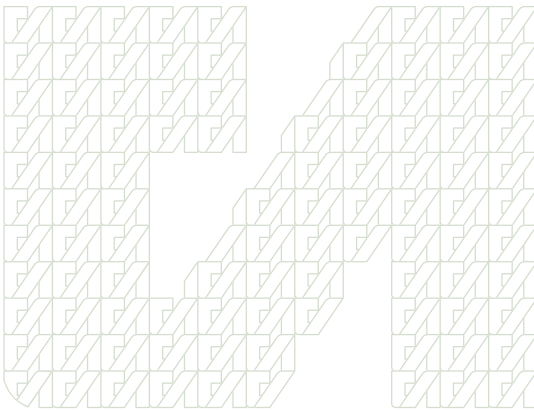


온실가스 감축을 위한 바이오차(Biochar) 활용방안 기초연구

이 윤 희



기본연구 2022-12

온실가스 감축을 위한 바이오차(Biochar) 활용방안 기초연구

이 윤 희

연구책임

• 이윤희 / 세종연구실 책임연구위원

기본연구 2022-12

온실가스 감축을 위한 바이오차(Biochar) 활용방안 기초연구

발행인 박 노 동

발행일 2022년 11월

발행처 대전세종연구원

34863 대전광역시 유성구 전민로37(문지동)

전화 : 042-530-3500 팩스 : 042-530-3528

홈페이지 : <http://www.dsi.re.kr>

인쇄 : 삼성디자인기획 TEL 042-221-3111 FAX 042-221-5116

ISBN : 979-11-6075-335-6(93350)

이 보고서의 내용은 연구책임자의 견해로서 대전광역시와 세종특별자치시의 정책적
입장과는 다를 수 있습니다.

출처를 밝히는 한 자유로이 인용할 수 있으나 무단 전재나 복제는 금합니다.

요약 및 정책건의

■ 연구 배경과 연구 목적

- (지구온난화로 인한 기후변화) 기후변화 영향으로 인한 가뭄, 홍수 등 기상 이변 및 생태계 변화 등의 문제가 국제적인 이슈임
 - 평균 지표 온도가 상승함에 따라 폭염의 발생 빈도와 강도 역시 증가하여 계절 간 강수량과 기온의 차이가 더욱 극명해질 것으로 전망함
- (국제적 대응) 파리협약을 통해 산업화 이전과 대비하여 지구 평균기온 상승을 2℃보다 낮은 수준으로 유지키로 협약하고, 각국은 1.5℃ 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하기로 함
 - 기후변화협약 당사국총회(COP26)에서 메탄 감축을 위한 ‘국제메탄서약’을 출범함(2021.11)
- (국내 대응) 국가 차원의 ‘넷제로(Net zero) 2050’, ‘그린뉴딜’, ‘탄소중립’ 선언으로 농업부문 탄소중립 관련 제도 개선 및 관리방안 마련 등 정책적 관심이 높아짐
 - 농축산 부문의 온실가스 배출량 감축 수단으로 ‘바이오차(Biochar)’의 활용이 신규 기술로 제시됨
- (연구 목적) 세종시 2050 탄소중립 이행을 위한 온실가스 감축수단의 하나로 바이오차(Biochar)의 적용 가능성 및 활용방안에 대해 검토해 보고자 함

■ 연구 방법

- 바이오차 연구동향 및 기술 등에 대한 문헌연구
- 바이오차의 국내외 활용사례 조사
- 세종시 가축분뇨 및 농업부산물 등 유기물 발생현황 조사 등
- 바이오차 활용방안 및 온실가스 감축 효과 검토

■ 연구 결과

□ 바이오차 개념 및 탄소감축 원리

- (개념) 바이오차(Biochar)란? 바이오매스(biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로 농업부산물, 목재 등을 300~350℃ 이상의 온도에서 산소 없이 열분해하여 만든 숯 형태의 유기물(탄소 함량이 높은 고형물)을 말하며, 토양 살포 시 토양 내 탄소저장 효과가 있음
- (원리) 바이오매스가 열로 분해되어 바이오차가 되는 경우 바이오매스에 고정된 탄소가 상당 부분 바이오차에 남게 되어(약 80%), 미생물에 대한 분해나 화학적 변화가 거의 일어나지 않아 오랫동안 탄소를 토양 내에 잡아 둘 수 있음

□ 바이오차 관련 선행연구

- (작물 생산성 증대 기술) 다공성 구조로 토양에 사용시 토양의 통기성과 수분 보유력 등을 증대시킴으로 농업생산성을 증대시키는 효과(약 35%)가 있는 것으로 보고됨
- (바이오차 연료화 기술) 음식물쓰레기를 활용하여 바이오차를 청정 고품 재생연료(Bio-SRF ; Solid Refuse Fuel)로 활용한 연구 사례임
- (탄소격리 기술) 바이오차를 적용한 토양에서 약 10% 정도의 CO₂ 배출량이 저감되는 효과가 있는 것으로 보고됨

□ 바이오차 활용사례

- 국내 바이오차 활용사례로 충북 괴산군의 ‘바이오차 활용 토양환경개선 사업’, 충북 진천군의 ‘목재연료 활용 친환경에너지 공급시설 구축사업’, 강원도 농업기술원·한국남동발전의 ‘목재펠릿 연료 발전소 구축 사업’, (주)한빛에코텍의 ‘우분을 활용한 바이오차 생산’ 사례가 보고됨
- 국외 바이오차 활용사례로는 일본의 ‘쿨베지 프로젝트’, 독일 베를린 식물원의 ‘테라보가 프로젝트’, 미국의 “록키산맥 재건 BANR 프로젝트” 등이 보고됨

□ 바이오차 생산 가능량

- 바이오차 생산을 위한 대상 바이오매스는 가축분뇨, 하수슬러지, 농업 부산물로 한정하였으며, 각각의 원료에 대한 바이오차 생산 가능량은 아래와 같음
 - (가축분뇨) 2019년 기준 우분 발생량은 315.9톤/일이며, 이 중 50%를 바이오차 생산을 위한 원료로 가정할 경우 바이오차 생산 가능량은 31.6톤/일로 산정됨
 - (하수슬러지) 2021년 기준 하수슬러지 발생량은 30,455톤/년이며, 이를 바이오차 생산에 활용하면 7,614톤/년의 바이오차 생산이 가능함
 - (농업부산물) 농업부산물의 종류가 다양하고 이와 관련한 연구사례가 없어 정확한 바이오차 생산량을 산정하기 어려운 한계가 있음

□ 바이오차 활용방안

- (농경지 토양개량제로 활용) 토양환경을 토양개량제 투입을 통해 개선할 수 있으며, 토양개량제로써 바이오차는 작물 생산성 제고에 효과가 있음
 - 바이오차의 농경지 주입 주기 및 투입량은 토성 및 재배작물 등에 따라 달라질 수 있으므로 세부적인 연구를 통해 그 기준을 마련할 필요가 있음
- (지하수 및 하천수 등으로의 양분유출 저감수단으로 활용) 수질오염총량관리 측면에서 접근했을 때 농경지 자체를 토지계 비점저감시설로 활용하는 방안을 고려할 수 있음
 - 지하수 및 하천수 등으로의 유출저감 효과 및 토지계 수질오염삭감계수로 활용되기 위한 상세 연구가 필요함
- (재생에너지원으로 활용) 바이오매스를 탄소가 농축된 고열량의 바이오차로 가공하여, 청정고형 재생연료로 활용하는 방안임
 - 고형연료제품의 품질기준을 강화하여 연료화에 대한 가능성을 제고할 필요가 있음

가축분뇨 · 하수슬러지 · 농업부산물을 활용하여 바이오차 생산



[세종시 바이오차 활용방안]

□ 바이오차 생산에 따른 온실가스 감축 효과

- 가축분 바이오차 1톤은 온실가스 1.95~2.85톤 CO₂eq.을 감축할 수 있을 것으로 예상되며, 이는 왕겨 바이오차 1.24톤 CO₂eq., 목질계 바이오차 0.95톤 CO₂eq.보다 온실가스 감축 효과가 높을 것으로 보임
- 건조슬러지 1톤을 기존 석탄화력의 보조연료로 사용할 경우, 0.599톤 CO₂eq.의 온실가스 감축효과 있을 것으로 기대함

■ 정책제언

□ 세종시 작물재배 특성을 고려한 상세 연구 추진

- 세종시 작물재배 종류 및 농경지 토성 등을 확인하고 적절한 주입량 및 주입 주기의 결정을 위한 연구를 추진할 필요가 있음

□ 세종농업기술센터와 연계한 시범사업 추진

- 세종시 농업기술센터와 연계하여 바이오차 투입 시범사업을 우선 추진 해보는 것을 제안하며, 시범사업 추진을 통해 세종농업기술센터 및 세종시의 친환경농업 실천 이미지 제고에도 효과가 있을 것으로 판단됨

□ 바이오차 생산 및 취급을 위한 가이드라인 마련

- 바이오차의 효율적이고 안전한 사용을 위해 세종시의 환경여건을 고려하여 바이오차 생산 및 취급에 대한 가이드라인을 마련할 필요가 있음

차 례

제1장 서론	3
제1절 연구배경 및 목적	3
1. 배경 및 필요성	3
2. 연구 목적	6
제2절 연구방법 및 내용	7
1. 연구방법	7
2. 주요 연구내용	7
3. 연구수행 체계	7
4. 연구결과의 활용 및 기대효과	8
제2장 바이오차의 개념 및 관련 정책 동향	11
제1절 바이오차(Biochar)란?	11
1. 바이오차의 개념과 특성	11
2. 바이오차의 탄소감축 원리	14
3. 바이오차 원료 및 제조 과정	15
제2절 정책동향	19
1. 농업분야 탄소중립 국가 기본방향	19
제3장 바이오차 관련 연구 및 활용사례	27
제1절 선행연구	27
1. 바이오차의 활용을 통한 토양개량 및 농업 생산량 증대	27
2. 바이오차의 연료화 기술	29
3. 바이오차의 탄소저장에 따른 온실가스 저감	31
4. 바이오차의 축사 깔짚 활용 가능성 연구	33
제2절 국내외 바이오차 활용사례	34
1. 국내 활용사례	34

2. 국외 활용사례	38
제3절 국내 바이오차 생산시설 현황	44
제4장 바이오차 활용방안	51
제1절 방향 설정	51
제2절 바이오차 활용방안	52
1. 세종시 바이오차 생산 가능량 검토	52
2. 농경지 토양개량제로 활용	58
3. 지하수 및 하천수 등으로의 양분유출 저감수단으로 활용	61
4. 재생에너지원으로 활용	62
제3절 바이오차 생산에 따른 온실가스 저감효과	63
1. 세종시 농업부문 온실가스 배출량	63
2. 바이오차 생산에 따른 온실가스 감축 효과	66
제5장 결 론	71
제1절 종합	71
제2절 정책제언	76
참고문헌	78

표 차례

[표 2-1] 바이오매스의 구분 및 원료	11
[표 2-2] 농축수산부문 온실가스 감축 수단	22
[표 3-1] 충청북도 괴산군 시설하우스 토양 개발 사업	35
[표 3-2] 강원도·한국남동발전 협약을 통한 바이오차 농가 보급	37
[표 3-3] 일본 농가의 ‘쿨베지 프로젝트’ 내용	39
[표 3-4] 독일 베를린 식물원의 바이오차	40
[표 3-5] 미국 록키산맥 재건 BANR 프로젝트	42
[표 3-6] 미국 시카고, 가로수 생육을 위한 바이오차 적용 사례	43
[표 3-7] 전국 바이오차 생산시설 운영 현황	44
[표 4-1] 세종시 축종별 가축분뇨 발생량	52
[표 4-2] 세종시 처리장별 하수슬러지 발생량	54
[표 4-3] 세종시 논벼 부산물 발생량	56
[표 4-4] 세종시 농산바이오매스 발생 현황	57
[표 4-5] 세종시 농경지 면적	60
[표 4-6] 세종시 분야별 온실가스 배출 변화 추이	63
[표 4-7] 세종시 농축산 부문 유형별 온실가스 배출량	65
[표 4-8] 세종시 가축별 분뇨처리 온실가스 배출량	65
[표 4-9] 농경지 2050 온실가스 감축 목표	66

그림 차례

[그림 1-1] 지구의 평균 지표 온도 및 해수면 상승 변화	3
[그림 1-2] 연도별 폭염 발생 빈도와 강도(1973~2019)	4
[그림 1-3] 산업화 이전 대비 지구온도 상승 추이	5
[그림 1-4] 연구수행 체계 및 구성	8
[그림 2-1] 바이오차 개념	12
[그림 2-2] 바이오차의 물리·화학적 특성	13
[그림 2-3] 열분해 공정을 통해 발생하는 바이오매스 부산물	13
[그림 2-4] 바이오차의 기후변화 저감 원리	14
[그림 2-5] 농축산계 바이오매스 연료와 이로부터 생산된 바이오차	15
[그림 2-6] 산림 바이오매스(낙엽) 활용 사례	16
[그림 2-7] 열분해를 통한 바이오매스의 바이오차의 제조 공정	18
[그림 2-8] 국가 2030 NDC 목표 설정	19
[그림 2-9] 농업분야 온실가스 발생 추이	20
[그림 2-10] 농업분야 배출원별 온실가스 배출량 추이(1990~2018)	21
[그림 2-11] 탄소중립 시대의 축산업 선진화 개념과 방안	23
[그림 3-1] 경상남도농업기술원이 개발한 바이오차 예시	28
[그림 3-2] 경남농업기술원의 바이오차를 이용한 상추 재배실험 결과	28
[그림 3-3] 한경대학교, 바이오차 토양개량제를 이용한 딸기 재배실험 예시	29
[그림 3-4] 한국건설기술연구원, 음식물쓰레기를 활용한 바이오차 생산시설 공정	30
[그림 3-5] 음식물쓰레기의 바이오차 Test-Bed 생산시설	31
[그림 3-6] 바이오차 혼합과 비혼합에 따른 CO ₂ 배출량 비교	33
[그림 3-7] 괴산군 바이오차를 활용한 토양환경 개선	34

[그림 3-8] 진천군 바이오차를 활용한 친환경 에너지 공급망 개요도	35
[그림 3-9] 강원도농업기술원·한국남동발전 협약 체결식	36
[그림 3-10] ㈜한빛에코텍 소형 바이오차 생산 기계 예시	37
[그림 3-11] 일본의 ‘쿨베지 프로젝트’ 사례	38
[그림 3-12] 독일 베를린 식물원의 바이오차 생산 및 퇴비화 과정	40
[그림 3-13] 록키산맥 병충해 피해 및 바이오차 원료 생산과정	41
[그림 3-14] 코엔바이오 바이오차 생산시설 공정도	45
[그림 3-15] 바이오차테크의 바이오차 생산시설	46
[그림 3-16] 유기산업의 바이오차 생산시설 및 TLUD 공정과정	46
[그림 3-17] 국내 바이오차 생산시설 위치	47
[그림 3-18] 생산된 바이오차 생산품 예시 및 살포 사진	47
[그림 4-1] 세종시 바이오차 활용방안	51
[그림 4-2] 2019년 기준 세종시 가축분뇨 발생량	53
[그림 4-3] 퇴비와 바이오차의 주요 특성 비교	54
[그림 4-4] 하수슬러지와 바이오차 혼합 실험 결과	55
[그림 4-5] 국내 바이오매스 자원량 지도	57
[그림 4-6] 한국지질도	58
[그림 4-7] 흙토람 홈페이지를 통한 토양검정정보 확인 예시	59
[그림 4-8] 세종시 온실가스 배출 현황	64
[그림 4-9] 하수슬러지를 활용하여 바이오차 생산 시 온실가스 감축량	67

서론

제1절 연구배경 및 목적
제2절 연구방법 및 내용

1장

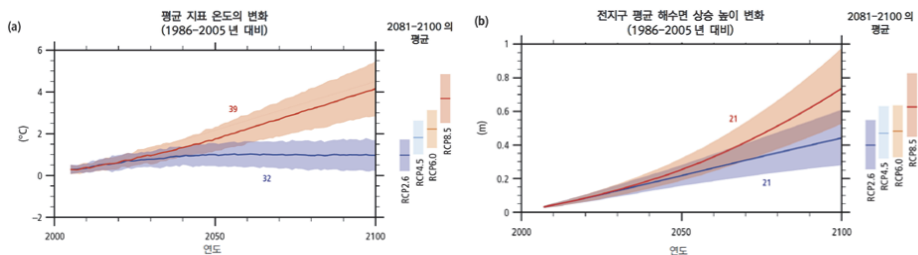
제1장 서론

제1절 연구배경 및 목적

1. 배경 및 필요성

■ 지구온난화로 인한 기후변화

- 지구온난화로 인한 기후변화 현상은 현재 가장 뚜렷한 국제적인 환경문제로 꼽히고 있으며, 기후변화 영향으로 인한 가뭄, 홍수 등 기상 이변 및 생태계 변화 등의 문제가 다수 보고되고 있음
- IPCC 제5차 평가 종합보고서에 따르면 1880년~2012년까지 지구의 연평균 기온은 0.85℃ 상승하였으며, 지구 평균 해수면은 19cm 상승하였음
- 우리나라의 경우 2009년~2018년까지 기상재해로 20만 명의 이재민이 발생하였고, 약 12조 원의 경제적 손실을 유발함¹⁾

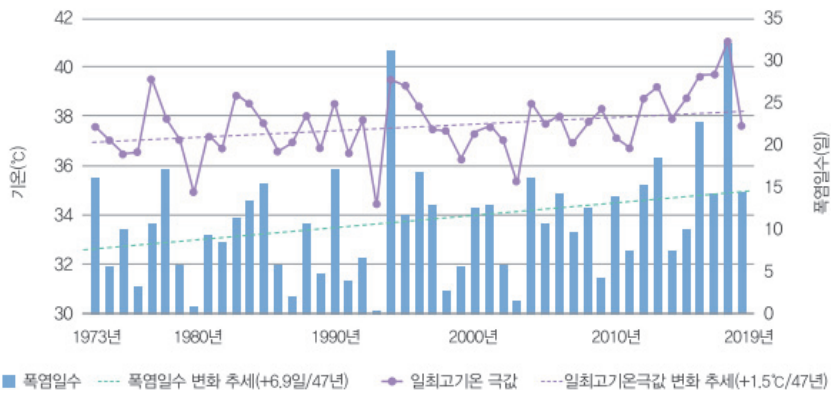


(a) 평균 지표 온도의 변화 (b) 평균 해수면 상승 높이 변화
자료 : 기상청(2015), IPCC 제5차 평가 종합보고서

[그림 1-1] 지구의 평균 지표 온도 및 해수면 상승 변화

1) 기후변화 홍보 포털

- IPCC 제5차 평가 종합 보고서(2014)에 따르면, 기후변화가 가속화되고 있음을 전망하고 있으며, 현재의 평균기온 상승률을 고려할 때 21세기 말 지구 평균기온은 3.7℃, 해수면은 63cm가 상승할 것으로 예상함
- 평균 지표 온도가 상승함에 따라 폭염의 발생 빈도와 강도 역시 증가하여 계절 간 강수량과 기온의 차이가 더욱 극명해질 것으로 전망함

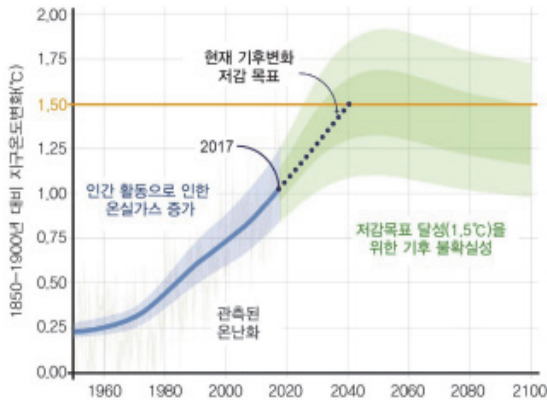


자료 : 기후변화홍보포털

[그림 1-2] 연도별 폭염 발생 빈도와 강도(1973~2019)

■ 국제적 대응

- 지구온난화에 따라 국제사회가 기후변화 문제 심각성을 인지하면서 1992년 UN기후변화협약을 시작으로 2015년 파리협정이 채택되었고, 신기후체제 기반이 마련됨
 - 우리나라의 경우 지난 1993년 12월에 47번째 국가로 UN기후변화협약에 가입함
- 파리협약을 통해 산업화 이전과 대비하여 지구 평균기온 상승을 2℃보다 낮은 수준으로 유지키로 협약하고, 각국은 1.5℃ 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하기로 함



자료 : 환경부(2010), 「지구온난화 원인과 대책」

[그림 1-3] 산업화 이전 대비 지구온도 상승 추이

- 최근 코로나19 팬데믹 영향으로 기후변화 대응에 관한 관심이 고조됨에 따라 기후변화협약 당사국총회(COP26)에서 지구 온도 상승 억제를 위한 온실가스 감축 의지를 재확인하고, 메탄 감축을 위한 ‘국제메탄서약²⁾’을 출범함(2021.11)
 - 국제메탄서약을 준수할 경우 2050년까지 예상되는 온난화 대비 최소 0.2°C 정도를 줄일 수 있음³⁾
 - 농업에서 메탄 배출원은 주로 가축사육, 벼농사 등이며, 특히 가축은 농업에서 발생하는 온실가스 생산량의 약 60%를 차지함
 - 작물의 재배, 가축의 사육, 식품의 제조와 유통에 이르기까지 메탄 배출을 감축하기 위한 정책적, 환경적 압력이 거세질 것으로 전망됨
- 세계적으로도 ‘넷제로(Net Zero) 2050’, ‘그린뉴딜’ 및 ‘탄소중립 시나리오’ 추진으로 농업의 공익적 가치 제고와 친환경성 확대 등 농업정책의 환경부문 정책 확대 요구가 되고 있음

2) 2030년까지 전 세계에서 배출되는 메탄 배출량을 2020년 대비 최소 30% 감축하기 위한 이니셔티브임. 미국과 EU의 주도로 2021년 11월 2일 영국 글래스고에서 출범식이 열렸으며 영국, 이탈리아, 인도네시아, 멕시코 등 24개국이 가입함(출처: 네이버 지식백과)

3) 전남인터넷신문 보도자료(2021.11.17.), “COP26 국제메탄서약의 농업적 의미”

- 따라서 농업 생산활동으로 인한 환경부하를 최소화하고 나아가 지역 환경보전은 물론 농업의 지속가능성을 제고하는 것은 필수과제라 할 수 있음

■ 국내 대응

- 국내외 탄소중립을 위한 정책들이 수립되면서, 우리나라 역시 최근 법적기반인 『탄소중립기본법』을 제정하였고, 2030 NDC⁴⁾(국가온실가스 감축 목표)를 2018년 대비 40% 감축하는 상향(안)을 제시함
- 최근 국가 차원의 ‘넷제로(Net zero) 2050’, ‘그린뉴딜’, ‘탄소중립’ 선언으로 농업부문 탄소중립 관련 제도 개선 및 관리방안 마련 등 정책적 관심이 높아짐
- 2021.10월 탄소중립위원회는 2050 탄소중립 시나리오를 발표하였으며, 해당 시나리오에서 농축산 부문의 온실가스 배출량 감축 수단으로 ‘바이오차(Biochar)’의 활용이 신규 기술로 제시됨(2019년 IPCC에서 이산화탄소 배출저감 방안으로 승인)
 - 바이오차는 탄소함량이 높은 고형물로 토양 살포 시 토양 내 탄소저장 효과가 있음

2. 연구 목적

- 본 연구의 목적은 세종시 2050 탄소중립 이행을 위한 온실가스 감축수단의 하나로 바이오차(Biochar)의 적용 가능성 및 활용방안에 대해 검토해보고자 함

4) Nationally Determined Contribution, 기후변화 파리협정에 따라 당사국이 스스로 발표하는 국가 온실가스 감축목표

제2절 연구방법 및 내용

1. 연구방법

- 바이오차 연구동향 및 기술 등에 대한 문헌연구
- 바이오차의 국내외 활용사례 조사
- 세종시 가축분뇨 및 농업부산물 등 유기물 발생현황 조사 등

2. 주요 연구내용

- 국내외 바이오차 연구동향 및 관련 연구사례 조사
- 국내외 바이오차 활용사례 조사
- 세종시에서 활용 가능한 농업부산물 등 유기물 발생현황 조사·분석을 통한 바이오차 적용 가능성 검토
- 세종시 온실가스 감축을 위한 바이오차 활용방안

3. 연구수행 체계

- 본 연구는 크게 연구계획(제1장 서론), 동향 및 사례조사(제2장~3장), 활용방안 검토 및 결론(제4장~5장)의 3개 부문으로 구성되어 있으며, 각 장의 세부 내용은 다음과 같음
- 제1장 : 서론으로 연구의 배경 및 목적 등에 대해 기술함
- 제2장 : 바이오차의 개념 및 관련 정책동향을 조사·검토함
 - 바이오차의 개념과 특성, 탄소감축 원리, 바이오차 원료 및 제조 과정
 - 2050 탄소중립 시나리오 및 농축산 부문 추진전략 조사·검토 등

- 제3장 : 바이오차 관련 연구 및 국내외 활용사례 조사
 - 국내 : 충북 괴산군, 충북 진천군, 강원도 강릉시, 경기도 안성시 등
 - 국외 : 일본, 독일, 미국 등
- 제4장 : 온실가스 감축을 위한 바이오차 활용방안에 대한 검토
 - 가축분뇨, 하수슬러지, 농업부산물 등을 활용한 바이오차 생산 가능량 검토
 - 바이오차의 활용방안 및 활용에 따른 온실가스 저감효과 검토 등
- 제5장 : 결과의 종합 및 정책제언을 제시함

연구계획	01	서론	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연구배경 및 목적 ▪ 연구방법 및 내용
동향 및 사례조사	02	개념 및 관련 정책동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 바이오차의 개념과 특성, 바이오차 원료 및 제조 과정, 온실가스 감축 원리 및 효과 ▪ 2050 탄소중립 시나리오 및 농축산 부문 추진전략 조사·검토
	03	관련 연구 및 활용사례	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 바이오차 관련 연구사례(토양개량제, 연료화 등) ▪ 국내외 바이오차 활용사례 조사
활용방안 검토 및 결론	04	활용방안	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가축분뇨, 하수슬러지, 농업부산물 등을 활용한 바이오차 생산 가능량 검토 ▪ 바이오차의 활용방안 및 활용에 따른 온실가스 저감효과 검토
	05	결론	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 결과 종합 ▪ 정책 제언

[그림 1-4] 연구수행 체계 및 구성

4. 연구결과의 활용 및 기대효과

- 온실가스 감축을 위한 신기술 정보 축적 및 사업화 시 기초 자료로 활용 가능
- 세종시 2050 탄소중립 이행을 위한 온실가스 감축 수단의 기초 자료로 활용 가능

바이오차의 개념 및 관련 정책 동향

제1절 바이오차(Biochar)란?

제2절 정책동향

2장

제2장 바이오차의 개념 및 관련 정책 동향

제1절 바이오차(Biochar)란?

1. 바이오차의 개념과 특성

1) 바이오차의 개념⁵⁾

- 바이오차(Biochar)는 바이오매스(biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로 농업부산물, 목재 등을 300~350℃ 이상의 온도에서 산소 없이 열분해하여 만든 숯 형태의 유기물(탄소 함량이 높은 고형물)을 말하며, 토양 살포 시 토양 내 탄소저장 효과가 있음⁶⁾
- 바이오매스는 동·식물 및 미생물에서 만들어지는 분해성 유기물질을 뜻하며, 농작물뿐 아니라 임업 및 관련 부산물들, 각종 폐기물, 산업 관련 쓰레기의 유기물질을 포함함([표 2-1])
- 열분해 현상은 산소가 제한된 환경 속에서 해당 바이오매스에 고온 고압으로 힘을 가하면 일어나는데, 이런 열분해 과정을 통해 바이오매스가 바이오차로 만들어짐

[표 2-1] 바이오매스의 구분 및 원료

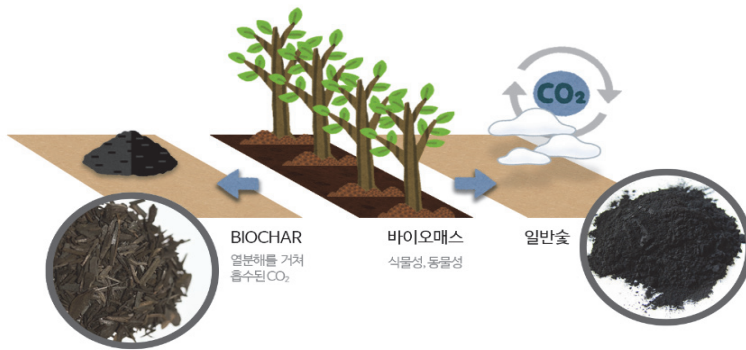
구분	내용
농업	• 곡물, 사탕수수, 옥수수 줄기, 짚, 씨앗 껍질, 견과류, 영장류의 배설물
숲	• 나무 폐기물, 나무껍질, 톱밥, 목재 슬래시 및 공장 스크랩
도시	• 하수슬러지, 쓰레기 유래 연료, 음식물쓰레기, 폐지
식물	• 포플러, 버드나무, 옥수수, 콩
생물	• 동물성 폐기물, 수생 생물종

자료 : Basu(2010), 「Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory」, AcademicPress

5) 한국바이오차(<https://kbiochar.com/>)

6) 관계부처 합동(2021.10.18.), 「2050 탄소중립 시나리오」

- 바이오차는 온실가스를 감소시키는 기능을 갖는 것은 99% 이상의 CO₂를 잡아두며, 또한 토양환경을 정화하는 능력이 있으며, 친환경적인 에너지까지 생성하는 것으로 보고되고 있음



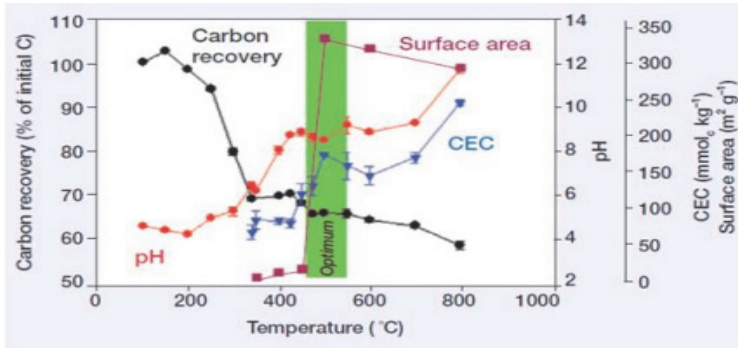
자료 : 한국바이오차(<https://kbiochar.com/>)

[그림 2-1] 바이오차 개념

2) 바이오차의 물리화학적 특성

- 바이오차는 생산 시 온도에 높은 영향을 받는데, 온도가 낮을수록 낮은 탄소, 높은 산소/탄소 비율, 높은 수소/탄소 비율의 원소 함량 특성을 가짐
- 높은 온도에서 제조된 바이오차는 산소와 수소 함량은 줄어들고 탄소의 함량은 증가하게 되는데, 이는 안정성이 높아지고 기공 및 표면적이 증가하는 효과를 가짐
- 제조시 온도가 증가할수록 바이오차의 pH 및 양이온 치환 능력이 향상되며, 수율이 낮아져 탄소의 함량은 증가하고 무기물 비율이 증가하는 효과가 있으나 반면 남아 있게 되는 탄소의 양 자체는 감소함
 - 낮은 온도에서 제조된 바이오차는 열분해 되지 않은 유기물질이 많아 토양에서 분해가 크게 일어나며, 단기적인 관점에서는 식물 성장에 도움을 줄 수 있음([그림 2-2])

- 열분해를 통해 원료 물질보다 입자의 크기는 줄어들게 되며 압력을 높이면 입자들의 응집이 일어나 입자의 크기는 증가하고 고체의 양 또한 증가함

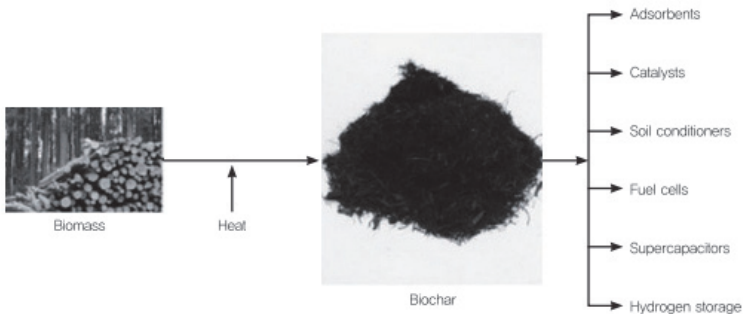


자료 : Lehmann(2007), 「A handful of carbon」

[그림 2-2] 바이오차의 물리·화학적 특성

3) 바이오차의 효과

- 바이오차를 토양에 주입시 공기의 순환을 증가시키고, 미생물의 거주지 역할을 하는 효과가 있으며, 토양 내 탄소 저장효과 및 토성 개선, 폐기물 관리, 환경오염 저감 등의 효과도 기대할 수 있음
- 열분해를 통해 가축분뇨에서 이산화탄소를 흡착하는 CCUS(탄소활용저장) 기술로, 65~89%의 탄소가 바이오차 안에 고정될 수 있어 농업 분야 탄소중립 달성을 위한 핵심 과제로 꼽히고 있음

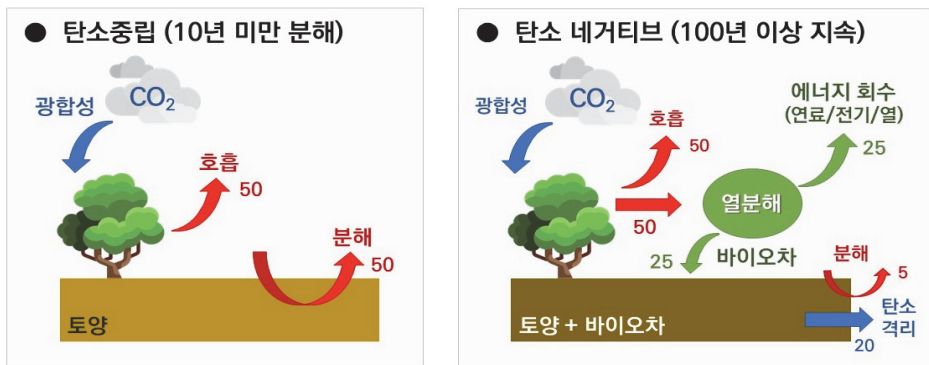


자료 : 관계부처 합동(2021.10.18.), 「2050 탄소중립 시나리오」

[그림 2-3] 열분해 공정을 통해 발생하는 바이오매스 부산물

2. 바이오차의 탄소감축 원리

- 바이오차는 Carbon Negative⁷⁾ 형태의 탄소격리 방법이라고 불리는데 이는 다른 바이오매스와 다르게 대기 중에 있는 탄소를 토양에 묶기 때문임
- 일반적으로 대기 중에 있는 CO₂는 식물의 광합성 과정을 통해 일부는 호흡을 통해 다시 배출되지 않고 생물량 증가로 이어짐
- 식물 생장에 따라 증가하게 된 바이오매스는 결과적으로 토양 미생물에 의해 분해되어 탄소는 CO₂나 CH₄ 등의 형태로 대기 중에 배출되므로, 탄소 순환과정으로 볼 수 있음
 - 탄소순환의 관점에서 보면, 대기 중 CO₂의 20% 정도를 토양에 반영구적으로 격리할 수 있으며 이는 온실가스 증가로 인한 기후변화의 원인인 CO₂를 다시 되돌려 보내는 방법으로 볼 수 있음
- 바이오매스가 열로 분해되어 바이오차가 되는 경우 바이오매스에 고정된 탄소가 상당 부분 바이오차에 남게 되어(약 80%), 미생물에 대한 분해나 화학적 변화가 거의 일어나지 않아 오랫동안 탄소를 토양 내에 잡아 둘 수 있음



자료 : Lehmann(2007), 「A handful of carbon」 내용 바탕으로 저자 재작성

[그림 2-4] 바이오차의 기후변화 저감 원리

7) 탄소 네거티브(Carbon Negative)란? 이산화탄소 배출 감축, 친환경/탄소 기술 투자 등을 통해 연간 배출한 탄소보다 더 많은 양을 대기에서 제거하거나 상쇄하는 행위

3. 바이오차 원료 및 제조 과정

1) 바이오차의 원료(바이오매스)의 종류

□ 농축산 바이오매스⁸⁾

- 농산 바이오매스의 종류에는 수도작의 경우 왕겨, 벃짚, 미강 등이 있고 전작과 특작은 줄기와 짚, 과수에서는 전정가지 등이 있음



자료 : 우승한(2021), 「바이오차(biochar)를 이용한 농림업부문 기후변화 대응 적용사례」

[그림 2-5] 농축산계 바이오매스 연료와 이로부터 생산된 바이오차

- 농산 바이오매스는 원형 또는 가공의 형태로 식용, 사료, 퇴비 등으로 이용되고 있음
 - 왕겨, 벃짚, 보릿대는 연소, 폐열 발전, 가스화 등에 사용될 수 있으며 채소 찌꺼기나 식품 찌꺼기는 CH₄의 발효나 퇴비 등에 이용 가능함
 - 미강, 쇠미, 청미 등은 가공하여 사료로 많이 이용 중이며, 과수 바이오매스인 전정된 가지는 파쇄 하여 퇴비로 사용하거나 원형의 상태로 빨감으로 사용되고 있음

8) 한국농촌경제연구원(2008), 「농산바이오매스 이용의 손익분기 규모와 이용 활성화 방향」

- 축산 바이오매스는 소, 돼지, 닭 등의 가축을 사육하는 과정에서 발생하는 생성물을 의미하며, 주로 가축분뇨를 지칭하며 도축과정에서 발생하는 가축, 털 등도 축산 바이오매스에 해당함

□ 산림 바이오매스

- 산림 바이오매스를 활용하여 열분해에 의한 액체연료 제조, 발전, 폐열 발전에 의한 열·전기의 공급, 가스화, 가스화를 거친 간접액화에 의하여 메탄올, DME(Dimethyl Ether) 등의 제조가 가능함
- 산림 바이오매스의 에너지화 기술은 산림자원 활용 측면에서 관심이 높아지고 있으며, 나무의 종류나 환경 관련 인자에 따라 달라진 잎의 생리적 이용성과 효용성이 산림의 생산성을 결정함
 - 또한 낙엽의 생산과 축적 및 분해는 물질의 순환적 방면에서 중요한 의미를 가짐



포대 적치



낙엽상태 적치



과수원 토양에 사용

자료 : 충청남도청(2020), 「낙엽 재활용(연료화·퇴비화) 방안 연구 용역」

[그림 2-6] 산림 바이오매스(낙엽) 활용 사례

□ 폐기물 바이오매스

- 폐기물 바이오매스에는 산업계의 하수슬러지, 펄프 슬러지, 생활 속의 가정 쓰레기 등이 있음
 - 이들은 메탄발효나 퇴비로 이용되고 있으며 하수오니는 수소나 합성가스 필요 없어 액체연료를 생산하는 직접 액화에도 적용됨

2) 바이오차의 제조

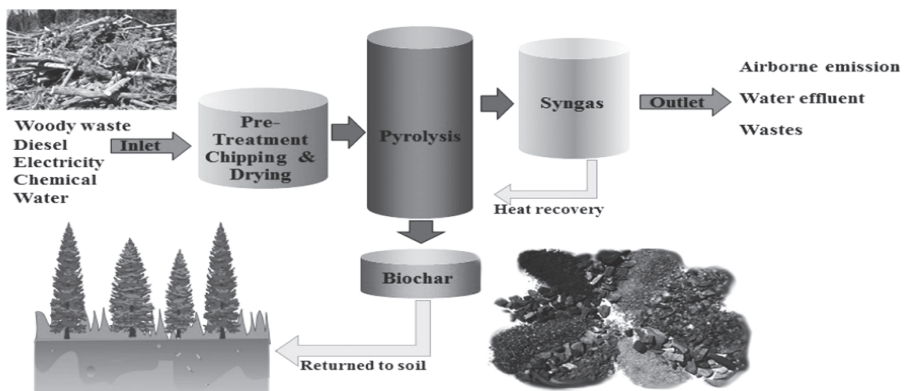
□ 바이오차 생산 시 투입물질의 전처리 과정⁹⁾

- 바이오매스의 균일한 탄화 및 열전달 효율 증대를 위해 바이오매스를 가공하는 전처리 과정이 필요하며, 그 과정은 아래와 같음
- 바이오매스의 직경이 1~10mm, 또는 3~5mm가 되도록 파쇄함
 - 직경이 상기 범위 미만으로 파쇄 되는 경우, 반탄화 및 탄화 단계에서 과도한 탄화 반응으로 인해 생산성 저하 문제가 있을 수 있음
- 분쇄된 바이오매스 분말은 불순물(유기물 또는 무기물 등)을 포함하고 있으므로 바이오매스 분말 75~85중량% 당 산성액 15~25중량%를 추가하여 불순물을 제거함
- 여기서 혼합되는 산성액은 질산, 염산, 불산 중 택일되는 것으로, 25중량%를 초과하여 혼합되면 높은 산도로 인해 부식이 발생하고, 15중량% 미만으로 혼합되면 불순물 제거 기능을 할 수 없으므로 상기 범위로 혼합되는 것이 가장 바람직함
- 불순물을 제거한 바이오매스를 상온 또는 건조 설비에서 건조 작업을 진행하며, 바이오매스의 수분 함량을 5% 이하, 또는 4% 이하가 되도록 건조시킴
 - 또는 건조를 위해 약품을 사용할 수 있으며, 불순물이 제거된 바이오매스에 알칼리 수용액을 혼합한 다음 수분을 제거하기도 함
- 바이오매스 분말 30~40중량%에 촉매제인 수산화칼륨 수용액을 60~40중량%를 혼합하고, 110~130℃에서 20~40분간 가열하여 수분을 제거하는 과정을 거침
- 건조 단계를 거칠 경우, 열처리 반응 효율 향상 효과가 있으며, 수분 함량이 상기 범위를 초과할 경우 반탄화 및 탄화 시간이 길어지는 문제도 발생할 수 있음

9) 손달호(2019), 「하이브리드 바이오차 및 그 제조 방법」의 내용을 정리한 것임

□ 열분해를 통한 바이오차 제조¹⁰⁾

- 열분해 기술은 열분해 속도에 따라 크게 저속, 중속, 급속 열분해로 나눌 수 있으며, 산소를 공급하지 않거나 매우 적은 상태에서 적절한 온도 조건으로 운전함
 - 열분해 시에 가열 속도가 느릴수록 온도가 낮을수록 생성되는 고형물 비율이 증가하기 때문에 바이오차를 생산하기 위해 ‘저속 열분해’를 많이 사용함
- 바이오매스를 열 전환하려면 처음에는 열이 필요하며 바이오매스 표면에 수분을 완전히 제거하기 위해서는 100℃ 이상의 온도가 필요함
 - 우전 초기에만 점화를 위한 연료가 필요하며 그 이후에는 저절로 타게 되므로 오히려 열이 발생해 이를 에너지원으로 이용할 수 있음
- 바이오매스의 바이오차 제조 과정은 아래 그림과 같음
 - 열분해 온도는 전기로를 10℃min⁻¹의 속도로 승온하여 각 300, 500, 700℃ 조건에서 4시간 동안 열분해를 진행함



자료 : 김미형 외(2014), 「폐목재를 이용한 바이오차 생산 및 토양적용의 환경평가」

[그림 2-7] 열분해를 통한 바이오매스의 바이오차의 제조 공정

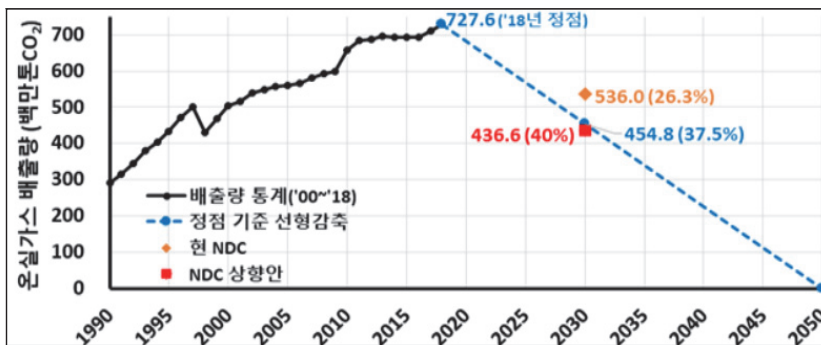
10) 김미형 외(2014), 「폐목재를 이용한 바이오차 생산 및 토양적용의 환경평가」 내용을 정리한 것임

제2절 정책동향

1. 농업분야 탄소중립 국가 기본방향¹¹⁾

■ 온실가스 배출목표

- 우리나라는 2050 탄소중립 선언 이후 관계부처 합동으로 「2050 국가 탄소중립 시나리오」 및 「2030 NDC 상향안」을 확정(2021.10), 발표(COP26, 2021.11)함
- (NDC) 2030년 국가 온실가스 배출량은 2018년(727.6백만 톤 CO₂eq.) 대비 40% 감축목표로 하고 있으며, 농축수산 부문은 2018년(24.7백만 톤 CO₂eq.) 대비 27.1% 감축한 18백만 톤 CO₂eq.으로 상향함



자료 : 관계부처 합동(2021), 「2050 탄소중립 시나리오안」

[그림 2-8] 국가 2030 NDC 목표 설정

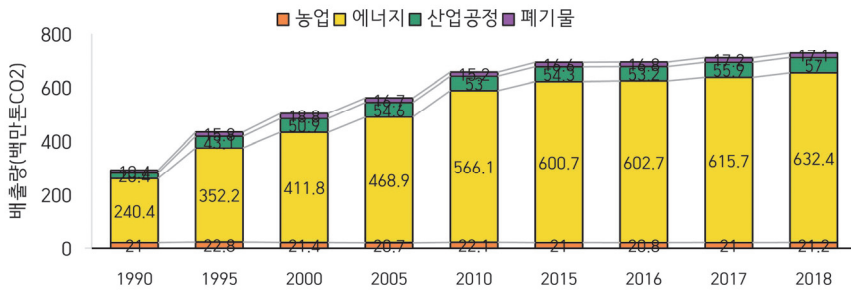
- (2050 시나리오) 국내 탄소중립(Net-zero) 달성을 위해 농축수산부문은 2050년까지 2018년(24.7백만 톤 CO₂eq.) 대비 37.7% 감축한 15.4백만 톤 CO₂eq.으로 배출목표를 제시함

11) 농림축산식품부(2021.12.27.), 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 내용에 기초하여 작성함

- (메탄) 2030년까지 국가 전체 메탄 배출량을 2018년(28백만 톤 CO₂eq.) 대비 2030년 19.7백만 톤 CO₂eq.(2018년 대비 29.7% 감축) 배출을 목표로 하고 있으며 이를 NDC에 반영함
 - 농축수산 분야에서는 2018년 대비 20.6% 감축한 9.7백만 톤 CO₂eq. 배출을 목표로 하고 있음

■ 농업분야 온실가스 배출량

- 농업분야(비에너지) 온실가스 배출량은 2018년 기준 21.2백만 톤 CO₂eq. 으로 1990년 이후 21백만 톤 CO₂eq. 내외로 유지하고 있으며, 국가 전체 온실가스 배출량에서 농업이 차지하는 비중은 약 2.9%임

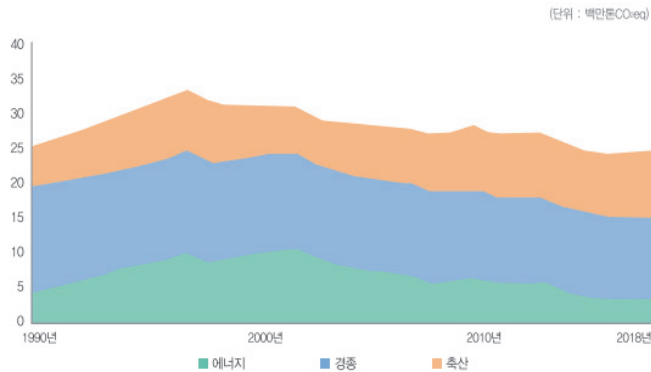


자료 : 농림축산식품부(2021.12.27.), 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」

[그림 2-9] 농업분야 온실가스 발생 추이

- 2018년 기준 배출원별로 경종부문 11.8백만 톤 CO₂eq.(53%), 축산부문 9.4백만 톤 CO₂eq.(42%), 에너지 부문 1.0백만 톤 CO₂eq.(4.5%) 발생함
- 온실가스 배출량은 1990년 대비 2018년 4.3% 감소하였으며, 에너지 사용으로 인한 배출량은 27% 감소하였으나, 비에너지 배출량은 0.9% 증가하였음¹²⁾
- 비에너지 배출량의 경우, 경종 분야는 논 면적 감소 등으로 온실가스 배출량이 1990년 대비 2018년에 22% 감소하였으나, 축산 분야는 가축 사육두수 증가로 인해 온실가스 배출량이 62% 증가하였음

12) 농림축산식품부(2021.12.27.), 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」



자료 : 관계부처 합동(2021), 「2050 탄소중립 시나리오안」

[그림 2-10] 농업분야 배출원별 온실가스 배출량 추이(1990~2018)

- 축산업의 온실가스 배출은 대부분 가축 사육과정에서 기인하므로 가축 사육두수를 일시에 대폭 감축하거나, 완전히 감축하는 것은 불가능함
- 그러나 탄소중립(Net-zero) 이행을 위한 축산분야 온실가스 감축은 불가피하며, 축산업의 지속과 발전을 위해 다양한 기술도입을 통한 온실가스 감축 노력이 필요함

■ 감축수단

- 「2050 탄소중립 시나리오(안)」에는 농축수산 부분 온실가스 감축 수단으로 ‘연료전환’, ‘영농법 개선’, ‘가축관리’, ‘식생활 개선’을 제시하고 있음
 - 영농법 개선을 위한 세부방안으로 농경지 메탄·이산화질소 발생 억제, ‘논물 관리방식 개선’ 및 ‘바이오차 등 신규 기술 확대’가 제시됨
 - 가축관리를 위한 세부방안으로 ‘저메탄·저단백질사료 보급’, ‘축산업의 생산성 향상’, ‘가축분뇨 에너지화 시설 처리율 확대’ 등이 제시되어 있음

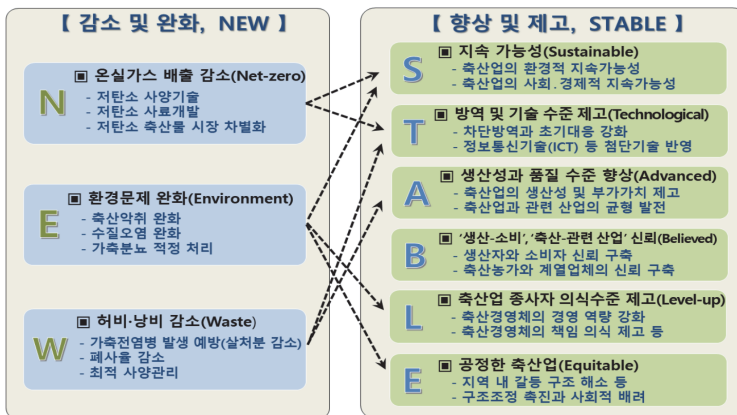
[표 2-2] 농축수산부문 온실가스 감축 수단

구분	내용	대상 분야
연료 전환 등	<ul style="list-style-type: none"> 농기계 및 어선 연료의 전기·수소화, 바이오매스 에너지화, 고효율 에너지 설비 보급 등 추진 (농축산) 농업용으로 사용되는 등유·경유의 전기·수소화, 농촌에너지 자립마을 조성(재생에너지 보급) (수산) 노후된 어선 교체 및 고효율화 장비 수단 확대 	농업, 축산업, 수산업
영농법 개선	<ul style="list-style-type: none"> 영농법 개선(화학비료 저감, 친환경 농법 시행 확대)을 통해 농경지 메탄·아산화질소 발생 억제 벼농사로 발생하는 온실가스 감축을 위한 논물 관리방식 개선 및 바이오차(Bio-char) 등 신규 기술 확대, 농경지 질소질 비료 사용 저감 	농업
가축 관리	<ul style="list-style-type: none"> 저탄소 가축관리시스템 구축 및 가축분뇨 자원순환 확대 등에 따른 온실가스 감축 저메탄·저단백질사료 보급 확대를 통한 가축사육 과정에서 발생하는 온실가스의 48%를 차지하는 메탄가스 및 분뇨 내 질소 감축 생산성 향상을 위해 디지털 축산 경영(가축 정밀 사양, 폐사율 감소) 가축분뇨 에너지화 시설 처리율 확대(2018년 5% 내외 → 2050년 35% 이상) 	축산업
식생활 전환	<ul style="list-style-type: none"> 식단변화, 대체가공식품 이용 확대 대체가공식품(배양육, 식물성 고기, 곤충원료 등) 기술개발 및 이용 확대 등을 통한 식단변화 고려 	소비단계, 식품 가공업

자료 : 관계부처 합동(2021), 「2050 탄소중립 시나리오안」

- 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」의 비전 목표는 넷제로(Net-zero)를 계기로 농업 발전 및 지속가능성 제고이며, 저탄소 및 환경친화적인 산업으로 탈바꿈을 추진하고 비료, 축산분뇨, 석탄에너지 등 온실가스 배출원 감축과 재생에너지 확대를 통해 농업 부문 넷제로 달성을 하고자 함
 - 1단계(2030년) : 저탄소 농업 전환 및 감축기술 확립 → 2단계(2040년) : 농업환경 개선 및 온실가스 감축폭 확대 → 3단계(2050년) : 탄소중립 및 지속가능 농업 실현

- 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」 내 “3+1 실행전략”을 통해 구조/감축/전환 측면에서 정책방향을 실행하고자 함
 - ICT 등 최신기술을 활용하는 정밀농업을 확산하고, 환경친화농업, 생태농업 등을 통해 고투입 농법을 저투입 농법으로 전환
 - 화학비료와 농약사용을 줄이고, 저메탄사료 등 저탄소 사양관리와 가축분뇨의 비농업계 이용 확대
 - 농식품 유통거리 단축과 식생활 개선 및 대체식품 확대
 - 농촌공간계획 등을 활용한 재생에너지 보급 등 에너지 전환 추진
- 축산업의 지속가능한 발전을 위해서는 축산환경 규제에 대한 적극적인 대응뿐만 아니라 축산업의 생산 시스템 자체가 선진화되어야 함
- “축산업 선진화”란 축산업의 가축사육 과정 및 분뇨처리 과정에서의 온실가스 배출을 감축하고(Net-zero), 악취 및 수질오염 등 환경문제를 완화하며(Environment), 사료 등 투입과 사육기간의 정밀화·최적화와 가축의 폐사율 감소 등으로 낭비와 허비를 줄이는 것(Waste)임¹³⁾
- 즉 「탄소중립 시대의 축산업 선진화 개념」을 축산업의 온실가스 배출과 환경문제 등 ‘감소 및 완화(NEW)’와 축산업의 지속가능성, 기술 수준, 생산성, 신뢰 등의 ‘향상 및 제고(STABLE)’를 통해 전체적으로 새롭게 안정된 상태(NEW STABLE)로 정의하고 있음



자료 : 한국농촌경제연구원(2022), 「축산업의 환경 영향 분석과 정책과제」

[그림 2-11] 탄소중립 시대의 축산업 선진화 개념과 방안

13) 농업전망(2022), 「농업·농촌, 새 희망을 보다」

바이오차 관련 연구 및 활용사례

제1절 선행연구

제2절 국내외 바이오차 활용사례

제3절 국내 바이오차 생산시설 현황

3장

제3장 바이오차 관련 연구 및 활용사례

제1절 선행연구

1. 바이오차의 활용을 통한 토양개량 및 농업 생산량 증대

- 바이오차는 빈 공간이 많은 다공성 구조로 되어 있어 토양에 사용 시 토양의 통기성과 수분 보유력 등을 증대시켜 토양을 개량하고 작물생산성을 높이는 효과를 보이는 것으로 나타남
- 바이오차는 중금속 흡착 효과 및 유용미생물을 증대시켜 작물 생산량을 늘리는 데 효과적임
- 바이오차가 대부분 알칼리성이고, 물을 보유하는 능력이 우수하여 반대 조건의 토양에 더욱 효과적이기 때문에, 바이오차의 적용은 산성 토양과 건조한 지역의 토양에 특히 효과적임¹⁴⁾

■ 경상남도농업기술원, ‘바이오차를 통한 농업생산 증대 효과 연구’¹⁵⁾

- 경상남도농업기술원은 목재를 활용해 바이오차를 개발, 토양 미생물 및 작물 생산성 효과를 확인함
- 바이오차는 빈 공간이 많은 다공성 구조로 이루어져있어 토양에 사용시 토양의 통기성과 수분 보유력 등을 증대시킴으로 뿌리가 썩지 않게 해 뿌리 성장을 도움
- 경상남도농업기술원이 개발한 바이오차 200kg을 상추 재배면적 10a에 사용한 결과 토양 미생물은 59%, 생산량은 28%가량 증가한 것으로 보고함¹⁶⁾

14) 한국농촌경제연구원((2021.03), 「세계농업정보 제240호」

15) 경남도민신문 보도자료 (2018.08.15.), “도농기원 토양개량 탁월한 ‘바이오차’ 개발” 내용을 정리한 것임



저온 탄화(300℃) 조건에서 생산된 바이오차



다양한 식물 원료

자료 : 경상남도농업기술원(2018), “토양개발에 탁월한 ‘바이오차’ 개발”

[그림 3-1] 경상남도농업기술원이 개발한 바이오차 예시



무처리 관행 바이오차 60kg 120kg 240kg/10a

자료 : 경상남도농업기술원(2018), “토양개발에 탁월한 ‘바이오차’ 개발”

[그림 3-2] 경남농업기술원의 바이오차를 이용한 상추 재배실험 결과

- 경상남도농업기술원이 개발한 바이오차를 활용한 토양환경개선 시범사업은 2018년 창녕군을 비롯한 전국 10개소 80ha에 시범 적용됨
- 해당 시범사업의 하나로 창녕군농업기술센터에서 바이오차 시범사업 대상지인 남지읍 시설오이 재배시설에 바이오차를 투입함
- 남지시설채소작목회 45농가 8.3ha에 심토파쇄와 바이오차를 투입하여 토양환경개선 시범사업을 추진한 결과, 전년대비 오이 수확량이 35% 증가하는 성과를 나타냄

16) 농수축산신문 보도자료(2019.5.2.), “바이오차의 효과와 연구 사례는”

■ 한경대학교, ‘바이오차를 통한 딸기재배 연구’¹⁷⁾

- 한경대학교에서는 일반 조건에서 재배한 딸기와 비교하여 바이오차를 사용한 딸기는 상온 저장성이 더 우수한 것으로 보고함
 - 열화상 카메라로 딸기의 온도편차를 비교한 결과, 바이오차를 주입한 배지에서 생산된 딸기의 온도편차가 대비군 보다 0.4℃ 낮게 나왔으며, 이는 부패 진행률이 그만큼 낮다는 것을 의미함
- 딸기 엽록소의 형광분석 결과, 바이오차 주입 배지에서 재배된 딸기의 신선도가 대비군 보다 우수한 것으로 평가됨
 - 연구 결과를 바탕으로 종자·상토 제조 기업들은 바이오차를 활용한 친환경 농자재 제품을 적극적으로 개발함



자료 : 농수축산신문 보도자료(2019.5.2.), “바이오차의 효과와 연구 사례는”

[그림 3-3] 한경대학교, 바이오차 토양개량제를 이용한 딸기 재배실험 예시

2. 바이오차의 연료화 기술

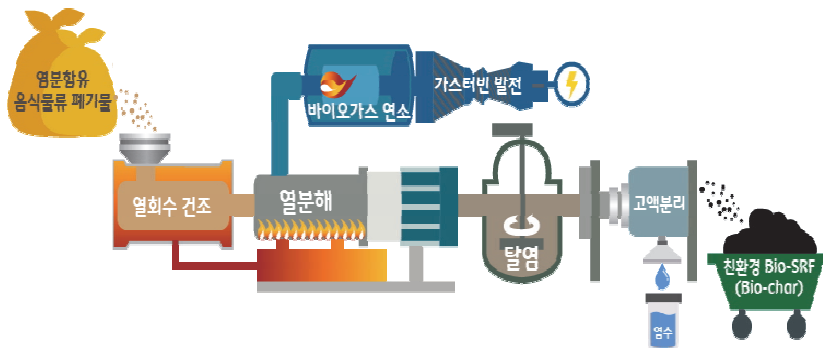
■ 한국건설기술연구원, 음식물쓰레기 연료화 기술개발¹⁸⁾

- 음식물쓰레기를 활용하여 제조한 바이오차의 염분 농도를 낮추고(탈염), 고형연료제품의 품질기준에 맞춰 바이오차의 연료화에 대한 가능성을 확인함

17) 농축산신문 보도자료(2019.05.02.), “바이오차의 효과와 연구 사례는” 내용을 정리함

18) 한국건설기술연구원 보도자료(2019.11.21.), “처치 곤란 음식물 쓰레기, 석탄 대체 청정 재생에너지로”

- 해당 기술은 산소가 없는 환경에서 음식물쓰레기를 열분해하고, 열분해 후 탈염공정에서 염분 함량을 3~5%대에서 0.2%까지 낮출수 있으며 열분해 과정에서 다이옥신 발생 우려가 없음
- 열분해 과정에서 발생하는 바이오가스는 건조 에너지로 재활용하여 시스템 운영비를 절감할 수 있음
- 이러한 과정을 거쳐 탄소가 농축된 고열량의 바이오차(bio-char)로 가공되며, 청정 고품형 재생연료(Bio-SRF ; Solid Refuse Fuel)로써 음식물쓰레기를 사료 또는 퇴비로 활용할 때보다 유기물질 발생량이 적고, 악취가 발생하지 않으며, 보관이나 운반이 용이한 장점이 있음
 - 재생연료의 열량을 1kg당 6,000kcal까지 향상시킴
- 또한 기존 퇴비화 및 사료화 처리 시스템을 개량하여 활용할 수 있으므로 경제적인 측면에서 이점이 있음
- 미세먼지 유발물질 중 황은 0.2%, 나트륨 및 칼륨은 50% 정도까지 저감이 가능했으며, 화력발전 석탄연료 등 대체 시 온실가스(CO₂)를 연간 885만 톤 저감을 기대할 수 있음



자료 : 한국건설기술연구원 보도자료(2019.11.21.), "처리 곤란 음식물 쓰레기, 석탄 대체 청정 재생에너지로"

[그림 3-4] 한국건설기술연구원, 음식물쓰레기를 활용한 바이오차 생산시설 공정



자료 : 한국건설기술연구원 보도자료(2019.11.21.), “처치 곤란 음식물 쓰레기, 석탄 대체 청정 재생에너지로”

[그림 3-5] 음식물쓰레기의 바이오차 Test-Bed 생산시설

3. 바이오차의 탄소저장에 따른 온실가스 저감

- 바이오차의 환경적 잠재력 중 대표적인 기능은 온실가스 저감 효과이며, 온실가스 저감에 관한 다수의 연구에서 바이오차는 토양 중 유기탄소를 안정화시켜 CO₂ 배출량을 줄일 수 있는 것으로 보고됨¹⁹⁾
- IPCC 6차 보고서에 바이오매스/바이오에너지의 탄소저장 및 격리뿐만 아니라 바이오차, 토양 탄소격리 화학용매 및 흡수제를 이용한 탄소저장 및 격리 등의 기술이 추가됨
 - 바이오차 기술은 IPCC 6차 보고서에서 탄소저장 효과가 있음을 인정받게 됨

19) Lehmann et al. (2006, 2007), Steiner et al.(2007), Major et al.(2010)

- 바이오차는 토양내에서 미생물 분해나 변화가 일어나지 않기 때문에 100년 이상 안정성을 유지하며, 이와 같은 ‘100년 안정성’에 대한 계량적 수치는 생산 온도에 따라 달라짐
 - 600℃ 이상일 때는 89±13%, 450-600℃일 때는 80±11%, 350-450℃일 때는 65±15%인 것으로 IPCC에서는 제시하고 있으나, 생산 조건과 재료 및 다양한 변수에 따라 달라질 수 있음²⁰⁾
- 또한 토양에 바이오차를 적용할 경우 질소순환에 영향을 미쳐 N₂O 배출을 감소시키는 효과도 있는 것으로 보고되고 있음²¹⁾

■ 농촌진흥청, ‘탄소격리 기술 연구로 온실가스 저감’

- 농촌진흥청은 2018년에 농업분야 기후변화 대응을 위해 돈분 퇴비에 바이오차를 섞어 만든 펠릿을 활용한 탄소 격리 기술을 개발함²²⁾
 - 돈분 퇴비와 바이오차의 혼합 비율은 8:2 정도임
- 바이오차 적정 혼합비를 연구한 결과, 돈분을 이용하여 펠릿을 제작할 경우 수계 부영양화의 원인인 암모늄태 질소와 인의 용출량은 각각 19%, 49% 감소하였으며, 작물의 병해 저항성을 높이는 규산의 함량은 62% 증가함
- 개발된 바이오차 펠릿형 비료로 작물을 재배하면 수확량 변동 없이 영농활동으로 토양 중 탄소를 격리할 수 있음

■ 국립환경과학원, ‘토양정화 및 CO₂ 저감을 위한 Biochar 활용기법 연구’

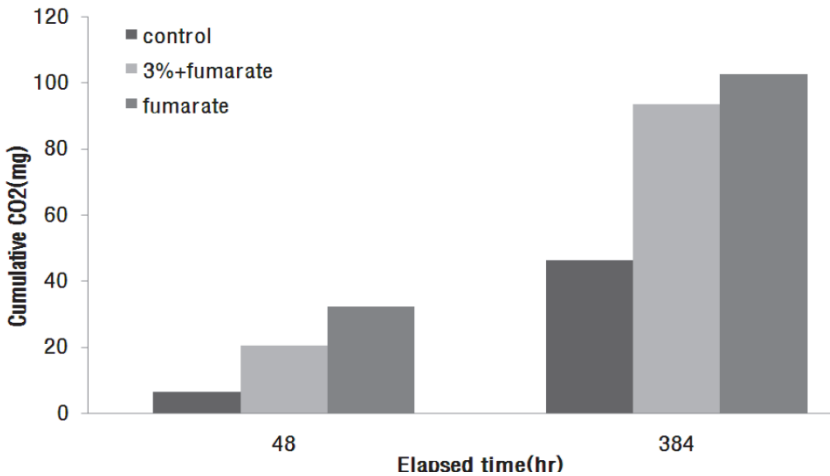
- 국립환경과학원은 바이오차의 온실가스 저감량 산정을 위한 기초실험을 통하여 적절한 바이오차 환경기법을 도출함
 - 토양과 바이오차를 일정 비율로 혼합한 후 30℃ 항온에서 배양하면서 Fumarate(미생물 탄소원)를 처리한 반응기의 CO₂ 배출량 변화를 조사함

20) 우승한(2021), 「바이오차를 이용한 농림업부문 기후변화 대응 적용사례」

21) Singh et al.(2010), Van Zwieten et al.(2010)

22) 농촌진흥청 보도자료(2018.12.18.), “기후변화 대응 ‘바이오차 펠릿’ 활용한다”

- 조사 결과, 바이오차를 혼합하지 않은 토양에 비해 바이오차를 3% 함께 처리한 토양이 9.62% 정도의 CO₂ 배출량이 저감됨(그림 3-6)



자료 : 국립환경과학원(2012), 「토양정화 및 CO₂ 저감을 위한 Biochar 활용기법 연구」

[그림 3-6] 바이오차 혼합과 비혼합에 따른 CO₂ 배출량 비교

4. 바이오차의 축사 깔짚 활용 가능성 연구

■ 농림축산식품부, ‘바이오차의 축사 깔짚 활용 연구’

- 농림축산식품부는 축산업의 지속 가능성 확보와 국가 온실가스 감축에 동참하기 위하여 퇴비 수요를 초과하는 가축분을 바이오차로 전환하고 이를 축사 깔짚으로 활용하는 방안에 대한 연구를 진행함²³⁾
- 바이오차는 수분 흡수와 냄새 저감효과가 뛰어나 축사용 깔짚으로 대체할 수 있을 것으로 기대되며, 경제적인 측면에서도 기존 깔짚에 바이오차를 30% 혼합 시 kg당 약 40원 절감이 예측됨
- 가축분 10만 톤을 사용하여 바이오차 2만 톤을 생산할 수 있으며, 이를 통해 온실가스 4만 톤을 감축하는 효과가 있음

23) 농림축산부 보도자료(2022.10.18.), “가축분 바이오차로 축산업의 탄소중립 구현하다”

제2절 국내외 바이오차 활용사례

1. 국내 활용사례

1) 충청북도 괴산군, 시설하우스 토양개량을 위한 사업

- 충북 괴산군 농업기술센터는 하우스 토양개량을 위해 바이오차를 이용한 토양환경개선 시범적 사업을 추진하고 있음
 - 유기농 재배면적 증대를 위해 바이오차를 유기농 재배로의 전환 생각이 높은 관내 무농약 재배농가에 공급했으며 본격적인 토양환경개선 사업을 지속하고 있음
 - 괴산군은 시설하우스 수박 재배 농가 51곳(8ha)을 대상으로 시범사업을 진행한 바 있음



자료 : 충청남도 괴산군 농업기술센터 원예축산팀

[그림 3-7] 괴산군 바이오차를 활용한 토양환경 개선

- 농업기술센터는 2022년 유기농 재배면적 확대를 위해 바이오차를 무농약 재배농가에 공급해 토양환경개선 시범사업을 진행 중임
 - 현재 사업에 참여하는 곳은 시설하우스에서 토마토 등 과채류를 지배하는 농가 10곳(5ha)임
- 농업기술센터 관계자는 “바이오차는 농가소득 증대와 유기농 재배면적 확대에 도움이 될 것”이라며 유기농 관련 사업 발굴을 약속함

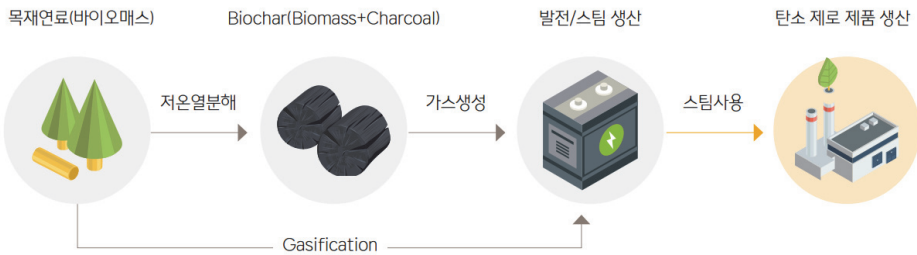
[표 3-1] 충청북도 괴산군 시설하우스 토양 개발 사업

구 분	내 용
사업개요	시설하우스 토양 개량을 위한 바이오차 활용 토양환경개선 사업
사업목적	농가소득 증대와 유기농 재배면적 확대
사업내용	유기농 재배로의 전환 의지가 강한 관내 농가에 바이오차 공급
기대효과	일반적 재배보다 30% 가량 생산량 확대

자료 : 충청신문 보도기사 (2020.05.18.), “괴산군, 바이오차 활용 토양환경개선 시범사업 ‘주목’”

2) 충청북도 진천군, 산림 바이오매스 활용한 친환경에너지 공급시설 구축

- CJ제일제당은 충북 진천 CJ블로썸캠퍼스 생산공장에 목재연료를 활용한 친환경에너지 공급시설을 구축하여 기존 LNG 사용을 대체할 계획임
- 목재를 저온 열분해하여 발생한 가스로 발전 및 스팀을 생산하는 방식으로(시간당 50톤 규모), 기존의 재래식 기술은 나무를 불로 태우는 과정에서 필연적으로 탄소가 많이 배출되는 반면, ‘가스피케이션(Gasification) 기술’을 적용하여 탄소 배출량이 낮은 특징이 있음²⁴⁾
- 2025년 본격 가동을 목표로 온실가스 연간 약 4만4천톤 감축효과 기대하고 있으며, 고용창출 및 지역경제 활성화 효과 및 탄소제로 인증마크 획득 및 장기적인 탄소감축과 에너지 비용 절감이 기대됨



자료 : CJ제일제당(2021), 「CJ제일제당 지속가능경영보고서」

[그림 3-8] 진천군 바이오차를 활용한 친환경 에너지 공급망 개요도

24) 비즈월드 보도자료(2022.4.10.), “CJ제일제당, 탄소중립 실현 위해 쟁걸음...CJ블로썸캠퍼스에 산림바이오매스 활용 친환경 에너지 공급시설 구축”

3) 강원도농업기술원·한국남동발전, 목재펠릿 바이오차 농가 보급

- 남동발전은 목재펠릿 연료 발전소의 발전 부산물을 활용한 바이오차를 만들어내고 이를 관리하고 활용해 공익사업을 추진하고 있음
- 남동발전은 영동 1·2호기에서 목재펠릿을 이용해 전기를 생산하는 과정에서 1~2% 정도 불완전 연소로 배출되는 숯이 토양개량제 바이오차와 유사하다고 판단하여 2019년부터 강원도, 경상남도농업기술원, 경상국립대학교 등과 공동연구 수행하여 우수성을 입증함
- 강원농업기술원은 남동발전과 공동으로 바이오차의 농가 보급을 확대하고 있으며 바이오차의 효과 분석과 시험을 통해 작물생육 및 토양개량 효과를 검증함
- 목재펠릿 연소재의 재활용을 높이고 농업부문 온실가스 배출 저감 소재 등으로 사용될 것을 기대함
 - 만들어진 바이오차는 비료공정규격에 신규 등록되었으며, 농림축산식품부의 농업분야 자발적 온실가스감축사업 대상기술로 선정됨
- 바이오차를 농가에 저렴하게 보급하고 사회적 가치 창출과 농가의 생산성 향상을 기대하고 있음



자료 : 인더스트리 뉴스 보도기사 (2021.09.01.), “한국남동발전, ‘바이오차 농가보급 확대한다’”

[그림 3-9] 강원도농업기술원·한국남동발전 협약 체결식

[표 3-2] 강원도·한국남동발전 협약을 통한 바이오차 농가 보급

구분	내용
사업개요	• 바이오차를 생산하고, 품질관리와 이를 활용한 공익사업 추진
사업목적	• 고품질 바이오차를 농가에 저렴하게 보급해 농가 생산성 향상과 일자리 창출 등 다양한 사회적 가치 창출 기대
사업내용	• 강원농업기술원과 한국남동발전이 협업해 공동으로 바이오차의 농가 보급을 확대 • 바이오차의 유용 효과 분석과 재배시험을 시행해 작물생육과 토양 개량 효과를 검증하고 농가에 보급
기대효과	• 바이오차 사업과 연계한 다양한 사회적가치의 실현 기대

자료 : 인더스트리 뉴스 보도기사(2021.09.01.), 「한국남동발전, “바이오차 농가보급 확대한다”」

4) (주)한빛에코텍, 가축분뇨 바이오차 생산 사례

- 바이오차 생산 기계에 우분을 투입하면 건조 후, 열처리장치를 거쳐 바이오차가 생산됨
 - 수분함량은 60~70%에서 10%대로 낮아지고, 수용성 인(P)이 감소됨
- 축산분뇨 5톤 투입 시 바이오차 500kg이 생산되는 소형기계로 마을단위로 사용 가능하며, 기존에 퇴·액비화 대비 인의 함량이 줄어들기 때문에 강우시 하천 유입을 방지하여 녹조 문제 예방에도 효과가 있을 것으로 기대함



자료 : 한겨레 보도기사(2022.10.27.), “온실가스 주범, ‘소똥’...탄소 꼭꼭 눌러담아 기후위기 해결사로”

[그림 3-10] (주)한빛에코텍 소형 바이오차 생산 기계 예시

2. 국외 활용사례

1) 일본

□ 일본 농가의 ‘쿨베지 프로젝트’

- 2008년부터 일본의 교토 카메오카시에서는 도시와 농촌의 상생을 위한 ‘쿨베지(COOLVEGE) 프로젝트’를 시행함
 - 프로젝트 참여자로 일본 산림청, 일본 바이오차 협회, 카메오카 시, 리츠메이칸 대학, 가쿠엔 대학, 류고쿠 대학, 그리고 교토 은행 등 여러 기업체와 지역 위원회 등이 참여함
- 도시 근교에 있는 농촌 지역에서 바이오매스 자원을 활용하여 바이오차를 만들고, 이를 농민들이 재배에 이용하여 생산한 물품들을 “쿨베지”라는 이름으로 대도시에 판매하는 구조임
 - 지자체에서는 탄소인증 위원회를 구성하여 해당 바이오차와 채소에 대한 탄소인증을 발급하며, 기업은 지자체에서 발행한 탄소인증을 구매해 이를 제품에 표기함으로써 친환경적 이미지를 제고함²⁵⁾



자료 : 쿨베지 프로젝트(<https://coolvege.com/>)

[그림 3-11] 일본의 ‘쿨베지 프로젝트’ 사례

25) 한국농촌경제연구원(2021.03), 「세계농업정보 제240호」

- 첫해에 바이오차 사용 결과 2012년에는 33톤 정도로 증가했으며 이렇게 생산된 채소는 2013년에 실제 판매를 통해 약 1억 원의 수익을 냄
- 탄소인증 라벨은 후원 기업이 라벨당 구매금액의 절반을 농민에게 돌려주는 방식으로 약 5~10%의 추가 수익을 창출함

[표 3-3] 일본 농가의 ‘쿨베지 프로젝트’ 내용

구분	내용
사업개요	• 도시와 농촌의 상생을 위한 쿨베지 프로젝트 시행
사업목적	• 바이오차와 채소에 대한 탄소인증을 발급함으로써 재정적인 후원과 친환경적 이미지 제고 목적
사업내용	• 바이오차를 채소 재배에 이용해 생산한 채소를 쿨베지라는 이름으로 도시에 판매하는 구조 • 탄소인증 위원회를 구성하여 해당 바이오차와 채소에 대한 탄소인증 마크 발급 • 기업은 탄소인증 마크를 구매하여 재정적으로 후원, 이를 상품에 표기함으로써 친환경적 이미지를 제고
기대효과	• 바이오차를 통한 친환경적 이미지 제고 뿐 아니라 재정적인 효과 기대

자료 : 우승한(2015), 「기후변화에 대응할 새로운 물결 바이오차」

2) 독일

□ 베를린 식물원의 ‘테라보가 프로젝트’

- 독일 베를린의 식물원에서는 식물 관리를 위해 퇴비 약 180m³, 영양제가 약 70m³ 소요됨
- 이를 개선하기 위해 식물 부산물을 적절하게 이용하고 토양의 탄소와 영양분의 손실을 줄이기 위해 바이오차를 투입하는 ‘테라보가 프로젝트’를 실시함
 - 43ha 규모에 22,000여 종의 식물이 서식하고 있으며, 1년에 약 2,000m³의 식물 부산물이 발생함
- ‘테라보가 프로젝트’의 바이오차 생산과정은 [그림 3-12]와 같음
 - ① 식물 부산물의 수집 및 파쇄, ② 바이오차 생산, ③ 바이오차 15%를 식물 부산물과 혼합, ④ 퇴비화, ⑤ 부식화, ⑥ 10mm 이하의 체거름



식물 부산물 파쇄

바이오 생산

바이오차 살수

바이오차

부산물과 혼합

퇴비화

자료 : 테라보가 프로젝트(2021), (<https://terraboga.de>)

[그림 3-12] 독일 베를린 식물원의 바이오차 생산 및 퇴비화 과정

[표 3-4] 독일 베를린 식물원의 바이오차

구분	내용
사업개요	• 식물 관리를 위한 많은 양의 영양제 사용을 개선
사업목적	• 토양의 탄소와 영양분의 손실을 줄여 영양제 및 퇴비 구입비용 절감 및 효율적인 자원순환 촉진
사업내용	• 퇴비화에 바이오차를 적용해 악취를 줄이고 물 보유량, 총 유기물 함량(TOC), 총 탄소(TC), 총 질소(TN) 함량을 증가시킴 • 바이오차를 적용시킨 퇴비를 사용함으로써 곰팡이 등 병충해 발생이 줄어들도록 함
기대효과	• 바이오차를 통해 식물원과 같은 닫힌 시스템에서 자원순환을 이롭게 함

자료 : 우승한(2015), 「기후변화에 대응할 새로운 물결 바이오차」

3) 미국

□ 미국 록키산맥 재건 ‘BANR 프로젝트’

○ 미국 록키산맥은 1990년대 중반부터 병충해로 산림피해가 심각해짐

- 이에 따라 '지속가능 록키 바이오에너지 네트워크'는 미국 농무부, 산림 연구소, 록키산맥 연구센터, 몬타나 대학, 쿨플레닛 등이 참여하는 약 120억 규모의 프로젝트를 실시함



자료 : BANR 프로젝트(<https://banr.colostate.edu/coolvege.com/>)

[그림 3-13] 록키산맥 병충해 피해 및 바이오차 원료 생산과정

- 프로젝트의 목적은 이미 죽은 나무를 제거하고 바이오연료 생산하며 쾌적한 환경의 유지 및 일자리 창출, 지역 사회 교육 등을 목표로 하며 주된 연구 분야는 아래 5개의 분야로 구성함²⁶⁾
 - 원료공급 : 자료 수집, 원격 센서, 지질 공간층 분석, 디지털 원료 지도 작성, 미래 병충해 감염 예측 및 예방
 - 원료의 물류 및 가공 : 바이오매스 확보를 위한 비용/생산 모델 개발, 기업 참여 수확/수송/가공/전처리 연구, 품질 가이드라인 확립
 - 통합 성능 및 지속가능성 : 생태계 영향 연구, 바이오차 활용 평가, 탄소/온실가스 모델링/전과정 평가, 경제성 평가, 사회 경제성 및 정책 분석, 웹 기반 의사결정 지원 도구 개발
 - 교육 프로그램 : 중고등/대학/대학원 교육, 교사/교수 프로그램 개발, 에너지/기후/환경 교육 프로그램 개발
 - 확산, 봉사, 건강, 안전 : 워크숍/커뮤니티 모임, 이해관계자 참여, 건강/안전 표준화 및 교육

26) 한국농촌경제연구원(2021.03), 「세계농업정보 제240호」 자료를 바탕으로 정리함

[표 3-5] 미국 록키산맥 재건 BANR 프로젝트

구분	내용
사업개요	• 록키산맥에 있는 수많은 소나무와 가문비나무의 병충해 피해 해소
사업목적	• 바이오연료 생산, 쾌적한 환경 유지, 죽은 나무의 제거, 일자리 창출, 지역 사회 교육 등
사업내용	• 각종 관련 자료들을 수집·분석해 병충해 감염을 예측 • 바이오매스 확보를 위한 비용/생산 모델을 개발하여 원료의 품질 가이드라인을 확립 • 바이오차 활용 평가, 탄소/온실가스 모델링/전과정 평가를 통해 통합 성능 및 지속가능성을 연구 • 에너지/기후/환경 교육 프로그램 개발
기대효과	• 프로젝트를 통한 병충해 문제 해결과 깨끗한 환경 유지 및 지역 사회 교육 공헌

자료 : 우승한(2015), 「기후변화에 대응할 새로운 물질 바이오차」

□ 미국 시카고의 가로수 생육을 위한 바이오차 적용

- 일반적으로 도시의 가로수는 대기 오염 및 기타 외부환경 등으로 인해 생육환경이 열악한 편임
- 가로수 주변 토양에 구멍을 뚫어 바이오차를 첨가하는 방식으로 그 효과를 시험하는 연구를 수행함
- 보다 과학적인 분석을 위해 어린 묘목을 대상으로 정밀하게 별도의 연구를 수행함
 - 바이오매스로부터 만든 바이오솔리드, 바이오차, 퇴비화, 무기질 비료 등 6종류의 처리방법, 3종류의 토양, 2종류의 가로수에 대해 5개의 반복실험으로 총 210개의 가로수에 대해 실험함
 - 각 조건에서의 가로수 성장, 토양과 침출수에서의 탄소와 질소 함량 등을 조사함
- 분석 결과 전체 무게를 기준으로 가장 좋은 결과를 보여준 것은 바이오 솔리드와 바이오차로 선정됨
 - 무처리 대조군에 비해 각각 54%, 44% 증가하였으며, 이는 일반적인 질소/칼륨 비료 36%, 퇴비 24%, 우드칩 29% 보다 높은 수치임

[표 3-6] 미국 시카고, 가로수 생육을 위한 바이오차 적용 사례

구분	내용
사업개요	• 도시의 높은 대기 오염도를 해결하고 가로수의 성장을 도움
사업목적	• 가로수가 필요로 하는 영양분을 공급하고 환경오염 문제를 해결
사업내용	• 가로수 주변 토양에 구멍을 뚫고 바이오차를 첨가하는 방식으로 다양한 조건에서 가로수 성장, 토양 침출수에서의 탄소와 질소 함량을 조사함 • 조사 결과 바이오차가 가장 좋은 효과를 나타냄
기대효과	• 자원의 순환과 폐기물 감량 측면을 통해 환경오염을 해결

자료 : 우승한(2015), 「기후변화에 대응할 새로운 물질 바이오차」

□ 미국 펜실베이니아대, 농수산물 바이오차를 이용한 하·폐수 오염물질 흡착

- 미국의 펜실베이니아 주립대학교(Pennsylvania State University) 연구팀은 면진 폐기물과 라텍스를 생산할 때 사용되는 과울(guayule)의 찌꺼기로 만든 바이오차를 이용하여 하·폐수처리장의 유독성 화합물을 흡착률을 비교하는 연구를 진행함
- 결과적으로 면진 폐기물을 이용한 바이오차가 도쿠세이트(docusate) 98%, 에리트로마이신(erythromycin) 74%, 술파피리딘(sulfapyridine) 70% 등의 의약품 기반 유독성 화합물을 흡착하는 성능이 더 좋은 것으로 나타남
- 면진 폐기물을 이용한 바이오차 생산은 저비용으로 고효율을 낼 수 있다는 장점이 있으며 이러한 농업용 폐자재로 만든 바이오차가 하·폐수의 약물 화합물을 제거하는 효과적인 흡착제 역할을 할 수 있을 것으로 시사함

제3절 국내 바이오차 생산시설 현황

■ 국내 바이오차 생산시설 운영 현황

- 2022년 기준 국내에는 7개의 바이오차 생산시설이 운영되고 있으며, 3개의 시설이 설립 예정되어있음
- 대부분의 업체가 우드 펠릿을 사용하여 바이오차를 생산하고 있으며, 이외 업체는 가축분뇨, 야자수 껍질, 왕겨 등을 원료로 사용함

[표 3-7] 전국 바이오차 생산시설 운영 현황

업체명	위치	용량 (톤/일)	설립 비용 (억 원)	투입 원료	운영비 (만원/월)	평균 생산량 (톤/년)	판매량 (포/50kg)
경동개발	충청북도 음성군	10	-	우드 펠릿	-	3,000	-
누보	울산 광역시	10	-	야자 수 껍질	-	-	-
바이오차 테크	전라북도 김제시	-	70	우드 펠릿	-	-	-
유기산업	충청남도 예산군	480	-	왕겨	250	43,200	-
영덕울진 축협	경상북도 영덕군	10	30	가축 분뇨	설립 예정		
의성군 시설	경상북도 의성군	15		가축 분뇨	설립 예정		
익산군산 축협	전라북도 익산시	20	90	가축 분뇨	설립 예정		
케이 아그로	대구 광역시	-	30	우드 펠릿	-	19,180	383,600
코엔 바이오	강원도 강릉시	60	5	우드 펠릿	-	92.09	-
한국 바이오차	전라북도 임실군	-	-	우드 펠릿	-	-	-

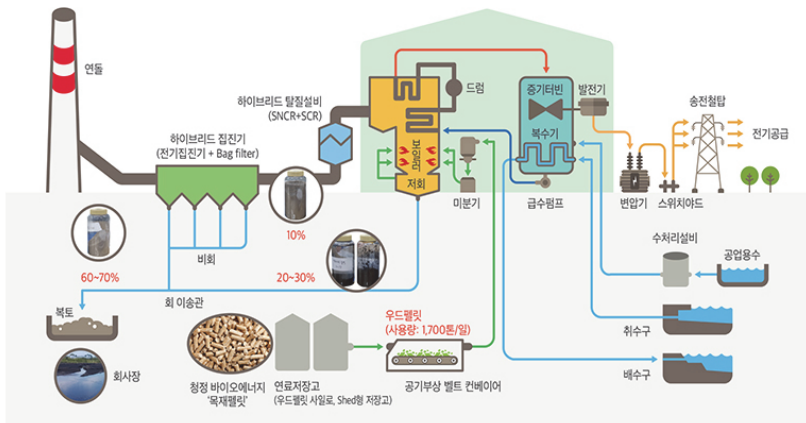
*유기산업의 용량은 480톤/일이나, 바이오차의 비중 0.3일때 생산량은 43,200톤/년임

**설립비용 및 운영비 등 정보 공개를 거부한 업체에 한하여 조사가 불가함

자료 : 저자 작성

- 케이아그로는 2021년 02월에, 코엔바이오 바이오차 생산시설은 2021년 12월에 설립되었으며 우드 펠릿을 이용한 바이오차 생산시설임
- 코엔바이오의 전기 생산 우드 펠릿 발전소 가동 시 불완전 연소로 발생되는 숯을 바이오차로 생산하고 있음
 - 코엔바이오에서 생산되는 바이오차는 케이아그로로 운송되어 판매되고 있음
 - 1,100℃에서 연소된 미연분을, 노하부 650~800℃에서 활성화 및 자연 열분해하여 바이오차를 생산함

● 우드펠릿 발전소 공정도(영동 1호기, 125MW)



자료 : 케이아그로(<http://k-agro.co.kr/>)

[그림 3-14] 코엔바이오 바이오차 생산시설 공정도

- 전라북도 김제시에 위치한 바이오차테크는 2017년에 70억 원을 투자하여, 바이오차 시설을 설립하였으며, 순수 원목을 사용하며 만든 우드 칩을 사용하여 바이오차를 생산하고 있음
- 바이오차 생산시 작물의 생육이 가능하도록 pH 6~7까지 열분해하는 방법을 사용하여 미생물이 원활하게 성장하도록 하는 일부의 유기물이 존재하는 것이 특징임



자료 : 바이오차테크(<http://www.bghenergy.co.kr>)

[그림 3-15] 바이오차테크의 바이오차 생산시설

- 충청남도 예산에 위치한 유기 산업의 경우 480톤/일의 생산시설을 보유하고 있으며, 시설 설립 비용은 약 70억 원의 비용이 소요되었고 월 운영비는 약 50만 원의 전기료를 포함한 인건비, 열교환기 가스 비용 등을 합산하여 평균 250만 원 정도 소요됨
- 유기산업은 전기히터에 2분 정도의 에너지를 넣어 가열하고, 브로잉에 의해서 전체를 열분해하는 바이오차 생산 방법을 사용하고 있음
 - 왕겨를 각 탄화료로 이송 및 투입된 후 균일하게 탄화될 수 있도록, TLUD(Top-Lit-Up Draft gasifier) 연소생산시스템 적용하여 약 270분 동안 450~550℃ 정도의 온도에서 직접 탄화과정의 전처리를 거친 후 바이오차로 제작하고 있음



자료 : 유기산업(<https://www.yougiind.com/>)

[그림 3-16] 유기산업의 바이오차 생산시설 및 TLUD 공정과정

□ 국내 바이오차 생산시설 위치

- 국내 바이오차 생산시설은 지역별로 강원도 1개, 충청도 2개, 전라도 3개, 경상도 4개의 시설이 있음
- 강원도에는 코엔바이오(강릉시), 충청도에는 유기산업(예산군)과 경동개발(음성군), 전라도에는 바이오차테크(김제시), 익산군산축협(익산시), 한국바이오차(임실군), 경상도에는 누보(울산광역시), 영덕울진축협(영덕군), 의성군시설(의성군), 케이아그로(대구광역시)가 위치함



출처 : 저자 작성

[그림 3-17] 국내 바이오차 생산시설 위치

□ 생산된 바이오차 예시

- 국내 대부분의 업체가 생산된 바이오차를 토양개량제, 퇴비로 판매함



<바이오차테크 바이오차>
자료 : 바이오차테크, 누보



<누보 바이오차>



<바이오차 농경지 적용>

[그림 3-18] 생산된 바이오차 생산품 예시 및 살포 사진

바이오차 활용방안

제1절 방향 설정

제2절 바이오차 활용방안

제3절 바이오차 생산에 따른

온실가스 저감효과

4장

제4장 바이오차 활용방안

제1절 방향 설정

- 바이오차는 유기성폐자원(가축분뇨, 농업부산물, 하수슬러지 등)의 재활용과 탄소중립 및 에너지원으로의 활용 등에 있어 가치가 있음
- 국내에서는 탄소중립과 재생에너지원 개념에서 사업화가 활성화되는 단계이나 현재까지는 바이오차 생산의 품질기준과 활용방안 등에 대해 정립이 이루어지지 않아 관련 연구가 필요한 실정임
- 본 연구에서는 국내외 유사 연구내용을 바탕으로 바이오차의 활용방안을 다음 3가지로 구분하였으며, 구체적인 내용은 ‘제2절 바이오차 활용방안’에 제시함

- 첫째, 농경지 토양개량제로 활용
- 둘째, 지하수 및 하천수 등으로의 양분유출 저감수단으로 활용
- 셋째, 재생에너지원으로 활용

- 또한 바이오차의 생산·활용에 따른 환경적 기대효과로 온실가스 감축효과 및 농경지내 양분삭감 효과가 있을 것으로 판단됨

가축분뇨 · 하수슬러지 · 농업부산물을 활용하여 바이오차 생산



[그림 4-1] 세종시 바이오차 활용방안

제2절 바이오차 활용방안

1. 세종시 바이오차 생산 가능량 검토

- 바이오차의 활용방안에 대해 논하기 전에 세종시의 바이오차 생산 가능량을 우선 검토하여 제시함
- 바이오차 생산을 위한 원료로 유기성폐기물인 가축분뇨, 하수슬러지, 농업부산물 발생량 등에 대한 세종시 현황을 검토하였으며, 이를 바탕으로 한 바이오차 생산 가능량을 도출함

1) 가축분뇨를 활용한 바이오차 생산

□ 세종시 축종별 가축분뇨 발생량

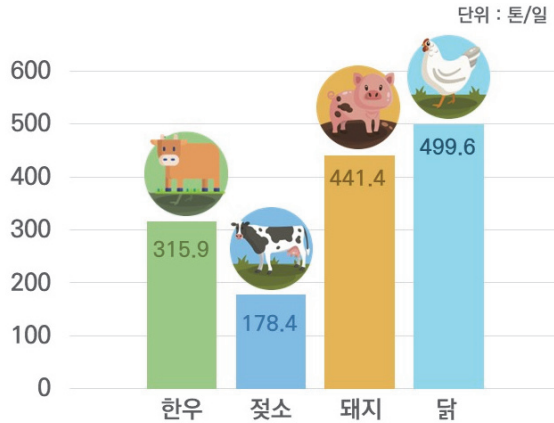
- 2019년 기준 세종시 주요 축종별 사육두수와 국립환경과학원(2022) 「수질오염총량관리기술지침」에 따른 축종별 가축분뇨 발생유량 원단위를 고려하여 가축분뇨 발생량을 산정함
- 축종별 가축분뇨 발생량은 한·육우는 315.9톤/일, 젖소는 178.4톤/일, 돼지는 441.4톤/일의 가축분뇨를 발생하는 것으로 나타났으며, 닭이 499.6톤/일로 나타남
- 축종별 분뇨발생량 중 퇴·액비화 비율은 젖소 55%, 돼지 81%이며, 한우 및 닭의 경우 전량 100% 퇴비화되고 있음

[표 4-1] 세종시 축종별 가축분뇨 발생량

구분	한우	젖소	돼지	닭
사육두수	24,487	4,405	93,919	2,938,626
발생량 원단위(톤/두/일)	0.0129	0.0405	0.0047	0.00017
가축분뇨 발생량(톤/일)	315.9	178.4	441.4	499.6
퇴액비화 비율(%)	100%	55%	81%	100%

자료 : 환경부(2019), 「전국오염원조사자료-축산계」, 국립환경과학원(2022) 「수질오염총량관리 기술지침」

세종시 가축분뇨 발생량 (2019)



[그림 4-2] 2019년 기준 세종시 가축분뇨 발생량

□ 가축분뇨를 활용한 바이오차 생산 가능량

- 세종시의 농경지에 투입되는 가축분뇨 양분관리 측면에서 검토했을 때, 약 50% 수준으로 가축사육두수를 감축하는 것이 요구됨²⁷⁾
- 따라서 본 연구에서는 우분 발생량의 50%를 바이오차 생산을 위한 원료로 가정함
- 가축분뇨 100톤/일(함수율 75%) 기준, 퇴비화했을 때 퇴비는 42톤 생산되며, 바이오차는 20톤이 생산되어 가축분뇨 처리 효율성이 우수함
- 즉, 가축분 10톤 투입 시 바이오차 2톤 생산이 가능함
- 결과적으로 세종시 가축분뇨(우분) 발생량(315.9톤/일) 중 50%를 원료로 사용할 경우 바이오차 생산 가능량은 31.6톤/일으로 산정됨
- 가축분뇨의 퇴비 생산과 대비하여 바이오차를 생산 시 주요 장점은 최종 생산물을 감소시킬 수 있으며 보관 및 관리가 용이하고, 농경지 살포시 악취 발생이 없다는 점임

27) 이윤희 et al.(2022), 「세종시 가축분뇨 양분관리 대응방안」 연구 결과에 따른 것임

<퇴비와 바이오차의 주요특성 비교, 농식품부>

가축분뇨 100톤/일 기준(합수율 75%)		주요 기대효과
퇴비화	바이오차	
퇴비 42톤 생산	바이오차 20톤 생산	생산물 감소
생산과정 및 살포시 악취 발생	악취 없음	관리 용이
중금속 등 우려, 온실가스 배출	중금속 용출 감소, 온실가스 고정	환경오염저감
30일 이상	1일 미만	처리기간 단축

자료: 농식품부 보도자료(2022.10), “가축분 바이오차로 축산업의 탄소중립 구현하다”

[그림 4-3] 퇴비와 바이오차의 주요 특성 비교

2) 하수슬러지를 활용한 바이오차 생산

□ **세종시 하수슬러지 발생현황 및 바이오차 생산 가능량**

- 세종시의 2014년 인구수는 158,844명에서 2021년 376,779명으로 7년간 인구수가 약 240% 증가하였으며, 하수슬러지 발생량은 2014년 6,769톤에서 2021년 30,455톤으로 약 450% 증가함
- 하수슬러지 투입량의 약 25%²⁸⁾가 바이오차로 생산이 가능하며, 이를 기준으로 산정할 때 슬러지 30,455톤 중 7,614톤/년의 바이오차 생산이 가능함

[표 4-2] 세종시 처리장별 하수슬러지 발생량

(단위 : 톤/년)

연 도	합 계	수질복원 센터(A/B)*	조치원	전 의	연 서	연동부강
2014	6,769	-	6,397	372	-	-
2017	22,287	14,518	6,409	581	779	-
2018	21,791	14,167	6,331	518	775	-
2019	21,067	13,177	6,524	591	775	-
2020	26,319	18,925	5,953	654	787	-
2021	30,455	22,572	5,906	482	775	720

*수질복원센터B에서 발생한 하수슬러지는 수질복원센터A로 이송 후 병합처리함
 자료 : 세종시 내부자료(2015-2021), 「하수슬러지 처리현황」

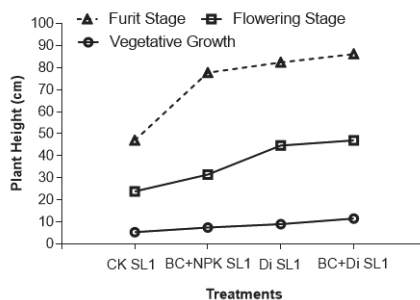
28) 서울시립대학교(2018), 「하수슬러지와 우분 배합 Biochar의 토양개량제 활용성 연구」

□ 서울시립대학교, “하수슬러지와 우분을 활용한 바이오차 생산”²⁹⁾

- 김태흠(2018)의 연구에 의하면 하수슬러지와 우분을 배합하여 제작한 바이오차의 탄소 함량이 배합 전에 비해 증가하여 유기성 폐기물이 토양개량제로서 활용될 수 있음
 - 배합 바이오차의 pH는 6.28로 약산성을 띠고 있었으며, 토양평가 상급 기준에 해당함
- 배합 바이오차 생산 시 HTC(열수탄화)를 이용하면, 수분함량이 높고 수질오염문제와 악취발생의 주요염원인 하수슬러지와 우분의 수분제거를 위한 전처리 시설이 별도로 필요 없음

□ 중국 허하이대 연구팀, “하수 슬러지와 바이오차 혼합 시 긍정적 효과”

- 중국 허하이대(Hohai University) 연구팀의 연구 결과에 의하면 혐기성 소화의 부산물인 슬러지와 바이오차를 혼합하여 토양 개량제로 사용하면 작물의 생장에 더욱 긍정적인 효과를 보임
- 슬러지와 바이오차를 혼합한 토양과 그렇지 않은 일반 토양에서의 식물 생식생장 비교 시 혼합 토양에서의 식물 크기는 88.30cm, 일반 토양에서는 44.70cm로 약 2배 가까이 확연한 성장차이를 보임
- 결과적으로 슬러지와 바이오차를 혼합하여 토양개량제로 사용시 작물의 성장, 광합성 속도, 물 사용 효율, 작물 수확량에 긍정적인 영향을 줌



자료: Mohammed et al.(2018)

[그림 4-4] 하수슬러지와 바이오차 혼합 실험 결과

29) 김태흠(2018), 「하수슬러지와 우분 배합 Biochar의 토양개량제 활용성 연구」

3) 농업부산물을 활용한 바이오차 생산

- 농산 바이오매스는 축산이나 임산분야에 비해 활용 용도가 높은 장점이 있으며, 농촌지역의 폐기물계 바이오매스를 활용하여, 바이오차 제작 시 농림업의 자연순환기능을 유지 및 증진시켜 농업 활성화에 기여가 가능함³⁰⁾
- 농산 바이오매스의 활용이 활성화되기 위해서는 바이오매스 이용에 따른 경제성과 편리성이 충족되어야 하며, 이를 위해 바이오매스의 수집 및 자원화 비용을 최소화할 필요가 있음³¹⁾

□ 세종시 농업부산물 발생 현황

- 통계청 자료에 의하면 농업부산물 발생 현황은 도별단위로 자료가 생성되고 있어 세종시 농업부산물 발생 현황만 정리하는 데 한계가 있음
- 한편 농업부산물의 발생량은 작물별 단위면적당 발생량과 재배면적에 비례함
- 따라서 본 연구에서는 세종시의 최근 부산물 발생량을 산정하기 위하여 세종시 전체 논벼 경지면적과 전국 논벼 재배농가의 평균적인 경지면적 (ha) 당 부산물 수량을 비례식을 이용함
- 세종시의 논벼 부산물 발생량은 2017~2021년 평균 약 57,722.8ton의 논벼재배로 인한 농업부산물이 발생하는 것으로 추정함

[표 4-3] 논벼 부산물 발생량

(단위 : ha, ton)

구 분		2017	2018	2019	2020	2021
전국 평균	경지면적	2.4506	1.9357	2.0189	2.0085	1.9632
	부산물 수량	17.462	14.883	15.511	15.479	14.982
세종시	경지면적	7,958	7,704	7,588	7,555	7,358
	부산물 수량	56,706	59,234	58,298	58,224	56,152

자료 : KOSIS, 「도별 논벼 생산농가의 경영개황」, 「시군별 논밭별 경지면적」

30) 한국농촌경제연구원(2007), 「농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략」

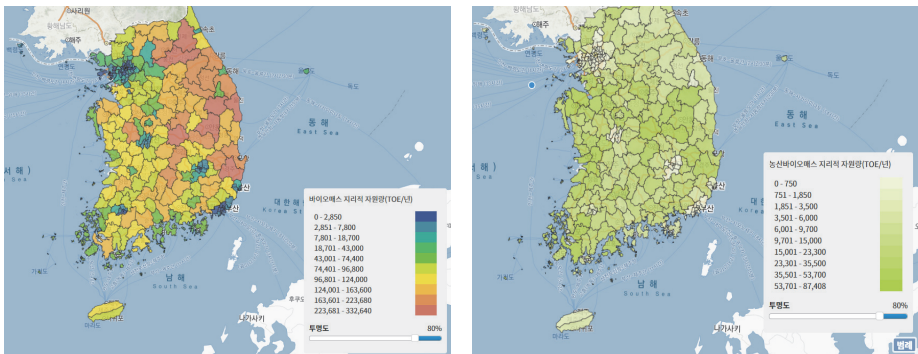
31) 한국농촌경제연구원(2008), 「농산 바이오매스 이용의 손익분기 규모와 이용 활성화 방향」

- 또한 한국에너지기술연구원의 자원지도분석시스템에서 제공하는 세종시 농산바이오매스의 발생 현황은 다음과 같음
- 농산바이오매스의 총 발생량은 71,973톤/년이며, 이론적 잠재량은 18,842TOE/년으로 나타남

[표 4-4] 세종시 농산바이오매스 발생 현황

구 분	발생량(톤/년)	이론적 잠재량(TOE/년)
합 계	71,973	18,842
벼/왕겨/보리/쌀보리	57,062	13,412
감자/고구마/옥수수/콩	2,275	506
고추/참깨/들깨	1,756	2,117
사과/감/배/포도/복숭아	10,880	2,807

자료 : 한국에너지기술연구원 자원지도분석시스템(<https://kier-solar.org/>), 2015년 기준



전체 바이오매스 자원량

농산 바이오매스 자원량

자료: 한국에너지기술연구원 자원지도분석시스템 (<https://kier-solar.org/>)

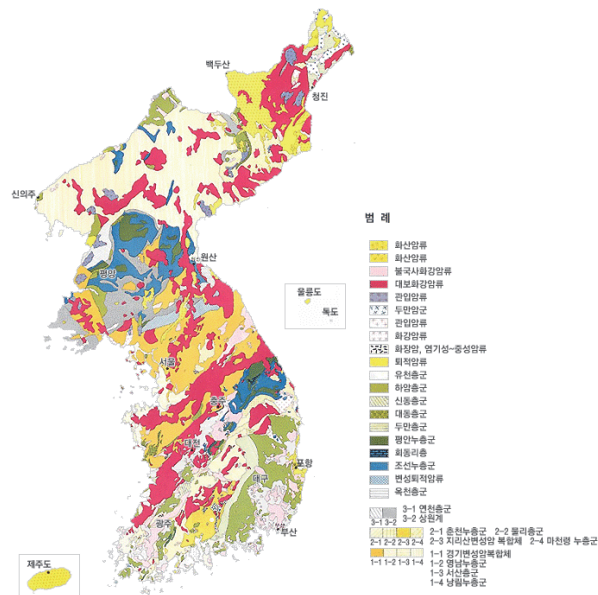
[그림 4-5] 국내 바이오매스 자원량 지도

- 한편 농업부산물을 이용한 바이오차 생산의 경우 농업부산물의 종류가 다양하고 이와 관련한 연구사례가 없어 정확한 바이오차 생산량을 산정하기 어려운 한계가 있음
- 관련한 상세 연구 및 시범사업 적용 등을 통해 데이터를 축적할 필요가 있음

2. 농경지 토양개량제로 활용

■ 토양환경 개선 및 작물생산성 증대

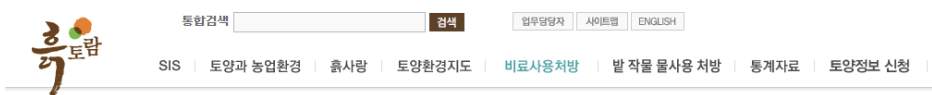
- 토양개량제는 토양 내 유기물, 칼슘 및 마그네슘 함량을 개선시키고 물의 이동 및 공기의 유통 등을 원활히 하여 작물의 생산성을 높이기 위한 목적으로 활용되고 있음
 - 토양의 구성은 공기 25%, 물 25%, 유기물 5%, 무기물(광물) 45% 정도이며, 토양의 종류에 따라 상대적인 비율은 차이가 있음
- 세종시 지역의 지질 특성은 대보화강암류 내지 퇴적암류로 판단되며, 화강암에서 유래된 토양의 경우 일반적으로 토양 내 칼슘(Ca)과 마그네슘(Mg) 함량이 상대적으로 낮은 특성이 있음(그림 4-6)
- 토양 내 무기물질은 강우시 용해되어 용출되거나 식물 성장과 함께 흡수·소비되기 때문에 그 함량이 지속적으로 감소함
- 한편 비료의 경우 질소(N), 인(P), 칼륨(K)을 주요 성분으로 하므로 토양 내 식물생장에 필요한 미량 영양소의 공급은 다른 형태로 이루어져야 함



자료 : 국토교통부 홈페이지(<http://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp>)

[그림 4-6] 한국지질도

- 바이오차에는 미세기공이 많고, 미세기공이 산소를 잡아두는 역할을 하여 공기 순환이 증가됨에 따라 질산화 반응을 촉진시켜 식물체에 질소 공급 향상 및 미생물 거주지 역할을 함
- 또한 산성토양 보다는 중성토양에서 비료의 효과가 높아져 양분 흡수율이 높아지기 때문에 작물의 생산성이 높아지는 원리임
- 이러한 토양환경을 토양개량제 투입을 통해 개선할 수 있으며, 앞서 3장의 관련 연구 및 활용사례에서도 제시하였듯이 작물 생산성 제고에 효과가 있는 것으로 보고되는 사례가 늘고 있음
- 일반적으로 토양의 주입 양은 토양 전체의 0.5% 이하 수준이며, 토양 분석을 통해 적절한 유기물, 칼슘 및 마그네슘의 투입량을 고려할 수 있음
 - 밭토양 양분함량의 적정 범위는 각각 유기물 20~30g/kg, 칼슘 5.0~6.0cmol/kg, 마그네슘 1.5~2.0cmol/kg 정도임
- 지역별 토양검정정보는 '흙토람' 홈페이지를 통해 확인할 수 있으며, 리단위의 pH, 유기물, 유효인산, 치환성 양이온(칼륨, 칼슘, 마그네슘), 전기전도도, 유효규산 등의 화학성 평균값을 확인할 수 있음



자료 : 흙토람 홈페이지(<http://soil.rda.go.kr/soil>)

[그림 4-7] 흙토람 홈페이지를 통한 토양검정정보 확인 예시

- 바이오차의 농경지 주입 주기 및 투입량은 토성 및 재배작물 등에 따라 달라질 수 있으므로 세부적인 연구를 통해 그 기준을 마련할 필요가 있음
 - 일반적으로 주입주기는 2년에 1회 정도가 적절한 것으로 보고되고 있으나 토성 및 작물에 따라 상이함
 - 투입량의 경우 생산된 바이오차의 원료 및 특성에 따라 달라질 수 있고, 예를 들어 ‘쏘웰’이라는 바이오차의 경우 100평당 100kg의 주입이 필요하며 세종시 읍면지역의 밭토양 기준 10,308톤의 바이오차가 소요될 것으로 판단됨
- 또한 바이오차의 흡착능력 및 생산량 변화 등에 대한 검토가 필요할 것임

[표 4-5] 세종시 농경지 면적

구 분	논(ha)	밭(ha)	과수원(ha)	작물재배면적(ha)
세종시	5,697.6	3,407.5	644.8	7,273
조치원읍	112.2	92.6	75.1	165
연기면	563.0	319.1	24.8	294
연동면	691.9	270.0	29.4	749
부강면	381.2	246.8	7.6	415
금남면	1,001.9	538.8	38.2	1,264
장군면	743.8	374.2	15.0	1,181
연서면	745.4	492.9	356.0	1,234
전의면	638.6	537.9	9.6	879
전동면	623.3	392.5	88.3	827
소정면	196.3	142.7	0.8	266

자료 : AgriX(2019) 자료를 바탕으로 저자 작성

■ 바이오차의 토양개량제 활용에 따른 추가적 기대효과

□ 탄소저장 효과

- 바이오차 원료 중 탄소는 열분해를 거치면서 안정된 형태의 방향족 구조로 재배열돼 토양 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않으며, 미생물 분해에 대해 강한 저항성을 가지고 토양 내에 존재 가능하여 초기 바이오매스 탄소의 약 20%를 바이오차 형태로 반영구적 탄소 격리가 가능함³²⁾

□ 토양의 표토 유실 방지 및 토양오염 정화 효과

- 토양에 존재하여 흡착된 바이오차는 열분해 온도 증가량에 따라 표면적을 증가시키는데, 이는 이동성이나 농도를 저감시키는 잠재적 요인이 됨
- Mingcan 등(2009)은 바이오차를 각 0%, 1%, 3%의 비율로 혼합한 오염 토양에 pH 3.3의 인공 강우(산성비)를 유입한 칼럼 용출 실험 결과, Cu, Zn 등의 중금속 용출 농도가 90% 이상 감소된 것으로 보고함

3. 지하수 및 하천수 등으로의 양분유출 저감수단으로 활용

- 수질오염총량관리 측면에서 접근했을 때 농경지 자체를 토지계 비점저감시설로 활용하는 방안을 고려할 수 있음
- 농경지에 바이오차를 투입할 경우 양분이 토양내에 저장되어 일반 비료가 완효성비료로 작용하는 효과를 기대할 수 있음
 - 활성탄과 같이 바이오차 내부에 공극이 많고 그로 인한 흡착 능력이 있으므로 양분 저장 효과가 있다고 볼 수 있음
- 바이오차가 무기태 질소를 흡착하면 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)와 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 유출에 의한 손실을 줄여, 양이온 치환능력이 높아짐으로써 식물 뿌리에 공급되는 영양분이 천천히 방출되어 완효성비료 역할이 가능함
 - 무기태 질소 : 유기물의 일부가 아닌 구조가 매우 단순한 질소화합물에 들어있는 질소
 - 유기태 질소 : 유기화합물의 구성분인 질소
 - 암모늄태 질소($\text{NH}_4\text{-N}$) : 무기태 질소의 하나로 부식으로부터 생성, 수용성, 속효성
 - 질산태 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) : 식물의 주된 영양소, 수용성, 속효성, 용탈 쉬움
 - 완효성비료 : 한 번에 비료를 준 다음 농작물의 전 생육기간동안 서서히 비료성분을 용출하게 해주는 비료

32) 우승한(2013), 「토양탄소격리를 위한 바이오차」

- 따라서 양분의 유출량 저감을 기대할 수 있어 토지계 배출부하를 낮추는 효과가 있으므로 이를 바탕으로 토지계 수질오염삭감계수로 활용할 수 있을 것으로 판단됨
- 지하수 및 하천 등으로의 유출저감 효과에 대해서는 향후 상세 연구 등을 통한 검토가 필요하며, 삭감계수로 활용되기 위한 구체적인 연구가 필요함
- 바이오차를 토양에 섞어 사용할 경우 풍화가 진행됨에 따라 바이오차의 표면적이 넓어져 제초제, 농약 성분의 흡착능력도 증가하는 효과가 있음³³⁾

4. 재생에너지원으로 활용

- 바이오매스를 탄소가 농축된 고열량의 바이오차로 가공하여 청정고형 재생연료로 활용하는 방안임
- 단, 고형연료제품의 품질기준을 강화하여 연료화에 대한 가능성을 제고할 필요가 있음
- 또한 바이오차의 에너지 부분 활용을 위해서는 저위발열량을 최대화하는 방향으로 생산이 필요함
 - 보일러 투입시 습은 연소조건이 달라져 발열량이 낮아지므로 이를 개선하는 연구 등이 추가로 필요할 것으로 판단됨
- 바이오차 생산과정에서 발생하는 기체와 액체 역시 에너지원으로 사용할 수 있음
 - 바이오가스는 바이오차 제조에 필요한 에너지원으로 사용되기에 고온으로 가열하는데 필요한 연료의 대체가 가능함
 - 바이오오일은 수송용 연료로 사용이 가능하며, 연간 발생하는 CO₂ 발생량을 감소할 수 있음

33) Carmen Trigo et al.(2014)

제3절 바이오차 생산에 따른 온실가스 저감효과

1. 세종시 농업부문 온실가스 배출량

■ 세종시 온실가스 총 배출량

- 세종시 온실가스 총 배출량은 2018년까지 지속적으로 증가 추세를 나타내었으며, 2019년에 다소 감소함
- 세종시는 도시성장과 함께 인구증가로 인한 에너지 사용량이 증대되면서 온실가스 배출량도 증가 추세를 나타냄
- 2019년 기준 세종시의 온실가스 총 배출량은 2,858천톤CO₂eq. 이며, 이는 LULUCF에 의한 감축량 및 발전에 의한 온실가스 배출량을 제외하고, 간접배출량을 합산한 값임(직접+간접-LULUCF-발전)

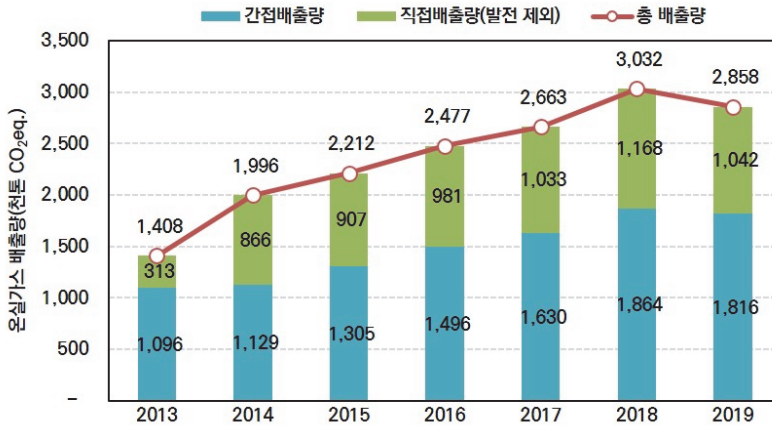
[표 4-6] 세종시 분야별 온실가스 배출 변화 추이

(단위 : 천 톤 CO₂eq)

구 분		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
직접 배출량	소계	312.5	866.4	906.6	981.2	1,033.1	1,168.3	1,042.4
	순배출량	-1,941.2	-1,549.8	-1,337.3	528.2	611.4	917.5	840.8
	에너지	143.0	580.0	645.1	667.0	678.8	695.0	737.3
	산업공정	34.3	54.7	29.5	38.1	20.7	72.5	33.2
	농업	0.6	81.0	77.1	87.3	126.1	161.2	161.4
	LULUCF	-2,253.7	-2,416.1	-2,243.9	-453.0	-421.8	-250.8	-201.6
	폐기물	134.5	150.7	155.0	188.8	207.5	239.6	110.4
간접배출량	1,095.8	1,129.2	1,305.2	1,495.8	1,630.3	1,864.0	1,815.7	
직접*+간접	1,408	1,996	2,212	2,477	2,663	3,032	2,858	

*LULUCF 및 발전 제외

자료 : 온실가스종합정보센터(2021.12)



자료: 온실가스종합정보센터(2021.12) 자료를 바탕으로 저자 작성

[그림 4-8] 세종시 온실가스 배출 현황

■ 농축산 부문 온실가스 배출량

- 농축산 부문의 온실가스 중 약 85.8%는 농업 생산과정에서 발생하는 CH₄와 N₂O임³⁴⁾
- 경종 및 축산활동에 의한 비에너지 부문의 온실가스 배출이 대부분을 차지하고 있음
- 농축산 부문 온실가스 총 배출량은 2014년 89.14천 톤 CO₂eq.에서 2019년 163.10천 톤 CO₂eq.로 약 180% 증가하였으며, 이 중 에너지 부문에서의 배출량은 8.10천 톤 CO₂eq.에서 1.59천 톤 CO₂eq.로 오히려 감소하는 추세를 보임

34) 2050 탄소중립 시나리오

[표 4-7] 세종시 농축산 부문 유형별 온실가스 배출량

(단위 : 천 톤 CO₂eq.)

연도	총 배출량	비에너지					에너지 (농축산)
		계	경종		축산		
			벼 재배	농경지 토양	장내 발효	가축 분뇨	
2014	89.14	81.04	-	17.05	38.50	25.49	8.10
2015	84.10	77.09	-	16.55	36.79	23.75	7.01
2016	93.58	87.27	11.84	16.34	36.43	22.66	6.31
2017	128.80	126.13	22.72	29.95	39.36	34.10	2.67
2018	162.85	161.20	33.10	42.10	38.92	47.08	1.65
2019	163.01	161.42	31.29	42.85	40.18	47.10	1.59

자료 : 환경부 온실가스종합정보센터(2021), 「2021년 지역별 온실가스 인벤토리 공표」

■ 가축분뇨로 인한 온실가스 발생량

- 우분 1톤 당 0.13CO₂eq.톤의 온실가스를 발생시키며, 돈분은 1톤 당 0.03톤CO₂eq., 가금분의 경우 1톤 당 0.02톤CO₂eq.의 온실가스를 발생시킴³⁵⁾
- 2019년 기준 세종의 가축분뇨로 인한 온실가스 발생량은 우분 23.05 천 톤 CO₂eq./일, 돈분 10.13 천 톤 CO₂eq./일, 가금분 13.22 천 톤 CO₂eq./일이 발생되고 있음

[표 4-8] 세종시 가축별 분뇨처리 온실가스 배출량

(단위 : 천 톤 CO₂eq.)

구 분	합 계	축종별 온실가스 배출량			
		소	돼지	가금류	기타
2014	25.49	24.98	-	0.04	0.46
2015	23.75	23.08	-	0.07	0.60
2016	22.66	22.10	-	0.05	0.50
2017	34.10	22.10	11.56	0.02	0.42
2018	47.08	22.39	10.72	13.40	0.57
2019	47.10	23.05	10.13	13.22	0.71

자료 : 환경부 온실가스종합정보센터(2021), 「2021년 지역별 온실가스 인벤토리 공표」

35) 환경부(2020), 국가 온실 인벤토리

■ 농경지 2050 국가 온실가스 감축 목표

- 농경지에서의 2050 온실가스 감축 목표는 질소비료 저감(kg/ha), 바이오차 보급(토양개량제대비 보급률%), 농경지 투입 분뇨량 저감(%)을 지표로 하여 2030년 2,008천 톤 CO₂eq., 2040년 2,114천 톤 CO₂eq., 2050년 2,269천 톤 CO₂eq.의 온실가스 감축을 목표로 함
- 농경지의 온실가스를 감축하기 위한 수단으로는 ①비료감축 및 시비 처방 확대, ②농약적정사용 체계구축, ③바이오차 검증 및 농가보급, ④경운 최소화 등을 제시함

[표 4-9] 농경지 2050 온실가스 감축 목표

(단위 : 천 톤 CO₂eq.)

구 분	2030년		2040년		2050년	
	목표치	감축량	목표치	감축량	목표치	감축량
합 계		2,008		2,144		2,269
질소비료 저감(kg/ha)	115	267	115	268	115	268
바이오차보급 (토양개량제대비 보급률%)	9	58	9.5	6.2	10	65
농경지 투입 분뇨량 저감(%)	33	1,638	34	1,814	35	1,936

자료 : 농림축산식품부(2021.12.27.), 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」

2. 바이오차 생산에 따른 온실가스 감축 효과

- 기존 바이오매스의 처리방법은 대부분 매립에 의존하였으며, 이는 온실가스인 아산화질소(N₂O)를 생성하지만 바이오차로 처리할 경우 아산화질소 발생량이 최대 15% 감소함³⁶⁾

□ 가축분뇨를 투입하여 바이오차 생산 시, 온실가스 감축량

- 토양에 가축 분뇨로 만든 바이오차를 투입할 시 이산화탄소(CO₂) 뿐만 아니라 아산화질소(N₂O) 방출을 줄이며, 산림 토양에서는 지렁이 등의 호흡 및 활동으로 발생하는 온실가스 발생량 또한 감소시킴³⁷⁾

36) Yangi et al.(2007)

37) Yi Cheng et al.(2012), Xiaoqiang Gong et al.(2022)

- 가축분 바이오차 1톤은 온실가스 1.95~2.85톤CO₂eq.을 감축할 수 있을 것으로 예상되며, 이는 목질계 바이오차 0.95톤CO₂eq. 및 왕겨 바이오차 1.24톤CO₂eq. 보다 온실가스 감축 효과가 높음

□ 하수슬러지를 투입하여 바이오차 생산 시, 온실가스 감축량

- 하수슬러지를 포함한 유기성, 가연성 폐기물류를 연속식 열분해를 통해 바이오차로 변환하면 폐기물 감량효과 및 온실가스 감축 효과가 있음³⁸⁾
- 건조슬러지 1톤을 기존 석탄화력의 보조연료로 사용할 경우, 0.599톤 CO₂eq.의 온실가스 감축효과 있을 것으로 기대함
 - LNG 가스 87만 4000kcal(약 83.5Nm³)의 열량을 태우면 온실가스 0.185톤CO₂eq.이 발생되며, 경유 141만kcal(약 157.6L)의 경우 0.414톤CO₂eq.이 발생됨(총 0.599톤CO₂eq.)

구분		내용
개요		폐수 슬러지를 포함한 유기성·가연성 폐기물류를 '연속식 열분해'를 통해 가스, 온수, 오일, 차(Char)로 변환하여 폐기물 감량 효과 및 온실가스 감축의 효과 확인 가능
하수슬러지(SRF) 1ton 연속 열분해 시 생산에너지	가스	약 9,200kcal/m ³ × 95m ³ = 874,000kcal (도시가스(LNG) 83.555Nm ³)
	오일	약 9,400kcal/kg × 150kg = 1,410,000kcal (경유 156.7ℓ)
	합계	총 2,284,000kcal
온실가스 감축효과		건조슬러지 1톤을 기존 석탄화력의 보조연료로 사용 •[A]도시가스 83.555Nm ³ X 순발열량(39.4TJ/1000000m ³) X 배출계수(56.236tCO ₂ eq/TJ) X 산화계수(1) = 0.185tCO ₂ eq •[B]경유 157.6 ℓ X 단위환산(10 ⁻³) X 순발열량(35.3TJ/1000m ³) X 배출계수 (74.496tCO ₂ eq/TJ) X 산화계수(1) = 0.414 tCO ₂ eq •[A]+[B] = 0.185 + 0.414= 0.599tCO ₂ eq
모니터링		사용량(ton)

자료 : 머니투데이(2022.2.21.), “이피에스, “하수슬러지서 연료 생산..탄소중립 현실적 방안”

[그림 4-9] 하수슬러지를 활용하여 바이오차 생산 시 온실가스 감축량

38) 머니투데이(2022.2.21.), “이피에스, “하수슬러지서 연료 생산..탄소중립 현실적 방안”

결론

제1절 종합
제2절 정책제언

5장

제5장 결 론

제1절 종합

■ 농업분야 탄소중립 정책방향

- (메탄) 2030년까지 국가 전체 메탄 배출량을 2018년(28백만 톤) 대비 2030년 19.7백만 톤(2018년 대비 29.7% 감축) 배출을 목표로 하고 있으며 이를 NDC에 반영함
 - 농축수산 분야에서는 2018년 대비 20.6% 감축한 9.7백만 톤 배출을 목표로 하고 있음
- 비에너지 온실가스 배출량의 경우, 경종 분야는 논 면적 감소 등으로 온실가스 배출량이 1990년 대비 2018년에 22% 감소하였으나, 축산 분야는 가축 사육두수 증가로 인해 온실가스 배출량이 62% 증가함
- 「2050 탄소중립 시나리오(안)」에는 축산업(가축 관리)과 관련된 감축 수단으로 영농법 개선을 위한 '바이오차 등 신규 기술 확대'가 제시됨

■ 바이오차의 개념 및 탄소감축 원리

- 바이오차(Biochar)란? 바이오매스(biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로 농업부산물, 목재 등을 300~350℃ 이상의 온도에서 산소 없이 열분해하여 만든 숯 형태의 유기물(탄소 함량이 높은 고형물)을 말하며, 토양 살포 시 토양 내 탄소저장 효과가 있음
- 바이오매스가 열로 분해되어 바이오차가 되는 경우 바이오매스에 고정된 탄소가 상당 부분 바이오차에 남게 되어(약 80%), 미생물에 대한 분해나 화학적 변화가 거의 일어나지 않아 오랫동안 탄소를 토양 내에 잡아 둘 수 있음

- 바이오차의 원료로는 농축산계 바이오매스(곡물, 농업부산물 등), 산림 바이오매스(나무 폐기물, 낙엽 등), 폐기물 바이오매스(하수슬러지, 가정 쓰레기 등)

■ 바이오차 관련 선행연구

- (작물 생산성 증대 기술) 바이오차는 다공성 구조로 토양에 사용시 토양의 통기성과 수분 보유력 등을 증대시킴으로 농업생산성을 증대시키는 효과를 나타냄
 - 토양환경개선 시범사업 추진 결과, 작물의 생산성이 35% 정도 증가하는 효과를 보임
- (바이오차 연료화 기술) 음식물쓰레기를 바이오차로 생산하고 청정 고형 재생연료(Bio-SRF ; Solid Refuse Fuel)로 활용함으로써 사료 또는 퇴비로 활용할 때보다 유기물질 발생량이 적고, 악취가 발생하지 않으며, 보관이나 운반이 용이한 장점이 있음
- (탄소격리 기술) 바이오차를 혼합하지 않은 토양에 비해 바이오차를 적용한 토양에서 약 10% 정도의 CO₂ 배출량이 저감되는 효과가 있었음

■ 국내 바이오차 생산시설

- 2022년 기준 국내에는 7개의 바이오차 생산시설이 운영되고 있으며, 3개의 시설이 설립 예정되어있음
 - 지역별로 강원도 1개, 충청도 2개, 전라도 3개, 경상도 4개의 시설이 있음
- 대부분의 업체가 우드 펠릿을 사용하여 바이오차를 생산하고 있으며, 이외 업체는 가축분뇨, 야자수 껍질, 왕겨 등을 원료로 사용함

■ 국내외 바이오차 활용사례

- 국내외 바이오차의 활용사례에 대해 종합하여 다음과 같이 나타냄

[국내외 바이오차 활용사례 종합]

구 분	내 용	
국 내	충북 괴산군	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 시설하우스 토양 개량을 위한 바이오차 활용 토양환경 개선 사업 • (효과) 일반적 재배보다 30% 가량 생산량 확대
	충북 진천군	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 목재연료를 활용한 친환경에너지 공급시설을 구축하여 기존 LNG 사용을 대체 • (효과) '25년 본격 가동 이후 온실가스 연간 약 4만4천톤 감축 효과 기대, 탄소제로 인증마크 획득 및 장기적인 탄소감축과 에너지 비용 절감
	강원도 농업기 술원, 한국남 동발전	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 목재펠릿 연료 발전소의 발전 부산물을 활용한 바이오차 생산 및 농림축산식품부의 농업분야 자발적 온실가스감축사업 대상기술로 선정 • (효과) 바이오차는 비료공정규격에 신규 등록, 사회적 가치 창출과 농가의 생산성 향상 기대
	(주)한빛 에코텍	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 바이오차 생산 기계에 우분을 투입하면 건조 후, 열처리 장치를 거쳐 바이오차가 생산 • (효과) 축산분뇨 5톤 투입 시 바이오차 500kg이 생산되는 소형기계로 마을단위로 사용 가능, 퇴·액비화 대비 인의 함량이 줄어들기 때문에 양분관리에도 효과적
국 외	일본	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 도시와 농촌의 상생을 위한 클베지 프로젝트 시행 • (효과) 바이오차와 채소에 대한 탄소인증을 발급함으로써 재정적인 후원과 친환경적 이미지 제고
	독일	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 베를린 식물원의 '테라보가 프로젝트'로 식물 관리를 위한 많은 양의 영양제 사용을 개선 • (효과) 토양의 탄소와 영양분의 손실을 줄여 영양제 및 퇴비 구입비용 절감 및 효율적인 자원순환 촉진
	미국	<ul style="list-style-type: none"> • (개요) 록키산맥에 있는 수많은 소나무와 가문비나무의 병충해 피해 해소('록키산맥 재건 BANR 프로젝트') • (효과) 바이오연료 생산, 쾌적한 환경 유지, 죽은 나무의 제거, 일자리 창출, 지역 사회 교육 등

■ 바이오차 활용방안

- 바이오차의 활용방안에 제시에 앞서 세종시의 바이오차 생산 가능량을 우선 검토함

- 바이오차 생산을 위한 대상 바이오매스는 가축분뇨, 하수슬러지, 농업 부산물로 한정하였으며, 각각의 원료에 대한 바이오차 생산 가능량은 아래와 같음
 - (가축분뇨) 2019년 기준 우분 발생량은 315.9톤/일이며, 이 중 50%를 바이오차 생산을 위한 원료로 가정할 경우 바이오차 생산 가능량은 31.6톤/일로 산정됨
 - (하수슬러지) 2021년 기준 하수슬러지 발생량은 30,455톤/년이며, 이를 바이오차 생산에 활용하면 7,614톤/년의 바이오차 생산이 가능함
 - (농업부산물) 농업부산물의 종류가 다양하고 이와 관련한 연구사례가 없어 정확한 바이오차 생산량을 산정하기 어려운 한계가 있음
- 본 연구에서는 바이오차의 활용방안을 다음 3가지로 제시함

첫째, 농경지 토양개량제로 활용

- 토양환경을 토양개량제 투입을 통해 개선할 수 있으며, 토양개량제로써 바이오차는 작물 생산성 제고에 효과가 있음
- 일반적으로 토양의 주입 양은 토양 전체의 0.5% 이하 수준이며, 토양 분석을 통해 적정한 유기물, 칼슘 및 마그네슘의 투입량을 고려할 수 있음
 - 발토양 양분함량의 적정 범위는 각각 유기물 20~30g/kg, 칼슘 5.0~6.0cmol/kg, 마그네슘 1.5~2.0cmol/kg 정도임
 - 지역별 토양검정정보는 '흙토람' 홈페이지를 통해 확인할 수 있음
- 바이오차의 농경지 주입 주기 및 투입량은 토성 및 재배작물 등에 따라 달라질 수 있으므로 세부적인 연구를 통해 그 기준을 마련할 필요가 있음
- 바이오차가 무기태 질소를 흡착하면 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)와 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 유출에 의한 손실을 줄여 식물 뿌리에 공급되는 영양분이 천천히 방출되어 완효성비료 역할이 가능함

둘째, 지하수 및 하천수 등으로의 양분유출 저감수단으로 활용

- 수질오염총량관리 측면에서 접근했을 때 농경지 자체를 토지계 비점저감시설로 활용하는 방안을 고려할 수 있음
- 양분의 유출량 저감을 기대할 수 있어 토지계 배출부하를 낮추는 효과가 있으므로 이를 바탕으로 토지계 수질오염삭감계수로 활용할 수 있을 것으로 판단됨
- 향후 지하수 및 하천수 등으로의 유출저감 효과 및 삭감계수로 활용되기 위한 상세 연구가 필요함

셋째, 재생에너지원으로 활용

- 바이오매스를 탄소가 농축된 고열량의 바이오차로 가공하여, 청정고형 재생연료로 활용하는 방안임
- 단, 고형연료제품의 품질기준을 강화하여 연료화에 대한 가능성을 제고할 필요가 있음
- 또한 바이오차의 에너지 부분 활용을 위해서는 저위발열량을 최대화하는 방향으로 생산이 필요함

■ 바이오차 생산에 따른 온실가스 감축 효과

- 가축분 바이오차 1톤은 온실가스 1.95~2.85톤 CO₂eq.을 감축할 수 있을 것으로 예상되며, 이는 목질계 바이오차 0.95톤 CO₂eq. 및 왕겨 바이오차 1.24톤 CO₂eq. 보다 온실가스 감축 효과가 높음
- 건조슬러지 1톤을 기존 석탄화력의 보조연료로 사용할 경우, 0.599톤 CO₂eq.의 온실가스 감축효과 있을 것으로 기대함

제2절 정책제언

■ 세종시 작물재배 특성을 고려한 상세 연구 추진

- 바이오차의 농경지 투입에 따른 토양개량 효과로 작물 생산성이 증대된다는 것은 여러 연구를 통해 입증되고 있음
- 한편 작물 및 토성에 따른 투입량과 투입 주기에 관해서는 상세 연구가 필요함
- 세종시 작물재배 종류 및 농경지 토성 등을 확인하고 적절한 투입량 및 투입 주기의 결정을 위한 연구를 추진할 필요가 있음

■ 세종농업기술센터와 연계한 시범사업 추진

- 세종시 농업기술센터와 연계하여 바이오차 투입 시범사업을 우선 추진해보는 것을 제안함
- 농업기술센터는 친환경농업 실천을 위해 연중 작물별 적정 비료의 양 등을 분석하고 주요 작물 재배지 토양검정을 추진하고 있음
 - 농경지 양분의 적정관리로 화학비료 사용을 줄이기 위함
- 적정 비료 투입을 위한 토양검정 시에 산도(酸度), 전기전도도, 유기물, 인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 규산, 석회소요량 등을 분석하고 있으므로 부족한 무기 영양분의 경우에는 바이오차를 투입하여 화학비료의 사용을 절감하는 효과를 나타낼 수 있음
- 이 과정을 통해 화학비료의 사용 절감뿐만 아니라 작물 생산성 제고 효과도 기대할 수 있음
- 또한 시범사업 추진을 통해 세종농업기술센터 및 세종시의 친환경농업 실천 이미지 제고에도 효과가 있을 것으로 판단됨

■ 바이오차 생산 및 취급을 위한 가이드라인 마련

- 바이오차의 장점으로 바이오차에 의한 직접적인 온실가스 저감효과 뿐만 아니라 미생물에 거의 분해가 되지 않는 바이오차의 특성상 토양에서 장기간 존재하여 CO₂ 배출을 감축시키고, 메탄과 아산화질소 등을 배출하는 바이오매스를 대신하여 온실가스를 저감할 수 있다는 점에서 잠재적인 장점까지 고려할 수 있음
- 그러나 바이오차를 활용하여 온실가스 저감 및 오염정화를 달성하고자 한다면 무분별한 생산을 제한하고 활용 조건들을 검토할 필요가 있음
 - 유해한 물질이 첨가된 바이오매스로 바이오차를 생산할 경우, 유독물질이 바이오차에서 발생할 수 있으며, 이에 대한 규제가 필요함
 - 또한, 바이오차의 제조 및 운송 과정에서 미세한 바이오차 입자가 대기중으로 분산되어 2차 환경오염을 유발할 가능성이 있음
- 따라서 바이오차의 효율적이고 안전한 사용을 위해 세종시의 환경여건을 고려하여 바이오차 생산 및 취급에 대한 가이드라인을 마련할 필요가 있음

참고문헌

- CJ제일제당(2021), <CJ제일제당 지속가능경영보고서>
Gerald 등(2007), <전 지구 기후전망>
관계부처 합동(2021), <2050 탄소중립 시나리오>
국립환경과학원(2012), <토양정화 및 CO2 저감을 위한 Biochar 활용기법 연구>
국립환경과학원(2022), <수질오염총량관리기술지침>
그린뉴스(2020), <지구 온난화 해결 방안 9가지(온실 가스 감축 방법)>
글로벌인포메이션(2021), 바이오차(Biochar) 시장 예측 보고서
기상청(2015), <IPCC 제5차 평가 종합보고서>
김미형 등(2014), <폐목재를 이용한 바이오차 생산 및 토양적용의 환경평가>
김주식(2012), <바이오매스의 열분해 기술 특성 및 동향>
김창길(2015), <농업부문 온실가스 감축 목표와 대응전략>
김태흠(2018), <하수슬러지와 우분 배합 Biochar의 토양개량제 활용성 연구>
농림축산식품부(2021), <2050 농식품 탄소중립 추진전략>
농업전망(2022), <농업·농촌, 새 희망을 보다>
농촌진흥청(2018-2020), <신(新)기후 체제 하에서 농업분야 온실가스 배출량 평가 기술 연구>
대전세종연구원(2019), 세종시 가축분뇨의 효율적 관리방안
서울특별시(2022), <2050 온실가스 감축전략>
세종시(2015-2021), <하수슬러지 처리현황>
손달호(2019), <하이브리드 바이오차 및 그 제조 방법>
우승한(2013), <토양탄소격리를 위한 바이오차>
우승한(2015), <기후변화에 대응할 새로운 물질 바이오차>
우승한(2021), <바이오차(biochar)를 이용한 농림업부문 기후변화 대응 적용사례>
충청남도청(2020), <낙엽 재활용(연료화·퇴비화) 방안 연구 용역>
한국과학기술정보연구원(2016), <탄소격리와 환경복원을 위한 바이오차 연구>
한국농촌경제연구원(2007), <농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략>
한국농촌경제연구원(2008), <농산 바이오매스 이용의 손익분기 규모와 이용 활성화 방향>
한국농촌경제연구원(2021), <세계농업정보 제240호>
한국농촌경제연구원(2022), <축산업의 환경 영향 분석과 정책과제>
환경부 온실가스종합정보센터(2021), <2021년 지역별 온실가스 인벤토리 공표>
환경부(2010), <지구온난화 원인과 대책>
환경부(2016), <바이오차를 이용한 토질 개선 및 탄소 격리>
환경부(2019), <전국오염원조사자료-축산계>
환경부(2020), <국가 온실 인벤토리>

- A Mohammed et al.(2018), Effect of Digestate and Biochar Amendments on Photosynthesis Rate, Growth Parameters, Water Use Efficiency and Yield of Chinese Melon (*Cucumis melo* L.) under Saline Irrigation
- Basu(2010), 「Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory」, AcademicPress
- Cheng et al.(2012), Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated Black Chernozem
- Gong et al.(2022), Cattle manure biochar and earthworm interactively affected CO₂ and N₂O emissions in agricultural and forest soils: Observation of a distinct difference
- Lehmann et al.(2006), Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-a review
- Lehmann(2007), A handful of carbon
- Major et al.(2010), Fate of soil applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration
- Mingcan et al.(2009), 폐 석탄광산 배수처리 시 발생하는 슬러지를 이용한 오염토양 중금속 안정화, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(2):239-244
- Singh et al.(2010), Influence of Biochars on Nitrous Oxide Emission and Nitrogen Leaching from Two Contrasting Soils, *J. Environ. Qual*
- Steiner et al.(2007), Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil
- Trigo et al.(2014), Influence of Soil Biochar Aging on Sorption of the Herbicides MCPA, Nicosulfuron, Terbutylazine, Indaziflam, and Fluoroethyldiaminotriazine
- Van Zwieten et al.(2010), Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility

기후변화홍보포털(<https://www.gihoo.or.kr/>)

바이오차테크 홈페이지(<http://www.bghenergy.co.kr>)

유기산업 홈페이지(<https://www.yougiind.com/>)

케이아그로 홈페이지(<http://k-agro.co.kr/>)

테라보가 프로젝트(<https://terraboga.de>)

한국바이오차 홈페이지(<https://kbiochar.com/>)

한국에너지기술연구원 자원지도분석시스템(<https://kier-solar.org/>)

흙도람 홈페이지(<http://soil.rda.go.kr/soil/>)

BANR 프로젝트(<https://banr.colostate.educoolvege.com/>)

경남도민신문(2021.09.02.), “남동발전, 바이오차 농가보급 확대 나선다”
 URL : <http://www.gndomin.com/news/articleView.html?idxno=287943>

경남신문(2018.08.16.), “도농업기술원, 토양개발에 탁월한 ‘바이오차’ 개발”
 URL : <http://www.knnews.co.kr/news/articleView.php?idxno=1258618>

농기자재신문(2018.12.21.), “농진청, 기후변화 대응 ‘바이오차 펠릿’ 활용”
 URL : <http://newsam.co.kr/mobile/article.html?no=12818>

농림축산부 보도자료(2022.10.18.), “가축분 바이오차로 축산업의 탄소중립 구현하다”

농수축산신문 보도자료(2019.5.2.), “바이오차의 효과와 연구 사례는”
 URL : <http://www.aflnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=156356>

농수축산신문(2022.04.28.). “가축분 바이오차, 시범사업 초읽기”
 URL : <http://www.aflnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=225631>

머니투데이(2022.2.21.), “이피에스, “하수슬러지서 연료 생산..탄소중립 현실적 방안””
 URL : <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2022021813321198317>

비즈월드 보도자료(2022.4.10.), “CJ제일제당, 탄소중립 실현 위해 쟁점...CJ블로
 썬캠퍼스에 산림바이오매스 활용 친환경 에너지 공급시설 구축”
 URL : <http://www.bizwnews.com/news/articleView.html?idxno=34756>

인더스트리 뉴스 보도기사 (2021.09.01.), “한국남동발전, “바이오차 농가보급 확대한다””
 URL : <http://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=43568>

전남인터넷신문 보도자료(2021.11.17.), “COP26 국제메탄서약의 농업적 의미”
 URL : http://www.jnnews.co.kr/skin/news/basic/view_pop.php?v_idx=314427

충청투데이(2020.05.18.), “괴산군, 바이오차 활용 토양환경개선 시범사업 ‘주목’”
 URL : <https://www.cctoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=2070049>

한겨레 보도기사(2022.10.27.), “온실가스 주범, ‘소똥’...탄소 꼭꼭 눌러담아 기후위기
 해결사로”
 URL : <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1064423.html>

한국건설기술연구원 보도자료(2019.11.21.), “처치 곤란 음식물 쓰레기, 석탄 대체
 청정 재생에너지로”
 URL : https://www.kict.re.kr/board.es?mid=a10105060000&bid=pressrls &a ct=view&list_no=14154

한국농어민신문(2018.07.03.), “가축분뇨 재생에너지, 가축분뇨를 에너지로 만드는
 독일 농촌마을”
 URL : <https://www.agrinet.co.kr/news/articleView.html?idxno=162406>



대전세종연구원
DAEJEON SEJONG RESEARCH INSTITUTE

34051 대전광역시 유성구 전민로 37(문지동)
TEL. 042-530-3500 FAX. 042-530-3508
www.dsi.re.kr

ISBN 979-11-6075-335-6 93350