리구의 전체 일평균 CO₂ flux 값은 각각 약 69, 213, -47, 그리고 -120 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 이

었음(그림 121a)

- 그림 122는 2018년 6월 4일에서 6월 6일 사이의 3일간의 야외 실험사이트 내에서 자동 측정된 주요 환경인자와 CO₂ fluxes의 시간평균의 일변화 경향을 나타내고 있음
- 봄에서 초여름 시기인 이 기간 동안에 기온은 오후 1시에 29.2°C의 최고값과 오전 4시에 15.4°C의 최저값을 나타내고 지온은 오후 3시에 26.7°C의 최고값과 오전 6시에 18.2°C의 최저값을 보였음
- 기온과 지온의 정점 사이에 약 2시간 정도의 지체 현상이 발생하였고 약 13°C 이상의 낮과 밤의 심한 일교차를 보였으며 토양수분은 23.3-23.7% 범위로 매우 안정적이었음
- 실험사이트 차광막 안과 밖의 최고 광량(PPFD) 값은 각각 762.1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 1670.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 정오 12시에 최고값을 나타냄(그림 122a-b)
- 2018년도 봄-초여름 사이의 이 시기에서 상추재배토양인 CS(작물 + 토양)구와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)구의 CO₂ flux 일변화는 태양에너지와 광량(PPFD)이 +(양)값을 가지는 오전 6시 이후부터 낮 시간 동안에 -(하향)값을 보이며 오후 18시 이후부터는 광량(PPFD)이 서서히 작아지며 광보상점 이하로 zero(0)값을 가지는 야간에 -(음)값을 보였음
- 이는 주로 낮 시기 동안의 활발한 재배 작물(청상추)의 광합성작용 효과와 밤 시간 동안의 토양과 재배 작물에 의한 호흡작용으로부터 기인되는 전반적인 생태계호흡(-NEE) = NEP의 균형과 CO₂ 교환수지 기능을 알 수 있었음(그림 122c)
- 이 시기에 S(토양) 처리구의 CO₂ flux는 36 mg CO₂ m⁻² h⁻¹에서 146 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 사이의 일변화 범위에 있고 SB(토양 + 바이오차) 처리구의 CO₂ flux는 154 mg CO₂ m⁻² h⁻¹에서 305 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 사이의 범위에서 일변화 하였다. 여기서, 오후 14-15시 사이의 기온과 지온이 가장 높은 온도 환경 조건 속에서 양쪽 모두 최고의 값에 달하며 가장 높은 토양호흡 속도를 나타냄
- 한편, CS(작물 + 토양) 처리구의 CO₂ flux는 715 mg CO₂ m⁻² h⁻¹에서 -2428 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 사이의 일변화 범위에 있고 CSB(작물 + 토양 + 바이오차) 처리구의 CO₂ flux는 1107 mg CO₂ m⁻² h⁻¹에서 -3293 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 사이의 범위에서 일변동하여 양쪽 모두 오전 10-11시 사이에 최고의 값에 달하며 가장 높은 광합성 속도를 나타냄(그림 122c)
- 일반적으로 기상조건이 맑은 날에 광량(PPFD)이 충분한 정오 12시를 기점으로 광합성 속도가 높게 증가하여 대기 중의 CO₂를 흡수율이 더욱 좋아질 것이라 예상되어짐
- 2018년도의 야외 실험은 봄-초여름 사이의 시기에 수행되어져서 높은 기온 상

승과 수분 부족의 원인으로부터의 스트레스 및 광저해의 피해와 급격한 광합성 속도의 감소는 없었음

- 2018년도 본 야외 실험은 우리나라 관행농법 시비조건에 맞추어 토양(양토)에 부엽토 및 상토를 혼합하고 조성하였고 이 기간 동안의 CS(작물 + 토양)구와 CSB(작물 + 토양 + 바이오차)구의 생태계호흡(-NEE) = NEP 속도는 유의한 차이를 보였음

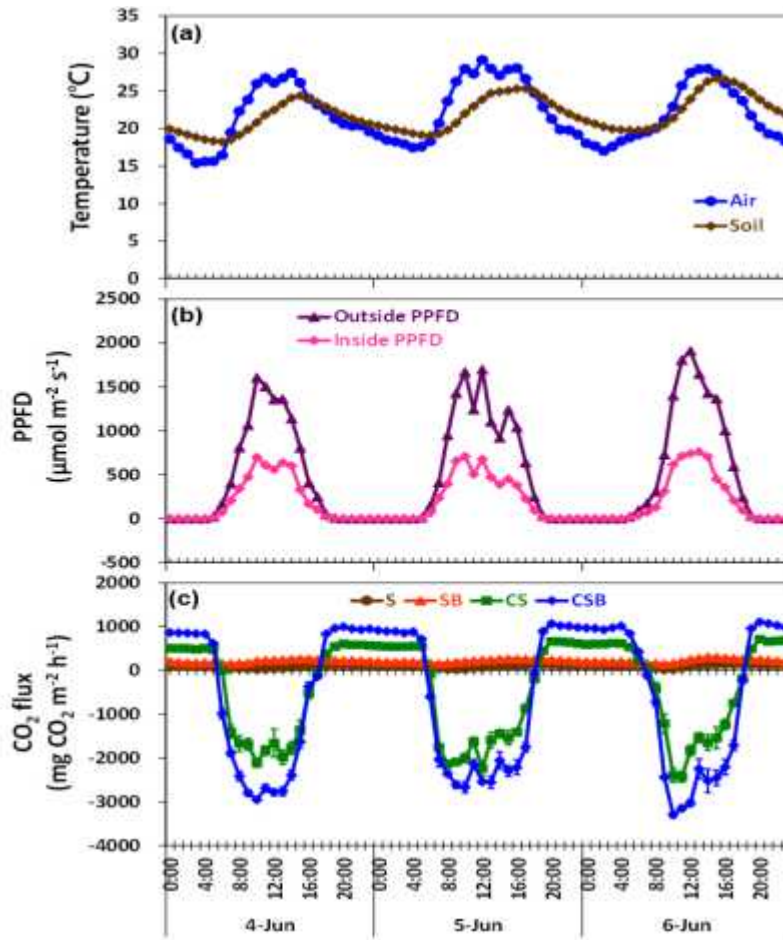


그림 122. Diurnal changes of (a) air and soil temperatures (°C), (b) outside and inside PPFs (photosynthetically active photon flux density, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) of the outside and inside rain proof, and (c) CO₂ fluxes at the S (soil), SB (soil + biochar), CS (crop + soil), and CSB (crop + soil + biochar) treatment plots in the field site during the 3-day periods from 4 to 6 June of 2018

9) 바이오차 적용에 따른 재배 대상 작물(적상추와 청상추)의 Biomass 변화



그림 123. 상추재배토양(CS구와 CSB구) 처리구에서 대형 chamber의 안쪽에 청상추 모종 이식 후, 9일과 24일의 생육 재배 사진

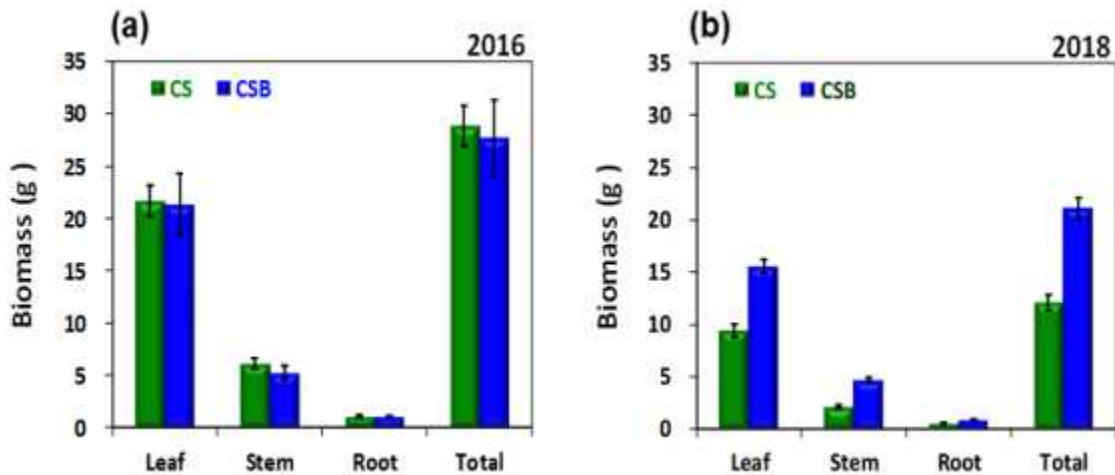


그림 124. The observed total biomass of above- and belowground (leaf, stem and root) of blue leaf lettuces at the CS (crop + soil), and CSB (crop + soil + biochar) treatment plots during the (a) 56-day and (b) 52-day experimental periods in 2016 and 2018.

- 2016년, 56일간 재배 후 수확한 적상추의 잎, 줄기 및 뿌리의 건조중량은 바이오차 무시용구(CS구)와 시용구(CSB구) 사이에 유의한 차이는 없었음(그림 124a)
- 이 결과는 CO₂ flux로 추정된 적상추의 순광합성에 대한 바이오차 효과([C]와 [CB]의 차이)가 없었다는 결과와 일치함
- 2018년, 바이오차 시용구(CSB구)에서 52일간 재배 후 수확한 청상추의 잎, 줄기 및 뿌리의 건조중량은 무시용구(CS구)에 비해 각각 1.7배, 2.2배 및 1.5배 유의하게 증가함에 따라 전체 바이오매스가 1.7배 유의하게 증가함(그림 124b)
- CO₂ flux로 추정된 청상추의 순광합성에 대한 바이오차 효과(2.9배)와는 차이가 있으나, 질소를 시비하지 않은 바이오차 단독 시용으로도 청상추의 수량이 크게 증가함

10) 야외 실험장에서 바이오차의 적용에 의한 대기-농작물-토양 사이의 CO₂ flux 및 교환수지 평가

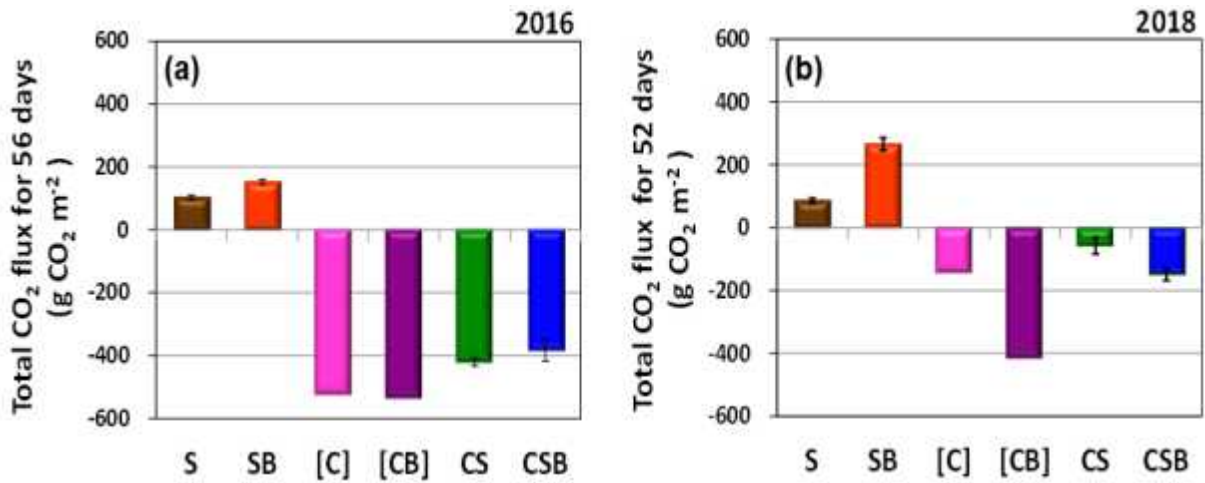


그림 125. The measured total CO₂ fluxes (mg CO₂ m⁻² h⁻¹) at the S (soil), SB (soil + biochar), CS (crop + soil), and CSB (crop + soil + biochar) treatment plots, and the total CO₂ fluxes (mg CO₂ m⁻² h⁻¹) of [C] (crop) and [CB] (crop + biochar) estimated by observation at the field site during the (a) 56-day and (b) 52-day experimental periods in 2016 and 2018.

- 2016년 목질 바이오차 시용 후 2일, 비근권토양(양질사토)의 바이오차 시용구(SB구)의 CO₂ flux(토양호흡)는 무시용구(S구)의 CO₂ flux의 1.9배로 유의하게 증가하였고 이후 계속 감소하였으나 70일 경과 후에도 여전히 1.4배로 유지됨(그림 119a)
- 적상추 재배기간(56일) 동안, SB구의 총 CO₂ flux는 S구의 1.5배로 유의하게 증가함
- 한편, 상추재배토양의 바이오차 시용구(CSB구)의 CO₂ flux(생태계호흡)는 바이오차 시용 후 6일(상추 정식 후 2일)에 무시용구(CS구)의 2.1배로 증가하였으나 30일 이후에는 유의한 차이가 없었고, 56일 간의 재배기간 동안의 총 CO₂ flux는 0.9배로 감소하였으나 유의한 차이는 아니었음(p > 0.05)
- 단순히 생태계호흡에서 비근권토양의 호흡을 빼 것을 작물의 순광합성으로 간주하여, 상추 재배기간(56일) 동안의 CS구의 총 CO₂ flux에서 S구의 총 CO₂ flux를 빼 것을 상추의 순광합성[C], CSB구의 총 CO₂ flux에서 SB구의 총 CO₂ flux를 빼 것을 바이오차 시용에 의한 상추의 순광합성[CB]으로 추정하면, 적상추의 순광합성은 바이오차 시용에 의한 영향을 받지 않았음(그림 125a)
- 2018년 참나무 바이오차 시용 후 2일, 비근권토양(사양토)의 바이오차 시용구(SB구)의 CO₂ flux(토양호흡)는 무시용구(S구)의 CO₂ flux의 2.3배로 유의하게 증가

하였고, 5일차에 시행한 물주기에 의한 토양수분함량의 증가와 함께 급격하게 증가하여 7일차에 9.5배에 달한 후 계속 감소하였으나 70일 경과 후에도 여전히 1.9배로 유지됨(그림 121a)

- 청상추 재배기간(52일) 동안, SB구의 총 CO₂ flux는 S구의 3.1배로 유의하게 증가함
- 반면, 상추재배토양의 바이오차 시용구(CSB구)의 CO₂ flux(생태계호흡)는 바이오차 시용 후 7일(상추 정식 후 2일)에 무시용구(CS구)의 3배로 증가하였고, 52일간의 재배기간 동안의 총 CO₂ flux는 2.6배로 유의하게 증가함
- 단순히 생태계호흡에서 비근권토양의 호흡을 뺀 것을 작물의 순광합성으로 간주하여, 상추 재배기간(52일) 동안의 CS구의 총 CO₂ flux에서 S구의 총 CO₂ flux를 뺀 것을 상추의 순광합성[C], CSB구의 총 CO₂ flux에서 SB구의 총 CO₂ flux를 뺀 것을 바이오차 시용에 의한 상추의 순광합성[CB]으로 추정하면, 청상추의 순광합성은 바이오차 시용에 의해 2.9배 증가함(그림 125b)
- 즉, 52일간의 작물재배 기간 동안, 바이오차 시용은 토양, 작물 및 생태계 호흡 모두 유의하게 2.6-3.1배 증가시킴
- 2016년과 2018년의 실험 결과, 토양(비근권) 호흡, 작물의 순광합성 및 토양/작물과 대기 사이의 생태계호흡(-NEE) = NEP)에 대한 바이오차 효과는 바이오차, 토양 및 작물의 특성, 재배 시기 등에 따라 다르게 나타나는 것으로 판단됨
- 그럼에도 불구하고 일관되게 50일간의 재배기간 동안 바이오차 시용에 의해 토양(비근권) 호흡이 크게 증가하였고(2016년과 2018년 각각 1.5배, 3.1배), 이 증분은 53t ha⁻¹에 상당하는 대단히 높은 바이오차 시용량으로 토양에 유입된 탄소의 0.003% 미만에 불과함
- 더욱이, 2016년에는 바이오매스의 증가가 나타나지 않았으나, 2018년에는 질소를 시비하지 않았음에도 바이오차 단독 시용으로 청상추의 바이오매스가 크게 증가되어 순광합성에 의해 흡수된 CO₂의 증분이 토양호흡에 의해 배출된 CO₂의 증분을 상회하여, 결국 대기로부터의 CO₂ 흡수를 2.6배 증가시킴
- 따라서 본 연구결과는 바이오차가 농생태계에서 탄소를 격리시키면서 동시에 작물수량을 증진시킬 수 있는 가능성이 있음을 제시함
- 그러나 향후, 후속 연구과제에서는 야외 실험장의 단순한 토양과 달리 훨씬 복잡한 농생태계의 토양권역의 포장에서 바이오차 효과를 장기적으로 반드시 상호검증 및 비교 검토할 필요가 있음

제 5 절 연구수행 결론

가. 농어부산물 바이오숯 제조기술 및 성형기술

- 농업부산물 등 5종의 바이오매스의 열분해 결과 열분해 온도 상승에 따라 바이오숯의 생산 수율이 떨어졌으며 특히 400℃에서 생산 수율 약 평균 30%로 급격하게 떨어졌음
- 바이오숯의 pH 및 탄소함량은 열분해 온도가 높아질수록 상승하는 경향을 나타냄
- 바이오숯 분석결과 질소, 인산, 가리 등 함유된 양분이 충분하고 중금속 함량도 낮아 비료 사용에 적합한 것을 확인하였음
- 하지만 생산량 및 생산수율이 낮아 본 실험에 사용하지 못함
- 바이오숯과 미강, 유박 등 기타 원료들을 혼합 후 pellet 성형기를 통하여 pellet 제형함
- 또한 기존 분자요리 및 의학기술에 사용되던 Ca-alginate capsule 성형방법을 적용하여 bead 형태로 성형할 수 있었음

나. 바이오숯 기반 시제품 개발

- 예비실험 결과 바이오숯 처리 후 작물의 생육 변화는 작물별로 차이가 있었으나 작물 생육에 부적정인 영향이 많았으며 이는 바이오숯이 토양 pH를 극단적으로 높여 특정 양분 공급에 영향을 미친 것으로 사료됨
- 따라서 바이오숯의 pH를 비료에 적합한 pH로 조절하기 위해 기타 유기질비료를 첨가한 시제품을 제작하였으며 시제품을 처리한 결과 시제품 처리량이 높아질수록 작물의 생육이 좋았음
- 이를 바탕으로 시제품 3종의 컨셉을 아래와 같이 설정하였으며 이에 따라 시제품 3종을 개발하였음
 - 1) 유기질비료(pellet): 바이오 숯이 첨가된 식물성 유기질비료
 - 질소, 인산, 가리 3종의 합이 7% 이상
 - 유기물함량 60% 이상
 - 바이오 숯 30% 이상
 - Pellet 형태
 - 구성: 바이오숯 30% + 아주까리유박 50% + 커피박 10% + 미강 10%
 - 2) Ca 비료(bead): Ca-Alginate 제형법으로 제작한 구슬형태의 비료
 - 조성: 바이오숯 40 + sodium alginate 1.5 + Ca(NO₃)₂ 1.0

- 3) 퇴비(powder): 퇴비와 바이오 숯을 혼합한 동물성 유기질 비료
 - 유기물 30% 이상
 - C/N율 45% 이하
 - 구성: 바이오숯 20% + 계분 8% + 돈분 32% + 수피 40%
- 상기 3종의 시제품 중 유기질비료의 spec 중 질산, 인산, 가리 함량의 목표는 달성하지 못하였으나 근접하였으며 추가 실험을 통하여 달성할 예정임

다. 시제품 작물 생육 평가

- 시제품 pellet은 관행시비와 동시에 사용하였을 경우 오히려 작물의 생육이 떨어졌으며 powder는 동시에 사용하였을 때 더 좋은 결과를 나타냄
- 상추, 배추와 같은 엽채류의 생체중 및 건물중은 시제품 powder 5% 에서 가장 좋았음
- 고추, 토마토, 가지와 같은 과채류의 생육은 pellet, powder 시험구에서 비슷한 수준으로 나타남
- 시제품 pellet은 시제품 powder보다 바이오숯 함량이 높아 비효는 낮았으나 토양 중 탄소의 함량은 높았음
- 개발된 3종의 시제품을 6종의 작물에 적용하여 평가한 결과 기존 관행 시비와 비슷하거나 좋은 결과를 보였음

라. 시제품 토양 변화 및 중금속 안정화

- 일반 밭 토양의 pH는 시제품 처리 전 6.4에서 처리 후 7.5 전후로 상승하였으며 처리 전 7.2이었던 토양에서는 최대 8.9까지 상승하였음
 - 일반 농경지 토양에 적합하나 pH가 높은 토양에서는 작물 생육에 부정적인 영향을 미칠 수 있음
- 토양의 EC는 시제품 처리 전 0.16dS/m에서 시제품 처리 후 1.0dS/m 전후에서 최대 1.9dS/m까지 상승하였음
- 토양 중 질소의 함량은 시제품 처리전 0.6dS/m에서 시제품 처리 후 1.0dS/m 수준으로 최대 2배가량 증가하였음
- 토양 중 유효인산의 함량은 시제품 powder 5% 처리 후 최대 10배 증가하였으나 가리의 함량은 큰 변화가 없었음
- 토양 중 Ca 함량은 powder, bead 시제품 처리 후 큰 변화가 없었지만 Ca 비료 킨 썬인 bead 처리 후 최대 2배가량 증가하였음
- 바이오숯 기반 시제품은 토양 중 pH 개량 및 작물 생육에 필요한 질소, 인산, 가리 및 Ca 공급이 가능하였음
- 중금속 토양에 시제품을 처리한 결과 토양 중 유효태 중금속 함량은 아래와 같이

저감된 것을 확인할 수 있었음

- 토양 중 유효태 Cd 함량은 대조구 대비 최대 89.8%(powder 5%) 감소
- 토양 중 유효태 Cu 함량은 대조구 대비 최대 96.0%(powder 5%) 감소
- 토양 중 유효태 Ni 함량은 대조구 대비 최대 83.9%(pellet 5%) 감소
- 토양 중 유효태 Pb 함량은 대조구 대비 최대 100.0%(powder, pellet, bead 5%) 감소
- 토양 중 유효태 Zn 함량은 대조구 대비 최대 94.6%(pellet 5%) 감소

마. CO₂ flux 및 교환수지 평가

- 바이오숯 시용 후, 농작물 재배기간 동안에 CO₂ flux는 무시용구 대비 토양, 작물 및 생태계 호흡 모두 유의하게 2.6-3.1배 증가하였음
- 토양(비근권)호흡, 작물의 순광합성 및 토양/작물과 대기 사이의 생태계 호흡(-NEE = NEP)에 대한 바이오숯의 효과는 바이오숯의 원료성분 및 투입량, 토양 및 작물의 특성, 재배 시기 등에 따라 다르게 나타나는 것으로 판단되어 향후, 후속 연구에서는 농생태계(대기-농작물-토양)의 다양한 토양권역의 포장에서 바이오숯 시용 후, 장기적으로 야외 현장 측정실험을 연속 수행하여 상호검증 및 검토가 필요함
- 토양 중에 특별한 비료 또는 퇴비를 시비하지 않았으나 바이오숯 단독 시용처리로 인한 농작물의 바이오매스 증가로 순광합성에 의해 흡수된 CO₂ 증분이 토양 호흡에 의해 배출된 CO₂를 상회하여 대기로부터의 CO₂ 흡수를 2.6배 증가시킴
- 바이오숯 처리에 대한 CO₂ flux 및 교환수지 평가결과, 농생태계(대기-농작물-토양)에서 바이오숯의 탄소격리 효과를 확인 할 수 있었으며 동시에 농작물의 생산성을 증진시킬 수 있는 가능성을 제시함

라. 탄소오프셋 방법론

- 바이오차 생산량 1톤당 1.41 tCO₂를 고정할 수 있으며 1년에 960톤 생산시 연간 1.351tCO₂ 감축 가능
- 한국거래서 고지누 KOC(상쇄배출권) 단가 22,000원으로 거래시 연간 29,720천원의 수익이 발생함

제 3 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제 1 절 연구개발 목표

- 본 연구는 기후변화 대응기술로 주목받고 있는 바이오숯(biochar)를 활용하여 농작물 6종의 저탄소 작물재배기술을 개발하고 전과정평가, 현장실증을 통한 기술의 경제성 및 환경성 평가를 목표로 함.
- 본 연구는 상기 목표를 달성하기 위해 ①농업부산물 활용 바이오숯 제조기술, ②바이오숯 기반 미생물 담체화 기술, ③바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술, ④Carbon Flux Chamber 활용 탄소흡수 평가기술을 개발하고, 상기 기술개발을 통해 바이오숯 기반 유기질 비료(3종), 작물별 저탄소 작물재배 매뉴얼(1식), Carbon Flux Chamber(1종), 탄소흡수 방법론(1식)의 성과물을 도출하고자 함.
- 바이오숯을 활용한 저탄소 농업기술 개발을 위해 바이오숯 활용시 토양환경에 미치는 영향을 구명하기 위하여 토양 내 질소, 인 등의 양분수지와 생물학적 변화를 모니터링하고, 중금속 오염 토양에서 바이오숯에 의한 중금속 저감 효과를 평가함.
- 또한 기후변화 대응 요구도가 높은 농작물 6종을 선별하고 관행 대비 바이오숯 적용 농법시 농작물의 생산성 증대, 품질 향상 방안을 개발함.

제 2 절 목표 달성여부

- 본 연구는 바이오숯 기반 저탄소 농업기술 개발로 농업부산물 바이오숯 제조기술과 바이오숯을 이용한 시제품 3종을 개발함
- 또한 작물 6종(배추, 상추, 부추, 고추, 가지, 토마토)을 대상으로 시제품 3종의 시용 방법 등을 작성하였음
- 본 연구에서 개발된 시제품 3종은 탄소격리를 위한 제품으로 이를 구명하기 위하여 Carbon Flux Chamber를 제작하였음
- 본 연구 결과를 바탕으로 농업부산물로 제작한 바이오숯이 토양 중 탄소 격리효과가 있을 구명하여 탄소흡수 방법론을 작성하였음

목표	결과	달성률(%)
농업부산물 바이오숯 제조기술	농업부산물 등 5종의 바이오숯 제작 및 평가	100
바이오숯 기반 미생물 담체화		
바이오숯 기반 저탄소 작물재배기술	바이오숯 기반 농업기술 매뉴얼	100
Carbon Flux Chamber 활용 탄소흡수 평가기술		
유기질비료 3종	Powder, bead, pellet 형태의 3종 개발	100
Carbon Flux Chamber(1종)	Carbon Flux Chamber(1종) 개발 및 제작	100
탄소흡수 방법론(1식)	탄소흡수 방법론 작성	100

제 3 절 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책

- 본 과제 목표 중 달성하지 못한 바이오숯 기반 미생물 담체화는 현재 수행 중에 있음
- 본 과제 진행 중 바이오숯을 이용하여 bead 형태의 담체 제작에는 성공하였으나 목표 미생물의 담체로 사용하기는 적합하지 않았음
- 이는 bead 제작 후 담체의 EC가 높아져 미생물이 서식할 수 없었으며 이에 대한 대책으로 바이오숯 bead가 아닌 바이오숯 자체를 담체화할 계획임

제 4 장 연구결과의 활용 계획 등

제 1 절 연구결과 활용 계획

가. 바이오숯 제조 기술

- 본 연구결과 농업부산물을 이용한 바이오숯 제조에는 다음과 같은 문제가 있음을 알 수 있었음
- 첫째 농업부산물 수급시기 및 수급량이 한정적임
 - 농업부산물은 농작물의 재배가 끝난 후 발생하기 때문에 작물재배 시기에 맞춰 수급해야하며 그 수량이 많지 않음
 - 또한 국내 농작물은 전국 각지에 분포되어 생산되기 때문에 충분한 농업부산물을 수급하기 위해서는 전국 범위에서 수급해야함
 - 따라서 특정 농업부산물 바이오숯을 이용한 제품은 특정 시기에만 생산이 가능함
- 둘째 바이오숯의 생산 수율 및 생산량이 낮음
 - 본 연구를 통하여 비료로 사용가능한 바이오숯의 열분해 온도는 400°C 이상으로 그 수율은 약 30%임
 - 따라서 1톤의 농업부산물을 열분해할 경우 약 300kg의 바이오숯을 생산할 수 있음
 - 300kg의 바이오숯을 이용하여 시제품을 제작할 1,500L 약 700kg의 시제품을 생산할 수 있음
 - 또한 바이오숯을 대량으로 생산하기 위한 설비가 국내에 없음
- 상기의 문제점을 해결하고 바이오숯을 제품화 혹은 사업화하기 위해서 지속적인 연구가 필요함
- 따라서 본 과제의 결과를 바탕으로 바이오숯의 효율적인 생산방법 및 사업화와 관련된 추가 연구를 계획 중임

나. 시제품 3종 및 작물별 저탄소 작물재배 매뉴얼

- 본 과제에서 개발한 3종의 바이오숯 기반 시제품은 6종의 작물에 대하여 작물 생산량 증대 및 CO2 저감 효과를 구명하였음
- 시제품의 부족한 부분은 내부 연구를 통하여 개량하여 비료공정규격에 적합하게 제품을 보완할 계획임

- 개량된 시제품은 비료 등록을 진행하여 공식적으로 유기질비료로 인정받아 제품 판매에 문제가 없도록 함
- 이 후 시제품 3종의 판매를 위하여 판매가 선정, 생산 라인 확보, 홍보 자료 제작 등을 진행할 계획임
- 판매가 준비된 제품은 일반 농가 및 도시농업 농가를 대상으로 유통업체 혹은 직접 유통을 통하여 제품을 판매함
- 저탄소 작물재배 매뉴얼 중 시제품에 대한 일부분은 시제품의 홍보자료 등으로 사용함

다. CO2 flux chamber

- 본 연구에서 개발 및 제작한 CO2 flux chamber는 용량이 크지 않아 다양한 작물에 대한 연구가 어려웠음
- 따라서 다양한 작물의 재배를 위하여 CO2 flux chamber의 용량 증대 및 기타 보완 사항 등을 개량함
- 이 후 CO2 flux chamber는 향후 바이오숯 및 기타 농업 부문 탄소 배출 관련 연구에 사용함

라. 탄소흡수 방법론

- 본 탄소흡수 방법론으로 바이오숯 기반 저탄소 비료 3종을 생산·판매시 탄소배출권을 확보할 수 있음
- 국내 농업부문 탄소 배출량 감량에 기여
- 국내·외 농업부문 바이오 숯을 이용한 탄소 흡수 방법론 개발에 기여

붙임. 참고문헌

- Bai M, Wilske B, Buegger F, Esperschütz J, Kammann C I, Eckhardt C, Koestler M, Kraft P, Bach M, Frede H G, Breuer L. 2013. Degradation kinetics of biochar from pyrolysis and hydrothermal carbonization in temperate soils. *Plant Soil*. 372: 375-387.
- Bruun E W, Ambus P, Egsgaard H, Hauggaard-Nielsen H. 2012. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biol Biochem*. 46: 73-79.
- Case S D C, Mcnamara N P, Reay D S, Whitaker J. 2014. Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a *Miscanthus* bioenergy crop? *Global Change Biology Bioenergy*. 6: 76-89.
- Farrell M, Macdonald L M, Baldock J A. 2015. Biochar differentially affects the cycling and partitioning of low molecular weight carbon in contrasting soils. *Soil Biol Biochem*. 80: 79-88.
- Lanza G, Wirth S, Gessler A, Kern J. 2015. Short-term response of soil respiration to addition of chars: Impact of fermentation post-processing and mineral nitrogen. *Pedosphere*. 25(5): 761-769.
- Sagrilo E, Jeffery S, Hoffland E, Kuyper T W. 2014. Emission of CO₂ from biochar-amended soils and implications for soil organic carbon. *GCB Bioenergy*. doi:10.1111/gcbb.12234.
- Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S, Vedove G D, Fornasier F, Liu J, Peressotti A. 2011. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study. *Appl Soil Ecol*. 50: 45-51.